

ISSN 2079-004X

4'2015



ТЕХНОЛОГІЇ

В МАШИНОБУДУВАННІ

Вісник Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»



Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Серія: Технології в машинобудуванні

№ 4 (1113) 2015

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2015

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 4 (1113). – 216 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);
К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);
А. П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;
Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;
А. І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;
В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;
В. В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;
П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;
С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; В. М. КОШЕЛЬНИК, д-р техн. наук, проф.;
В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.;
О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.;
П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.; В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.;
М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.;
Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. ТИМОФІЄВ, д-р техн. наук, проф.;
М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Ю.В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.

Заст. відповідального редактора: О. О. Клочко, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: Є. В. Басова, канд. техн. наук, доц.

Члени редколегії: С.С. Добротворський, д-р техн. наук, проф.; О.А. Мельніченко, д-р техн. наук, проф.; О.Я. Мовшович, д-р техн. наук, проф.; О.А. Пермяков, д-р техн. наук, проф.; Ю.А. Сизий, д-р техн. наук, проф.; Д.В. Сталінський, д-р техн. наук.; М.С. Степанов, д-р техн. наук, проф.; В.А. Фадєєв, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Хіщан, д-р техн. наук, проф.; О.М. Шелковий, д-р техн. наук, проф.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Технології в машинобудуванні», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 4 від 24 «квітня» 2015р.

К ЮБИЛЕЮ ПРОФЕССОРА ТИМОФЕЕВА ЮРИЯ ВИКТОРОВИЧА

29 мая доктор технических наук, профессор, академик Академии наук высшей школы Украины, заведующий кафедрой технологии машиностроения и металлорежущих станков Национального технического университета «ХПИ» Тимофеев Юрий Викторович отметит 80-й день рождения.

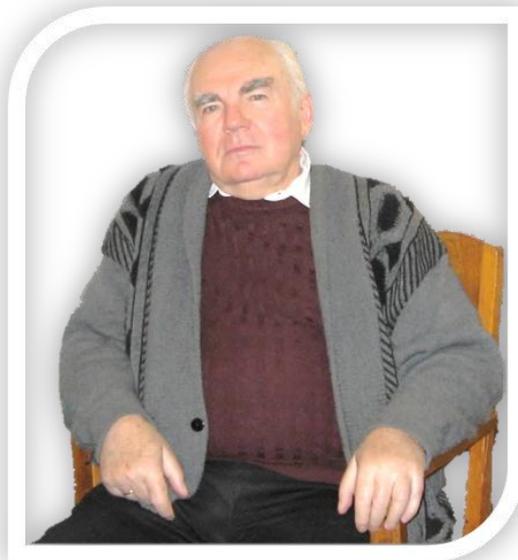
Юрий Викторович родился в Харькове. Тяжелые годы Великой Отечественной войны, разруха, голод воспитали волю и характер молодого и целеустремленного человека. С целью быть полезным в восстановлении народного хозяйства страны и в поисках себя в 1949 году окончил ремесленное училище; с серебряной медалью окончил вечернюю школу. В 1959 г. окончил Харьковский политехнический институт, там же обучался в аспирантуре и докторантуре. Производственный опыт приобретал, работая токарем на Харьковском заводе транспортного машиностроения им. В.А. Малышева, инженером-конструктором на Харьковском станкостроительном заводе им. С.В. Косиора и не только. С 1961 года начал работать ассистентом кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков ХПИ, а затем доцентом, доктором технических наук, профессором, и с 1984 года заведующим кафедрой «Технология машиностроения и металлорежущие станки» Национального технического университета «ХПИ». В 1969 защитил кандидатскую, а в 1985 – докторскую диссертацию.

С 1972 по 1974 год работал в Харьковском политехническом институте в должности декана машиностроительного факультета. С 1993 года работает членом специализированного ученого совета (шифр совета Д64.050.12) по защите докторских диссертаций. В 1994 году Юрию Викторовичу присвоено звание Академика высшей школы Украины по отделению механики и машиностроения. На протяжении многих лет профессор Тимофеев Ю.В. входил в состав экспертного совета ВАК Украины.

Научные труды Ю.В. Тимофеева широко известны не только в Украине, но и за рубежом. Юрий Викторович является основателем научной школы эффективного проектирования, изготовления и использования агрегатированных технологических систем механообработки. Он был координатором разработки и внедрения общих принципов и методик автоматизированного проектирования агрегатированных технологических систем механообработки, создания основ компнетики (теории компоновок) многопозиционных агрегатных станков, которые позволяют создавать эффективное высокопроизводительное агрегатированное металлорежущее оборудование. Под руководством профессора Тимофеева Ю. В. подготовлено и защищено 11 докторских и 13 кандидатских диссертаций, в том числе гражданами Ирака, Нигерии, Доминиканской республики и Китая.

Ученики профессора Тимофеева Юрия Викторовича успешно работают не только в НТУ «ХПИ». Представители научной школы регулярно оппонируют

или рецензируют диссертации, входящих в состав специализированных ученых советов ругих



ВУЗов, комиссий МОН Украины по аккредитации учебных заведений, редакционных советов научно-технических изданий.

Научное направление, которое связано с созданием специального высокопроизводительного металлорежущего оборудования (создаваемого по агрегатно-модульному принципу), технологическая гибкость которого снабжена возможностью его перекомпоновки, включено в Государственную целевую научно-техническую программу развития прогрессивных материалов и технологического оборудования для машиностроения на 2011-2015 гг.

Тимофеев Ю. В. является автором более 250 научно-методических трудов и 6 патентов.

Юрий Викторович – добрый, отзывчивый, жизнерадостный человек. Он помогал многим сотрудникам Национального технического университета «ХПИ» и других учебных заведений и производственных предприятий в сложных жизненных ситуациях и делом. Он имеет большой авторитет среди ученых-технологов. Пользуется значительным уважением среди коллег.

*Коллеги и редколлегия Вестника
Национального технического университета
«Харьковский политехнический институт» серии
«Технологии в машиностроении»
от всей души поздравляют Юрия Викторовича с
юбилеем и желают здоровья и успехов.*

Поступила (received) 27.01.2015

Ю.В. Тимофеев, В.А. Фадеев, А.Н. Шелковой, В.Д. Хицан, А.А. Ключко

ИНТЕГРАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ PLM-РЕШЕНИЕМ

Основные положения концепции интеграционной технологической подготовки промышленного предприятия PLM-решением включают полное детальное описание, защищенное хранение и управляемое использование всей информации о продукции на протяжении всего жизненного цикла продукции с поддержкой целостности и непротиворечивости информации о продукции и поддержкой и управлением всеми бизнес-процессами, связанными с ними данными для распространения информации по всему предприятию. В состав PLM-решений на машиностроительного предприятия включены средства по управлению проектами, средства календарного планирования и управления требованиями с использованием средств Workflow, реально позволяющие автоматизировать бизнес-процессы в рамках всего предприятия.

Ключевые слова: интеграция, технологическая подготовка, машиностроительное предприятие, PLM-решение, информация, бизнес-процессы, функциональность; гибкость; масштабируемость, PDM-системы, САПР.

Глоссарий

CAD – *Computer Aided Design* — проектирование изделий;

CAE – *Computer Aided Engineering* — инженерные расчеты;

CAM – *Computer Aided Manufacturing* — разработка управляющих программ для станков с ЧПУ;

CAPP – *Computer Aided Production Planning* — разработка техпроцессов;

ERP – *Enterprise Resource Planning* — планирование ресурсов предприятия;

MES – *Manufacturing Execution Systems* — системы оперативного управления производством;

MPM – *Manufacturing Process Management* — моделирование и анализ производства изделия;

PLM – *Product Lifecycle Management* — управление жизненным циклом продукции;

PDM – *Product Data Management* — управление данными о продукции;

PM – *Project Management* — управление проектами;

Workflow — управление документооборотом и бизнес-процессами предприятия.

Введение. Стратегической целью инжиниринга машиностроительного предприятия является внедрения PLM-решений для обеспечения реального управления информацией о продукции на протяжении всего ее жизненного цикла и таким образом добиться снижения себестоимости продукции, сократить сроки выпуска новой продукции, повысить конкурентоспособность предприятия, сделать его более прозрачным и управляемым.

Основные положения концепции PLM. Основные положения концепции PLM включают: 1) полное детальное описание, защищенное хранение и

управляемое использование всей информации о продукции на протяжении всего жизненного цикла продукции; 2) поддержка целостности и непротиворечивости информации о продукции на протяжении всего ее жизненного цикла; 3) поддержка и управление всеми бизнес-процессами и связанными с ними данными для распространения информации по всему предприятию.

При реализации PLM - решения на машиностроительном предприятии на первый план выходят следующие требования: функциональность; быстродействие; гибкость; масштабируемость; безопасность. При этом основным рабочим инструментом для сотрудников конструкторских и технологических служб становятся средства поиска информации, средства визуализации и формирования отчетных документов.

В состав PLM-решений на машиностроительном предприятии включаются средства по управлению проектами, средства календарного планирования и управления требованиями. Для этого использованы средства Workflow, реально позволяющие автоматизировать бизнес-процессы в рамках всего предприятия (рис. 1).

Для реализации организационно-функциональной совместимости конструкторско-технологических подразделений машиностроительного предприятия разработана ERP-системы [1]. Для этого реализована интеграция PDM-систем с САПР; интеграция между ERP и PDM системами (рис. 2).

ERP-система реализована в виде многоуровневой системы управления производством на базе MES-системы «Zenith». Она координирует работу CAD, CAPP, CAM и CAE систем.

Для этого используются методы тактического и стратегического планирования. Тактическое планиро-

вание производственного процесса выполняется МРМ-системой «GPS», а стратегическое - МРМ-системой «OMEGA», рис. 1.

Система управления проектами (PM) обеспечивает взаимодействие МРМ-системы «GPS» с САД-системами (AutoCAD, T-Flex, SolidWorks, КОМПАС) и САРР-системами (T-Flex Технология, Techcard, TechnologiCS, ТехноПро)..

МРМ «GPS» обеспечивает: прогнозирование состояния производственного процесса; формирование оптимальной структуры технологического процесса; моделирование отказов и задержек в системе обработки; нормирование вспомогательных операций.

При этом на производственном уровне ERP-система решает следующих задачи (рис. 3):

- формирование оперативного внутрицехового плана с учетом имеющихся заделов и станочного парка;
- диспетчерский контроль исполнения операций;
- контроль выполнения плана;
- расчет производственного плана загрузки производственных мощностей по различным критериям (максимальному коэффициенту загрузки оборудования, минимальному времени пролеживания деталей и т. д.);
- перерасчет в реальном времени производственного плана при возникновении внештатных ситуаций, например поломки станка;
- планирование материалов, необходимых для выполнения производственной программы;
- управление движением товарных потоков: снабжением, сбытом, организацией работы складов и транспортных служб, планированием схем доставки товара и сырья;
- расчет и документирование процессов закупки и продажи, создание сопроводительных документов для каждой партии деталей;
- расчет фактической себестоимости изготовленных изделий и основных средств;
- средства анализа бизнеса, позволяющие определить прибыльные и убыточные направления, динамику положения дел в бизнес-процессах, эффективность работы различных подразделений;
- управление персоналом.

Эффективность любого производства определяется временными, энергетическими и стоимостными характеристиками. Их воздействие на ход организационно-технологического проектирования производственной системы, как правило, носит комплексный характер, что в современных условиях приводит к необходимости повышения уровня мобильности и гибкости производственных систем при сохранении высокой производительности и надежности. Этим требованиям в полной мере отвечают гибкие производственные системы (ГПС), построенные на принципах агрегатирования обрабатывающих модулей (ГПМ).

Известно, что методы проектирования систем обработки массового и крупносерийного производства базируются на аналитических моделях, имеющих

развитый аппарат оптимизации. В то же время, методы проектирования ГПС в основном построены на имитационном моделировании, что само по себе еще не приводит к получению оптимальных организационно-технологических решений, а требует дополнительного статистического анализа модели.

Задача определения рациональных структур маршрутов обработки изделий решена как задача управления ресурсами в условиях ограничений на выбор основного и вспомогательного оборудования [2, 3]:

$$\left. \begin{aligned} TN &= \{T, P, I, O, M_0, \tau, PR\}; \\ P &= \{p_i\}, i = \overline{1, n}; \\ T &= \{t_j\}, j = \overline{1, m}; \\ I: T \times P &\rightarrow \{0, 1\}; \\ O: P \times T &\rightarrow \{0, 1\}; \\ M_0: P &\rightarrow Z_0; \\ \tau: T &\rightarrow R_0; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где P – конечное множество позиций (состояний ГПС); T – конечное множество переходов (методов преобразования объектов обработки в ГПС); I – функция следования (результаты применения функции T к объектам ГПС в состоянии P); O – функция предшествования (перечень условий – наличие состояний P необходимых для применения функции T); M₀ – начальное маркирование, задающее начальное распределение меток по позициям сети (состояние ГПС до начала моделирования); Z₀ – множество неотрицательных чисел (значений характеристик элементов и структур ГПС до начала моделирования); τ – функция времен срабатывания, сопоставляющая каждому переходу постоянное время срабатывания; R₀ – множество рациональных неотрицательных чисел (множество значений характеристик элементов и структур ГПС получаемых в ходе имитационного моделирования); PR – отношение приоритетности (порядка), задаваемое на множестве переходов T и определяющее порядок потребления меток возбужденными переходами в условиях конфликта меток (критерии выбора оптимальных параметров и структур ГПС, для сформировавшихся организационно-технологических и технологических условий на момент принятия решения).

Задача оптимального размещения технологического оборудования на планировке участка с заданной транспортной системой и местами загрузки (разгрузки) оборудования решена как задача максимизации загрузки основного технологического оборудования на основе минимизации суммарных транспортных перемещений между модулями L(X, Y, Θ, Λ).

$$\left\{ \begin{aligned} \min[L(X, Y, \Theta, \Lambda)] &= \sum_{i=1}^M \lambda_i s_i(x_i, y_i, \vartheta_i), \\ f_1(x_i, y_i, \vartheta_i, x_j, y_j, \vartheta_j) &\geq 0, \quad i \neq j, \quad j = 1, \dots, M, \\ f_2(x_i, y_i, \vartheta_i) &\geq 0, \quad i = 1, \dots, M, \\ f_3(x_j, y_j, \vartheta_j) &\geq 0, \quad j = 1, \dots, M, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

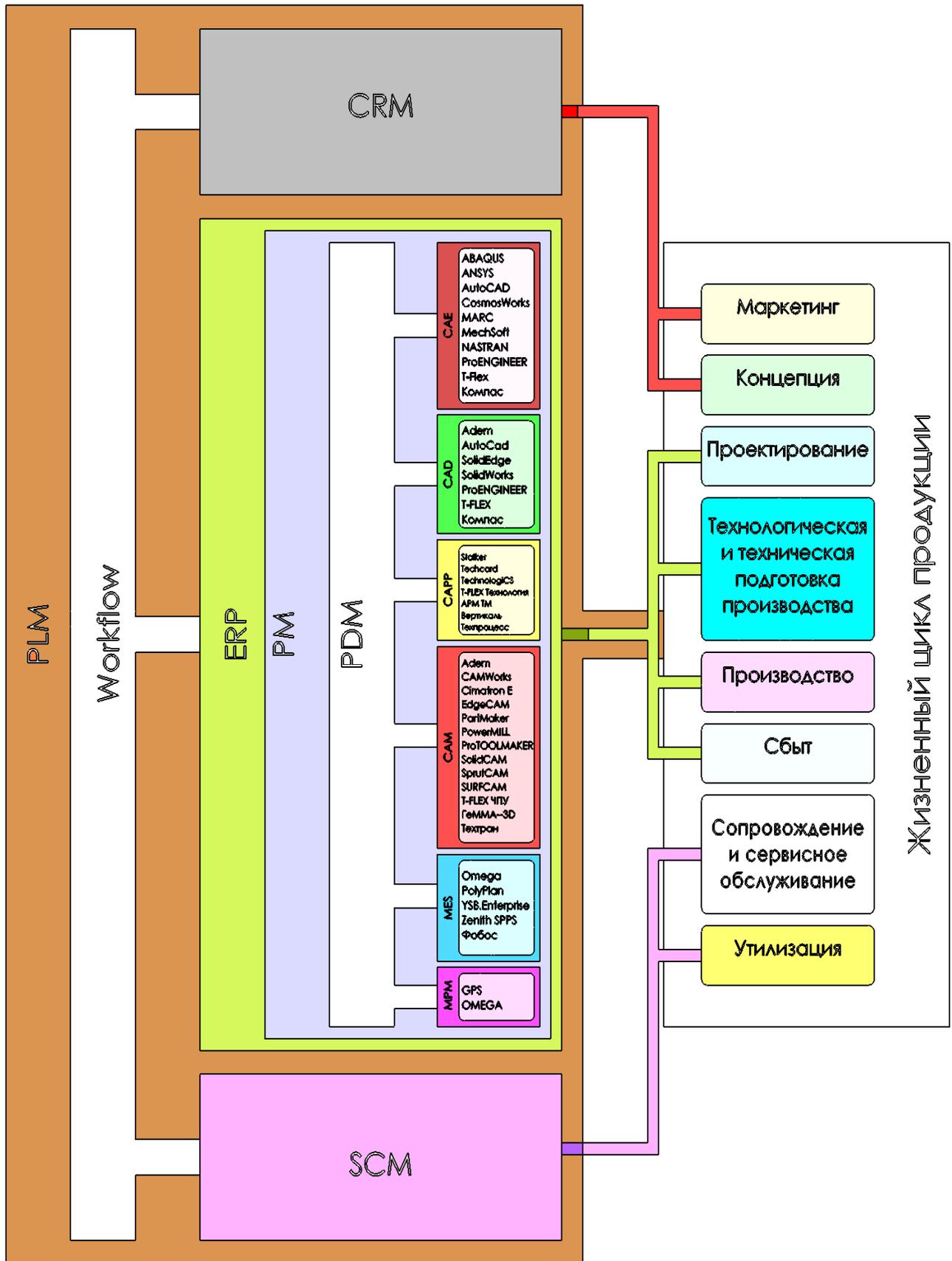


Рис. 1 – Схема формирования жизненного цикла продукции с использованием PLM – систем

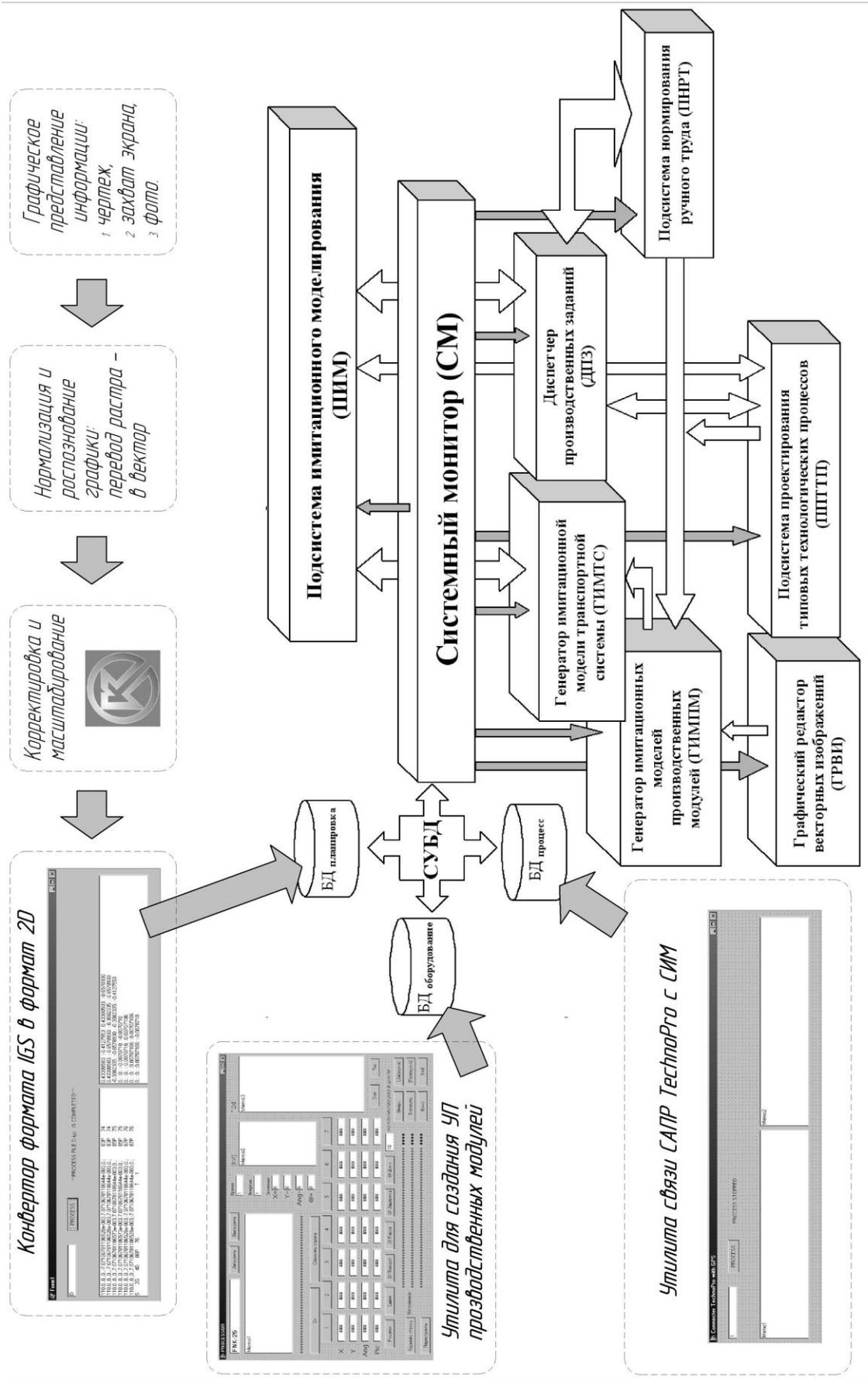


Рис. 2 – Функциональная схема ERP-системы машиностроительного предприятия

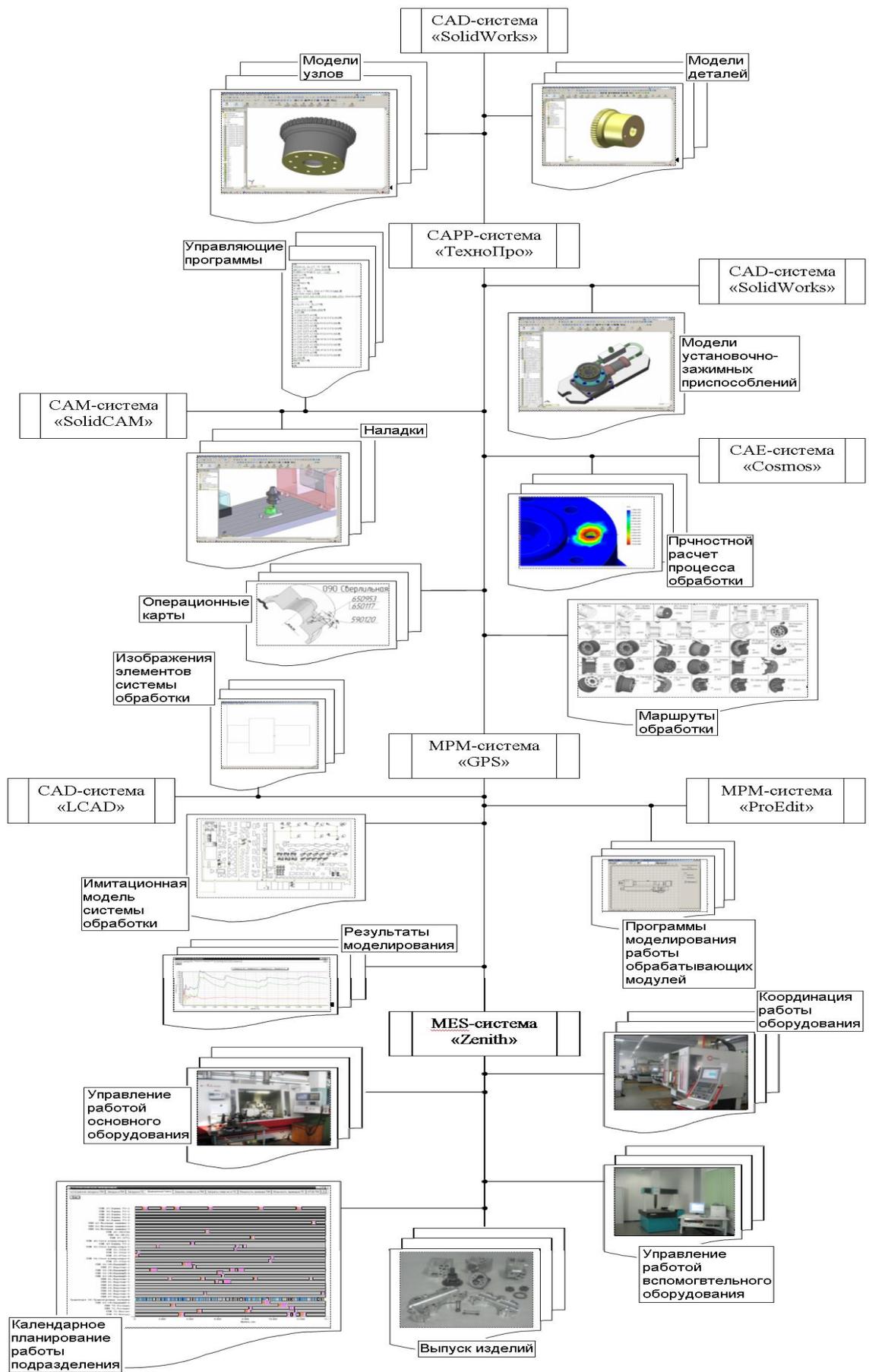


Рис. 3 – Фрагмент структуры PLM - системы промышленных агрегатов

где M - количество размещаемых объектов (модулей); $\Lambda=(\lambda_1, \dots, \lambda_M)$ - вектор интенсивностей обращения модулей к транспорту; $X=(x_1, \dots, x_M)$; $Y=(y_1, \dots, y_M)$ - векторы координат точек привязки модулей; $\Theta=(\upsilon_1, \dots, \upsilon_M)$ - вектор ориентации модулей относительно транспортных линий; $S=(s_1, \dots, s_M)$ - вектор расстояний между модулями и складом.

Решение задач минимизации конфигурации ГПС и оптимизации последовательности запуска изделий на обработку реализовано путем анализа диаграммы работы ее оборудования и гистограммы средней загрузки модулей. В его основу положен алгоритм произвольной выборки партий обработки по критерию максимальной текущей загрузки основного оборудования. Получаемый при этом протокол состояния системы обработки является исходным материалом для текущего планирования.

К задачам энергосбережения относится задача формирования структуры производственной системы по энергетическим критериям (рис. 4). Она, в свою очередь, разбита на задачи минимизации затрат энергии на выполнение производственного задания и формирования парка оборудования с минимальной избыточностью энергетических параметров силовых установок.

В качестве критериев оптимизации использованы:

- эффективная мощность приводов технологического оборудования ($N(t)$), (3);

$$N(t) = N_{гд}(t) + N_{под}(t), \quad (3)$$

где $N_{гд}(t)$ - мощность привода главного движения,

$N_{под}(t)$ мощность привода подачи;

- работа исполнительных механизмов станка (A_j), (4);

$$A_j = \sum N_j(t) \cdot t, \quad (4)$$

где: j - номер узла, входящего в производственный модуль и выполняющего технологическую операцию; $N_j(t)$ - мощность привода j -го узла, используемая для выполнения элементарного движения; t - время работы j -го узла;

- коэффициент полезного действия производственной системы (отдельных станков (КПД_{ст}), модулей (КПД_{мод}), участка (КПД_{уч}), цеха (КПД_ц), транспортной системы (КПД_{ТС}) (5)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{КПД}_{ст} = \frac{\sum A_{рез}}{\sum A_{ст}} \\ \text{КПД}_{мод} = \frac{\sum A_{рез}}{\sum A_{мод}} \\ \text{КПД}_{уч} = \frac{\sum A_{рез}}{\sum A_{уч}} \\ \text{КПД}_{ц} = \frac{\sum A_{рез}}{\sum A_{ц}} \\ \text{КПД}_{ТС} = \frac{\sum A_{ц} - \sum A_{ТМ}}{\sum A_{ц}} \end{array} \right. , \quad (5)$$

где $A_{рез}$ - полезная работа сил резания, затраченная приводами главного движения и подачи станка; $A_{ст}$ - общая работа, затраченная станком; $A_{мод}$ - работа, затраченная всеми механизмами обрабатываемого модуля, имеющими электрические приводы (станками, манипуляторами, приспособлениями и др.); $A_{мод}$ - работа, затраченная всеми подразделениями, входящими в участок и имеющими в качестве энергетических установок электрические двигатели (модули, транспортные устройства, накопители); $A_{ц}$ - работа, затраченная всеми подразделениями, входящими в цех; $A_{ТС}$ - работа, затраченная транспортным модулем на перемещение объекта обработки.

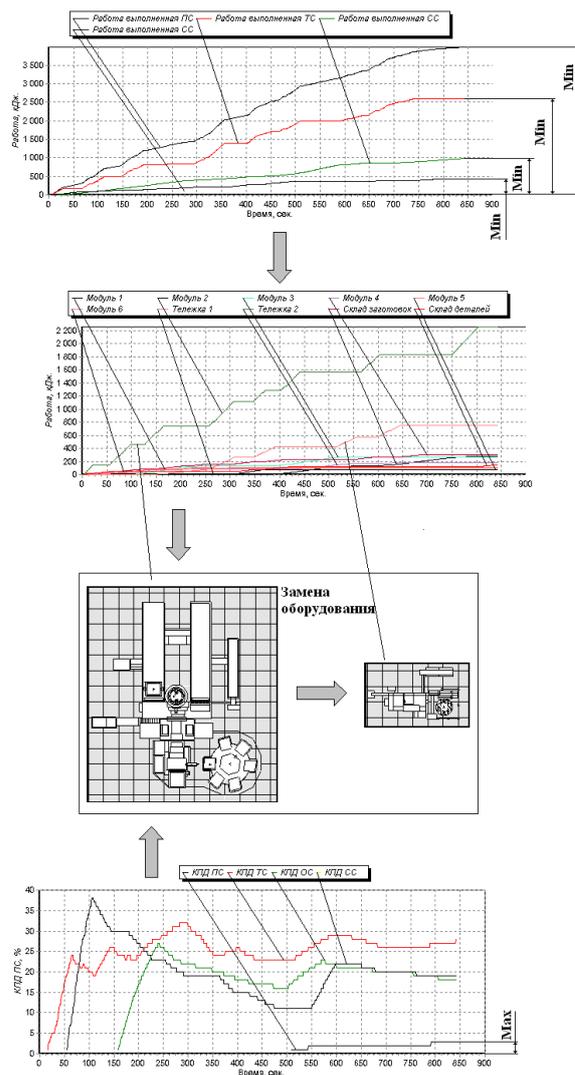


Рис. 4 – Последовательность замены оборудования ГПС в зависимости от уровня ее энергетических показателей

Подбор технологического оборудования по критерию минимальной энергоемкости системы обработки начинается с анализа объема работ, выполненных различными системами ГПС (рис. 4). Эта информация позволяет определить стратегию понижения затрат энергии в технологической системе (в приведенном примере наиболее энергоемким является транспортирование заготовок между модулями).

На следующем этапе определяется наиболее энергоемкий модуль, входящий в систему выбранную для оптимизации. При этом возможны следующие варианты стратегии выбора:

- выбор модуля по значению выполненной работы ($\max(A_i)$);
- выбор модуля по наиболее энергоемкой силовой установке ($\max(N(t))$);
- выбор модуля по критерию минимальной эффективности использования энергии ($\min(KPD_{\text{мод}})$). 5.

В рассматриваемом примере (рис. 4) наименьшей энергетической эффективностью обладает обрабатывающая система ($KPD_{\text{ос}}=18\%$). В ее состав входит наиболее энергоемкий модуль (Модуль 2 – ИР800ПМ2Ф4, $A_2=2200$ кДж). Его замена на менее энергоемкое оборудование (на пример, Модуль 1 – 1В340Ф30) может существенно понизить энергетические затраты в системе обработки. Для принятия окончательного решения о его замене необходимо дополнительно провести сравнительный функциональный анализ основного и вспомогательного оборудования взаимозаменяемых модулей.

Выводы

1. Предложена и теоретически обоснована система объективных критериев оценки технологических решений, характеризующие объект обработки, технологический процесс формообразования и формообразующее оборудование и позволяющие осуществлять синтез и анализ технологических систем механической обработки в точном машиностроении и технологическое прогнозирование в металлообработке.

2. Разработаны прикладные основы автоматизированных систем синтеза и анализа структурно-параметрических характеристик технологических систем механической обработки, базирующихся на алгоритмах комплексных и локальных САПР.

3. Создание принципов гарантированной технологии механической обработки, характерной при изготовлении высокоточных деталей, базируется на технологическом прогнозировании, целью которого является определение на перспективу изменений структурно-параметрических характеристик технологических процессов и реализующих их оборудования и средств оснащения, которые формируются на основе анализа структуры и параметров объекта обработ-

ки, а также адекватных изменений затрат на производство.

4. Разработанная методика технологического прогнозирования развития позволяет промышленному предприятию эффективно подойти к выработке перспективного плана развития, к составлению ежегодных бизнес-планов модернизации производства и комплектации современным металлорежущим оборудованием, инструментом и измерительной техникой.

Список литературы: 1. Тимофеев, Ю.В. Сетевое многоуровневое представление организационно-технологических структур производственных систем / Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, Ю.Г. Гуцаленко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. Тематичний випуск Технологія в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - No23. - С.194-213. 2. Тимофеев, Ю.В. Модернизация организационно-технологической структуры участка обработки детали «Стакан верхній» / Ю.В.Тимофеев, А.Н.Шелковой, А.А. Пермяков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Збірка наукових праць. - Краматорськ: ДДМА. – Вип.19. – 2004. – С.75-81. 3. Фадеев, В.А. Синтез технологических систем механической обработки / В.А.Фадеев // Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007.- 187 с. 4. Шелковой, О.М. Досвід застосування імітаційного моделювання при вирішенні задачі модернізації виробничих підрозділів авіаційної промисловості / О.М.Шелковой, В.А. Фадеев, Ю.Г. Гуцаленко, Є.А. Костигів // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Научно-технічний журнал. – Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського, „ХАІ”. – Харьков, 2008. – Вип. 7/54. – С.181 –188.

Bibliography (transliterated): 1. Timofeev, Y. V., Shelkoyoy, A. N., Gucalenco Y.G., *Multilevel Network view of organizational and technological structures of production systems*. Of the National technical University "Haruki poltechnic": Zbirka scientific essays. Tematychny release Technology in mashinobuduvannia. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2005. No. 23. - P. 194-213. 2. Timofeev Y. C., Shelkoyoy A. N., Permyakov A. A. *Modernization of organizational and technological structure of the site machining "Glass top" // Natinst instrumentu the optimization of technological systems: Zbirka scientific essays*. - Kramatorsk: DDMA. - Vol.19. - 2004. - P. 75-81. 3. Fadeev V.A. *Synthesis of technological systems mechanical processing*. - Kharkov: NTU "KhPI". - 2007.- 187 P. 4. Shelkoyoy O. M., Fadeev V. A., Gucalenco Y. G., Kostygov E.A. *Dosvid prospective meeting, and when wirsen zadach moderncat of virobnychih pdrogw avecina promislovist* Aerospace technics and technology: Scientific and technical journal. The national aerospace University. N. E. Zhukovsky "Khai". The Kharkiv, 2008. The vol. 7/54. The P. 181 - 188.

Поступила (received) 14.03.2015

Тимофеев Юрий Викторович – док. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технология машиностроения и металлорежущие станки» НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25;

Фадеев Валерий Андреевич – док. техн. наук, проф. Государственное предприятие харьковский машиностроительный завод „ФЭД”, Харьков;

Шелковой Александр Николаевич – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: shan-56@mail.ru;

Хицан Валерий Дмитриевич – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25;

Клочко Александр Александрович – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25.

В.Д. Ковалев, Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, Д.А. Кравченко

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИ АППРОКСИМАТИВНОМ РЕШЕНИИ КОНТАКТНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ СМАЗКИ

В статье рассмотрены основные виды разрушения зубчатых колес и технологическое обеспечение эксплуатационных параметров зубчатых передач путем аппроксимативного решения контактно-гидродинамической теории смазки зубчатых передач. Аппроксимативное решение основывается на физически обоснованном предположении о пропорциональности между прогибами активных эвольвентных поверхностей зубьев и соответствующими величинами давлений – эпюрой давлений (гипотеза Винклера–Циммермана) без решения сингулярного интегрального уравнения. Повышение сопротивляемости зубьев выкрашиванию достигается аппроксимативным решением контактно-гидродинамической задачи, в котором прогибы поверхности зубьев определяются методами упругости при помощи системы нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений последовательными приближениями. Установлена зависимость вязкости масла от давления с учетом безразмерных коэффициентов при контактировании зубьев в области трения качения-скольжения и увеличения эпюры гидродинамических давлений.

Ключевые слова: зубчатые колеса, технологическое обеспечение, эксплуатационные параметры, аппроксимативное решение, контактно-гидродинамической теории, смазки зубчатых передач, вязкость масла, давление, безразмерные коэффициенты.

Введение. Одной из основных причин, вызывающих выход зубчатых передач из строя, как выкрашивание активных поверхностей, абразивный износ зубьев, состояние шероховатости рабочих поверхностей зубьев, пластические деформации зубьев является правильный выбор смазывающих масел и условия образования масляного слоя [1, 2, 6].

Зубчатые колеса (рис. 1) являются ответственными деталями металлорежущих станков и определяют надежность, долговечность, точность металлорежущего оборудования. Изучение основных причин отказов высокоскоростных, тяжело нагруженных зубчатых передач определяет основные научные направления по повышению ресурса работы высокоточного ответственного металлорежущего оборудования, обрабатывающих центров.

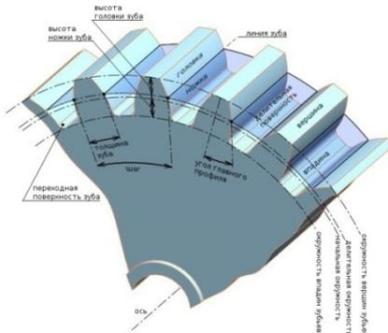


Рис. 1 – Основные параметры зубчатого колеса

Выкрашивание активных поверхностей зубьев связано с усталостными явлениями в поверхностном слое вследствие действия переменных по величине контактных напряжений» под которыми понимаются напряжения, возникающие в зоне контакта при начальном линейном или точечном касании тел, находящихся под действием сжимающей нагрузки. На поверхностях контакта зубьев в результате действия переменных контактных напряжений в поверхностном слое возникают усталостные трещины и изломы зубьев (рис. 2).

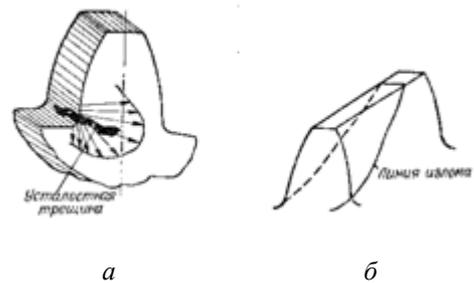


Рис.2 - Виды разрушения зубьев : а - распространение изгибной усталостной трещины; б - излом зубьев косозубых и шевронных зубчатых колес

В развитии выкрашивания активных поверхностей, абразивного износа зубьев, пластических деформаций зубьев зацепляемых цилиндрических зубчатых колес существенную роль играет состояния поверхностного слоя, формы зазора между контактирующими эвольвентными поверхностями

зубьев и соответствующей эпюры распределения давления в масляном слое. Именно состояние поверхностного слоя, форма зазора и эпюра давления являются главными факторами, которые позволяют аппроксимативно решить изотермическую задачу для смазывающей жидкости скоростных, тяжело нагруженных, высокоточных зубчатых цилиндрических передач передних бабок тяжелых токарных станков и предотвратить выкрашивание прежде всего на ножках зубьев, являющихся отстающими поверхностями (рис. 3).

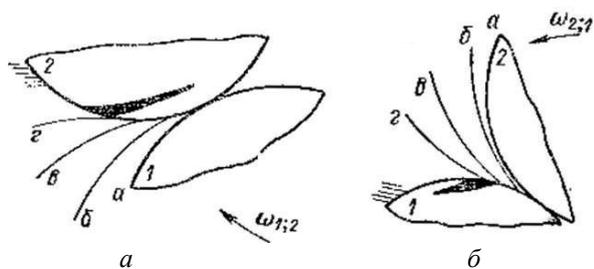


Рис. 3 – Влияние смазки на развитие усталостных трещин: а – выдавливается из них на обгоняющей поверхности; б – заклинивается на отстающей поверхности

Направление усталостных микротрещин ориентируется на поверхности зубьев в зависимости от направления сил трения. Масло, попадая в микротрещины, при дальнейшем движении профилей 1 и 2, промежуточные положения которых обозначены буквами а, б, в, г, выдавливается из них на обгоняющей поверхности (рис. 3, а) и заклинивается на отстающей поверхности (рис. 3, б), создавая расклинивающий аффект, способствующий развитию усталостных трещин и появлению прогрессирующего выкрашивания. Существенное влияние на сопротивление зубьев выкрашиванию оказывают сорт и вязкость смазки, а также способ ее подачи.

Задача гидродинамической теории смазки зубчатых передач приводится к простым квадратурам в случае плоского движения или к дифференциальному уравнению в частных производных в случае пространственного движения [3, 4, 5]. Смешанная задача теории упругости сводится к системе дифференциальных уравнений в частных производных.

В связи со сложностями решения контактно-гидродинамической теории смазки зубчатых передач целесообразно аппроксимативное решение этой совместной задачи, а затем найти уже уточненное решение.

Аппроксимативное решение основывается на физически обоснованном предположении о пропорциональности между прогибами активных эвольвентных поверхностей зубьев и соответствующими величинами давлений – эпюрой давлений (гипотеза Винклера–Циммермана) без решения сингулярного интегрального уравнения.

Повышение сопротивляемости зубьев выкрашиванию может быть достигнуто аппроксимативным решением контактно-гидродинамической задачи, в котором прогибы поверхности зубьев опреде-

ляются методами упругости при помощи системы нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений последовательными приближениями с небольшой погрешностью, что и облегчает получение уточненных решений в любом диапазоне изменения параметров.

Абразивный износ зубьев заключается в истирании активных поверхностей зубьев, существенно зависящем от величины удельного давления, относительной скорости скольжения, состояния активных поверхностей зубьев, возможности попадания в передачу абразивных частиц, толщины маслянного слоя и эпюры распределения удельных давлений. Наличие износа вызывает искажение эвольвентного профиля зуба и может привести к существенному ослаблению ножки зуба. Искажение профилей вызывает возрастание динамических нагрузок и напряжений у основания зуба, а также снижение изгибной прочности зубьев [2, 6].

Существенное влияние на износ играет шероховатость рабочих поверхностей зубьев. Если микронеровности на активных поверхностях зубьев превышают толщину маслянного слоя, то происходит непосредственное соприкосновение активных поверхностей зубьев. Интенсивный начальный износ носит наименование приработочного износа. По мере сглаживания поверхностей зубьев износ уменьшается и может совсем прекратиться. Продолжительность приработочного износа существенно зависит от твердости активных поверхностей зубьев. Для передач с высокой твердостью этот процесс может быть весьма длительным.

Пластические деформации зубьев преобладают в зоне контакта, где эвольвентные поверхности подвергаются сильному всестороннему сжатию, возникают пластические деформации зубьев. Силы трения вызывают перемещение поверхностных слоев материала в направлении вектора скорости скольжения. При этом на поверхности ведущих зубьев вблизи полюсной линии образуется впадина, на поверхности ведомых зубьев – выступ (рис. 4).

Для уменьшения пластических деформаций необходимо увеличение твердости поверхностей зубьев, исследования процесс трения зубчатых передач и применение масел, обладающими специальными свойствами для обеспечения формы зазора между трущимися эвольвентными поверхностями зубьев колес.

В этих случаях процесс трения описывается достаточно точно промежуточными решениями, которые и будут являться для них окончательными.

Правильность определения форма зазора между трущимися эвольвентными поверхностями при контактно-гидродинамическом процессе трения определяется: состоянием поверхностного слоя контактируемых поверхностей; эпюрой гидродинамических давлений, соответствующих этой форме зазора; формы прогибов трущихся эвольвентных поверхностей, возникающих в случае, когда на них действуют найденные ранее эпюры давлений.

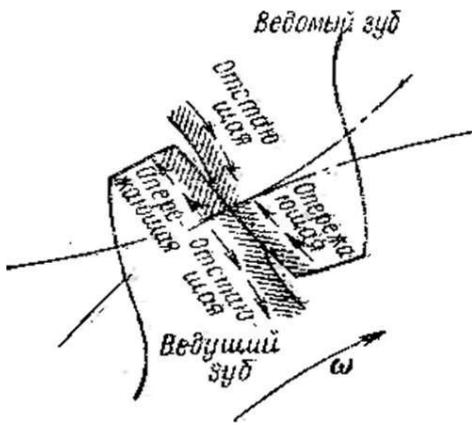


Рис. 4 – Схема пластической деформации активных поверхностей зубьев

При аппроксимативном решении контактно-гидродинамической теории смазки зубчатых передач с целью уменьшения влияния на отказы рассматривается плоская гидродинамическая задача и случай плоской деформации при отсутствии учета сжимаемости смазки. Режим движения принимается установившемся. Предполагается, что отсутствует сближение трущихся поверхностей ($V_0 = 0$) и рассмотрена нестационарная контактно-гидродинамическая задача при $V_0 \neq 0$.

Основное решение находится для изотермической задачи и расчет производится по среднеинтегральной температуре смазочного слоя, т. е. по среднеинтегральной вязкости. Под среднеинтегральной вязкостью понимают такую вязкость смазки, которая, будучи постоянной в области трения, обеспечивает те же гидродинамические характеристики, что и в действительности, когда температура в области трения переменна.

В работах [1, 2] показана возможность вести расчет по среднеинтегральной вязкости масла, определяемой отдельно для каждого сорта масла и соответствующих режимных характеристик – максимального давления и окружной скорости зубчатых колес.

Кроме того, при чистом качении ($U_a = U_b$) обычно приращение температуры внутри смазочного слоя крайне мало, поэтому применение изотермического контактно-гидродинамического расчета приводит к незначительным погрешностям.

Однако при наличии разности скорости трущихся поверхностей ($U_a \neq U_b$) необходимо в расчете сил трения всегда учитывать перепад температуры поперек смазочного слоя. Опыт показывает, что если скорость скольжения менее 3 % от скорости качения, то неизотермические эффекты мало влияют на толщину смазочного слоя. При большей скорости скольжения неизотермический процесс уже влияет на толщину слоя.

Предполагается, что смазывающая жидкость обладает ньютоновскими свойствами и ее вязкость зависит от давления по закону Баруса:

$$\mu = \mu_0 e^{nk_0} \quad (1)$$

где μ_0 — вязкость при атмосферном давлении ($\text{кгс}\cdot\text{с}/\text{м}^2$); n — пьезокэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{кгс}$.

В то же время, не у всех масел вязкость зависит от давления по экспоненциальному закону, в ряде случаев пьезокэффициент зависит от давления.

Рассмотрим случай качения и скольжения эвольвентных поверхностей сопрягаемых зубчатых колес при параллельных осях и большой разности радиусов кривизны. Примем установившийся режим работы и изотермический процесс трения при смазке, обладающей ньютоновскими свойствами. Предположим, что прогибы поверхности пропорциональны давлениям. При расчете принимались следующие условные обозначения (рис. 5): x — координата вдоль направления движения поверхностей, направленная в сторону, обратную движению, м; a, β — размерные координаты конца и начала области трения, м; U_a, U_b — скорости движения трущихся поверхностей, м/с; λ_a, λ_b — кривизны поверхностей в точке контакта до деформации, $1/\text{м}$; h — толщина смазочного слоя в данной точке x с учетом деформации поверхности, м; h_1 — расстояние между поверхностями в данной точке x двух недеформированных окружностей, м; h_m — наименьшая толщина смазочного слоя с учетом деформации, м; h_{m1} — наименьшее расстояние между двумя недеформированными окружностями, м; h_0 — толщина смазочного слоя в точке, где градиент давления равен нулю (в точке максимума давления и в точке обрыва смазочной пленки) с учетом деформации, м; k_0 — гидродинамическое давление в данной точке x с учетом зависимости вязкости масла от давления, $\text{кгс}/\text{м}^2$; p_0 — гидродинамическое давление в данной точке x без учета зависимости вязкости масла от давления, $\text{кгс}/\text{м}^2$; K_0 — гидродинамическая грузоподъемность единицы длины зуба вдоль эвольвентной поверхности с учетом зависимости вязкости масла от давления, $\text{кгс}/\text{м}$; P_0 — гидродинамическая грузоподъемность единицы длины зуба вдоль эвольвентной поверхности без учета зависимости вязкости масла от давления, $\text{кгс}/\text{м}$; μ — абсолютная вязкость масла при давлении k_0 , ($\text{кгс}\cdot\text{с}/\text{м}^2$); μ_0 — абсолютная вязкость масла при атмосферном давлении, ($\text{кгс}\cdot\text{с}/\text{м}^2$); p — пьезокэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{кгс}$; E — приведенный или эффективный модуль упругости трущихся поверхностей, $\text{кгс}/\text{м}^2$, $\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right]$; v_1 — суммарный прогиб двух трущихся эвольвентных поверхностей, м; A' — коэффициент пропорциональности между прогибом поверхности и отношением гидродинамического давления к модулю упругости, м.

$$v_1(x) = A' \frac{p_0(x)}{E} \text{ или } v_1(x) = A' \frac{k_0(x)}{E} \quad (2)$$

Зависимость вязкости масла от давления принимаем по формуле Баруса (1).

Первое уравнение контактно-гидродинамической теории смазки при перечислен-

ных допущениях

$$\frac{dk_0}{dx} = 6\mu_0(U_a + U_b) e^{nk_0} \frac{h_0 - h}{h^3} \quad (3)$$

Второе уравнение можно получить, если выразить форму зазора после деформации через форму зазора до деформации, прогибы поверхности и их взаимные перемещения.

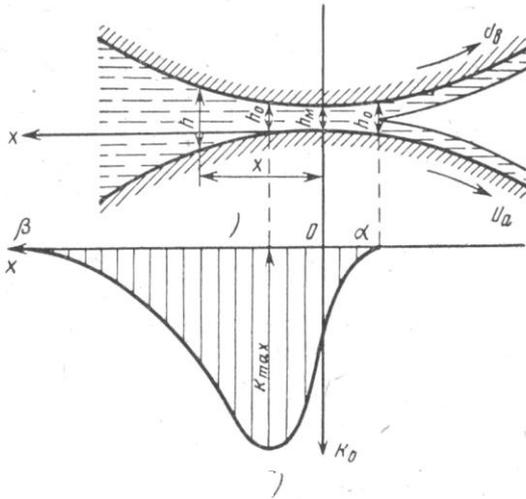


Рис. 5 – Установившийся режим работы и изотермический процесс трения при смазке, обладающей ньютоновскими свойствами зубчатых передач: а – зазор; б – эпюра давления

При большой разности радиусов кривизны для зубчатых передач площадка контакта весьма мала по сравнению с размерами трущихся поверхностей, поэтому допустимо считать, что все давления параллельны друг другу и перпендикулярны оси X.

Пусть после решения контактно-гидродинамической задачи получим какой-то профиль зазора $h(x)$ (рис. 6). Если к нему добавим деформации $v_1(x)$ в каждой точке, то в результате получим профиль зазора до деформации $h_1(x)$ при любом поперечном смещении профилей Δ .

Как известно, зазор между двумя эвольвентными поверхностями до деформации на узком участке с большой степенью точности может быть представлен в виде квадратичной параболы.

$$h_1(x) = h_{m1} + \frac{x^2}{2} (\lambda_a \pm \lambda_b). \quad (4)$$

Применяя указанную гипотезу типа Винклера-Циммермана, получим выражение (2).

Подставляя (1) и (2) в (4), получим уравнение которое и является вторым уравнением контактно-гидродинамической теории смазки.

$$h = h_{m1} - \Delta + \frac{\lambda^2 (\lambda_a \pm \lambda_b)}{2} + \frac{A' k_0}{\varepsilon} \quad (5)$$

Таким образом, задача заключается в совместном решении уравнений (3) и (5). Для охвата всего

требуемого диапазона изменения основных рабочих параметров аппроксимируем эти уравнения к безразмерному виду, что позволяет резко сократить количество независимых расчетных параметров.

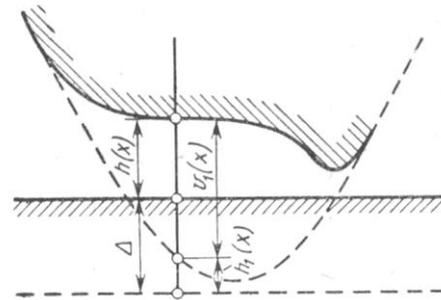


Рис. 6 – Форма зазора до и после деформации эвольвентных поверхностей зубчатых колес

Выразим размерные величины – аргумент x и неизвестные функции h и k_0 – через соответствующие безразмерные величины z , H и k ; $x = B_1 z$; $h = h_0 H$; $k_0 = B k$.

Введенные параметры B и B_1 определим с помощью уравнений (3) и (5). Подставляя принятые обозначения в эти уравнения и перенося множители $\frac{B}{B_1}$ и h_0 в правые части выражений, получаем

$$\frac{dk}{dz} = \frac{6\mu_0(U_a + U_b) B_1}{h_0^2 B} \frac{1-H}{H^2} e^{Bnk}; \quad (6)$$

$$H = \frac{h_{m1} - \Delta}{h_0} + \left[B_1 \sqrt{\frac{\lambda_a \pm \lambda_b}{2h_0}} \right]^2 z^2 + \frac{A' B}{\varepsilon h_0} k. \quad (7)$$

Примем в качестве размерных параметров

$$B_1 = \sqrt{\frac{2h_0}{\lambda_a \pm \lambda_b}}; \quad (8)$$

$$B = \frac{6\mu_0(U_a + U_b) \eta}{h_0^2} \sqrt{\frac{2h_0}{\lambda_a \pm \lambda_b}} \quad (9)$$

и в качестве независимых безразмерных параметров, полностью определяющих решение контактно-гидродинамической задачи

$$B = \frac{6\mu_0(U_a + U_b) \eta}{h_0^2} \sqrt{\frac{2h_0}{\lambda_a \pm \lambda_b}}; \quad (10)$$

$$C = \frac{A' B}{\varepsilon h_0}. \quad (11)$$

Если учесть, что в месте обрыва смазочного слоя безразмерная абсцисса $z = a$, толщина слоя $h = h_0$, давление $k_0 = k = 0$, то в этой точке $H = 1$ и из уравнения (7) получим $\frac{h_{m1} - \Delta}{h_0} = 1 - a^2$. В результате из (3) и (5) находим, что

$$\frac{dk(z)}{dz} = \frac{1-H(z)}{H^3(z)} e^{Bnk(z)}, \quad (12)$$

$$H(z) = 1 - \alpha^2 + z^2 + Ck(z). \quad (13)$$

Эти уравнения решены для различных комбинаций параметров C и B_n , охватывающих весь необходимый диапазон. При этом C изменяется от 0,1 до 40, а B_n – от 0 до 30. При $B_n=0$ вязкость масла не зависит от давления. В этом случае обозначим размерное давление в данной точке через p_0 и безразмерное – через p . Соответственно из (12) получим

$$\frac{dp(z)}{dz} = \frac{1-H(z)}{H^3(z)} \quad (14)$$

В качестве граничных условий примем, что: концом области трения является точка с координатной $z=a$ ($x=a$), где давление и градиент давления равны нулю ($k=0$; $\frac{dk}{dz} = 0$; $p=0$; $\frac{dp}{dz} = 0$); началом области трения является точка с координатой $z=b$ ($x = \beta$), где давление, асимптотически приближающееся к нулю, может с практически допустимой степенью точности приниматься равным нулю. Эти граничные условия общеприняты в гидродинамической теории смазки.

Во всех случаях решение начинают проводить с точки обрыва смазочного слоя ($z=a$) вдоль оси z , в сторону роста координаты z (к месту начала области трения). Такое направление интегрирования вызвано стремлением уменьшить погрешности решения, которые постепенно накапливаются. Вместе с тем, очевидно, что погрешности в зоне малых толщин смазочного слоя оказывают большее влияние на точность решения, чем погрешности в зоне значительных толщин его. Решение при постоянной вязкости зависит от одного безразмерного параметра – коэффициента деформации C . При переменной вязкости к нему добавляется второй параметр – коэффициент режима работы B_n . Каждому расчетному варианту – комбинации параметров C и B_n должно соответствовать свое значение безразмерной координаты конца области трения a .

Известно, что в случае зазора, описанного квадратичной параболой, распределение давления по Эртелю зависит от величины отношения $\frac{h_0}{h_m}$. При этом реально осуществляется только эпюра распределения давления, соответствующая $\frac{h_0}{h_m} = 1,226$. Другие эпюры давления осуществить не могут, так как необходимо удовлетворить граничные условия (обрыв смазочного слоя осуществляется в точке, где $k_0 = \frac{dk_0}{dx} = 0$), и задача имеет единственное решение.

Если задача для деформированных поверхностей решается с конца области трения, то различный выбор значения a фактически аналогичен различному выбору значения $\frac{h_0}{h_m}$.

При этом давления отсчитываются от касательной к эпюре давления в точке конца области трения (при $\frac{h_0}{h_m} = 1,1$ и 1,33). Естественно, что при

этом в начале области трения получаются значительные по величине положительные или отрицательные давления, а не равные нулю. Необходимо подобрать такое значение a , чтобы в районе точки $a=b$ эпюра давления касалась оси x при котором $\frac{p(b)}{p_{max}} \leq 10^{-4}$.

Для значений $C=60$ и $B_n=0$ результаты вычислений показаны на рис. 7. Вначале задаемся $a=-5$. При этом получаем $p(b)<0$. Для увеличения $p(b)$ необходимо увеличить a по абсолютной величине. Приняв $a=-5,5$, находим, что $p(b)>0$. Для уменьшения $p(b)$ необходимо уменьшить a . Приняв $a=-5,3$, находим, что $p(b)$ незначительно отличается от нуля.

При расчетах составляется алгоритм поиска величины a по принятой методике. Расчет производился для ряда различных значений C . При переходе от одного значения C к другому за исходное значение a принималось окончательное полученное для предыдущего случая.

Если при выбранном a_1 получили $p(b)<0$, то принимали новое $a_2=1,5a_1$. Если при принятом a_2 получали $p(b)<0$, то для выбора нового a делили пополам интервал a_2-a_1 и брали значение $a_3 = \frac{a_1+a_2}{2}$ и т. д.

Если при a_2 получали $p(b)<0$, то принимали $a_3=1,5a_2$ и т. д. Если при выбранном a_1 получали $p(b)<0$, то выбирали $a_2 = \frac{1}{2}a_1$.

Таким образом, и в случаях, когда $B_n \neq 0$, удавалось всегда при небольшом количестве опытов (от 3 до 8) получить требуемое a для любого C .

Определим гидродинамическую грузоподъемность

$$K_0 = \int_a^b k_0 dx; P_0 = \int_a^b p_0 dx. \quad (15)$$

Переходя к безразмерным параметрам, получим

$$K_0 = \frac{12\mu_0(U_a+U_b)}{h_0(\lambda_a \pm \lambda_b)} K; P_0 = \frac{12\mu_0(U_a+U_b)}{h_0(\lambda_a \pm \lambda_b)} P, \quad (16)$$

где

$$K = \int_a^b k dz; P = \int_a^b p dz. \quad (17)$$

Для сравнения приведем выражение для гидродинамической грузоподъемности абсолютно жестких эвольвентных поверхностей без учета зависимости вязкости масла от давления (грузоподъемность для профиля зазора, описываемого квадратичной параболой):

$$P_{0кж} = \frac{2,447 \mu_0(U_a+U_b)}{h_m(\lambda \pm \lambda_b)} \quad \text{откуда} \quad \frac{K_0}{P_{0кж}} = 4,904 H_m K$$

$$\text{или} \quad \frac{P_0}{P_{0кж}} = 4,904 H_m P \quad (18)$$

$$\text{тогда} \quad H_m = \frac{h_m}{h_0}$$

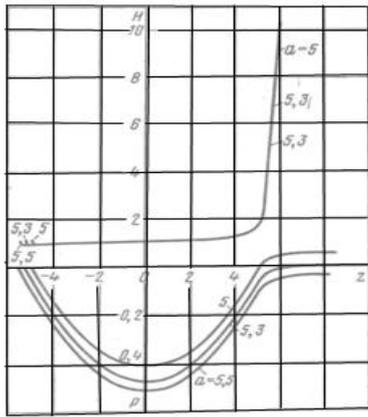


Рис. 7 – Графики для определения безразмерной координаты конца области трения эвольвентных поверхностей по высоте зуба

Приведем результаты расчетов при постоянной вязкости масла. В этом случае имеется один безразмерный параметр C .

На рис. 8 приведены полученные формы зазоров и эпюры давлений для коэффициентов деформации $C=1, 2, 3, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100$ и 120 , при этом графики сдвигались по оси абсцисс без изменения масштаба таким образом, чтобы они имели одну общую начальную точку, соответствующую обрыву смазочного слоя.

Величина сдвига каждой кривой определяется по величине a , приведенной в табл. 1. Из рис. 8 видно, что с увеличением коэффициента деформации C значительно увеличивается протяженность области трения и площадь эпюры давления (гидро-

динамическая грузоподъемность). При этом максимальное гидродинамическое давление p_{max} также растет, но значительно меньше грузоподъемности.

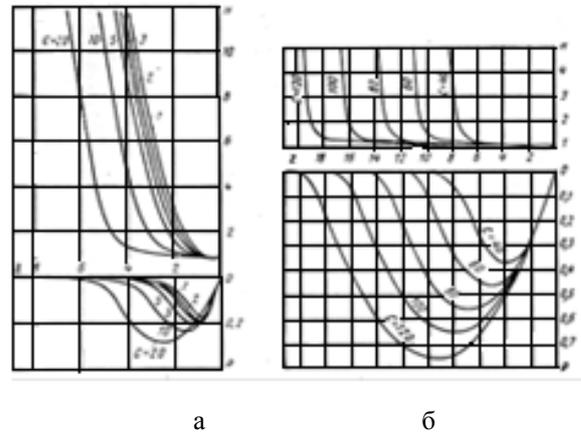


Рис. 8 – Формы зазоров и эпюры давления зубчатых колес: а – при $B_n=0$; $C \leq 20$; б – при $B_n=0$; $C \geq 40$

На рис. 9 – 18 изображены формы зазоров и эпюры давлений для одного значения $C=0,2; 0,5; 1; 3; 5; 10; 20$ и различных значений B_n при учете зависимости вязкости масла от давления при $B_n \neq 0$. С увеличением коэффициента B_n при постоянном C увеличивается протяжение области трения, растет длина контактной площадки, растет вся эпюра гидродинамических давлений. Особенно важен рост максимального давления и рост гидродинамической грузоподъемности.

Таблица 1 – Результаты расчета при постоянной вязкости масла $B_n=0$

c	a	$P_{\text{тах}}$	p	H_m	$\frac{1}{H_m}$	$\frac{P_0 \text{ тах}}{P_0 \text{ ке тах}}$	$\frac{P_0}{P_0 \text{ ке}}$
						1	1
0	-0,4295	0,171	0,245	0,81566	1,226	1	1
1	-0,5455	0,18149	0,270123	0,81202	1,2315	1,0523	1,0757
2	-0,6760	0,191464	0,310141	0,81031	1,2341	1,1066	1,2324
3	-0,8087	0,201786	0,367112	0,81027	1,2340	1,1662	1,4587
5	-1,0467	0,214219	0,422390	0,81787	1,2227	1,2555	1,6941
10	-1,5562	0,241147	0,604875	0,83430	1,1986	1,4561	2,4748
20	-2,3926	0,286029	0,983221	0,85695	1,1669	1,7979	4,1320
40	-3,8833	0,376786	2,006867	0,87319	1,1452	2,4360	8,5937
60	-5,3091	0,469777	3,352975	0,88037	1,1359	3,0748	14,4759
80	-6,7401	0,567837	5,181350	0,88371	1,1319	3,7378	22,4545
100	-8,1664	0,666891	7,285385	0,88651	1,1280	4,4107	31,6728
120	-9,6019	0,768308	9,848940	0,88795	1,1262	5,0938	42,8873

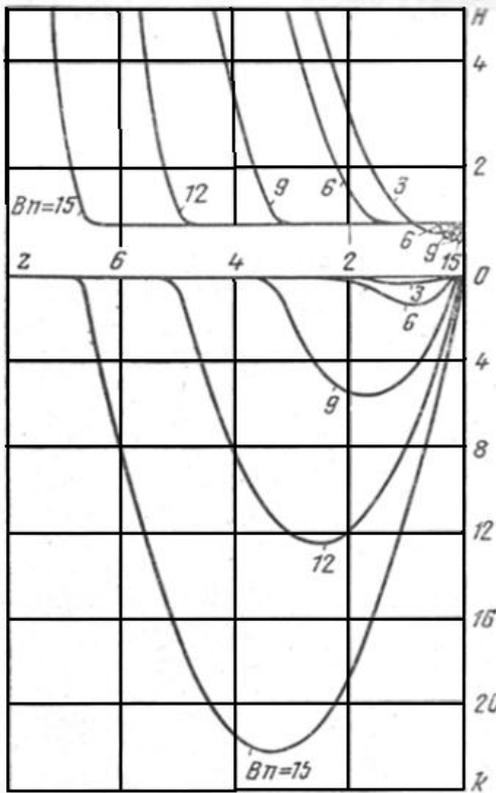


Рис. 9 – Формы зазоров и эпюры давления при $C = 0.5$

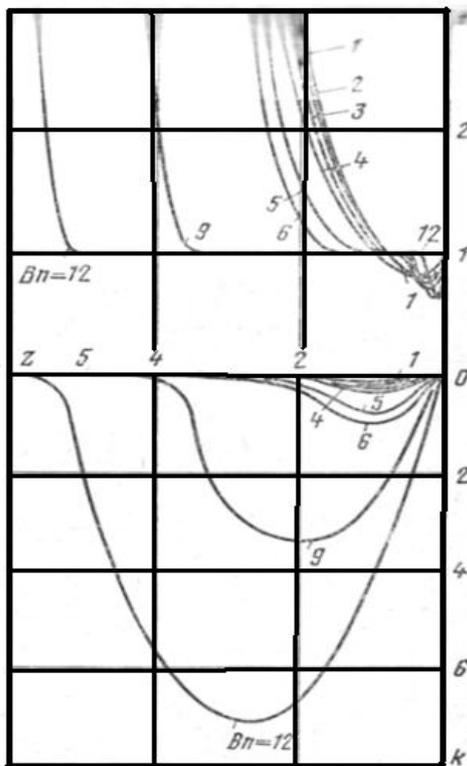


Рис. 10 – Формы зазоров и эпюры давления при $C = 1$

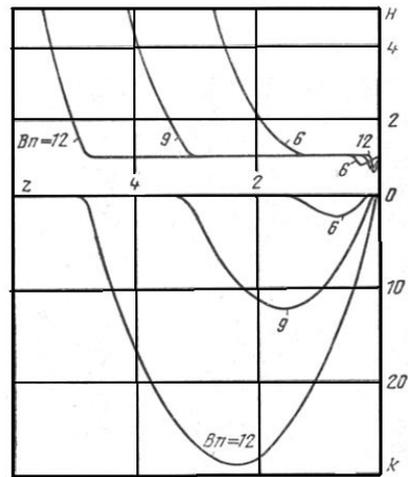


Рис. 11 – Формы зазоров и эпюры давления при $C = 3$

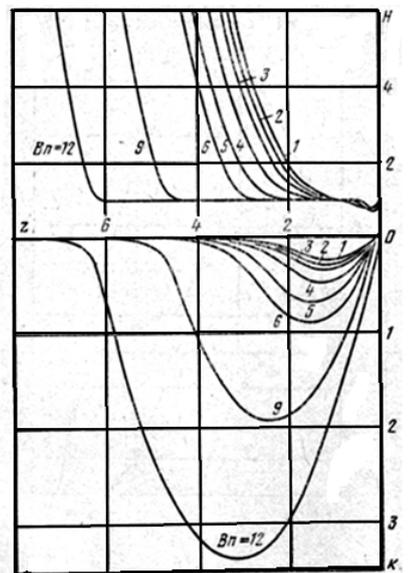


Рис.12 – Формы зазоров и эпюры давления при $C = 0.2$

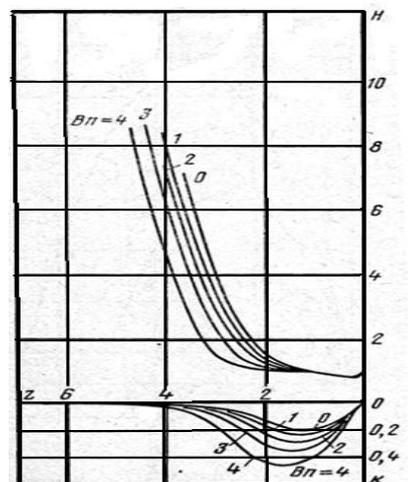


Рис. 13 – Формы зазоров и эпюры давления при $C = 5$

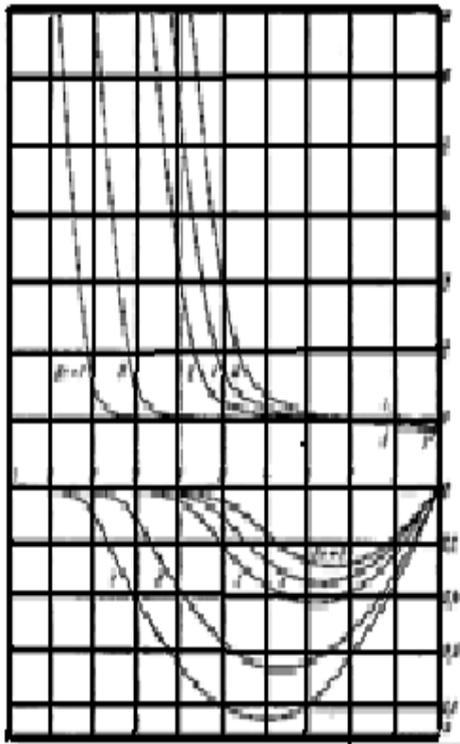


Рис. 14 – Формы зазоров и эпюры давления при $C=20$

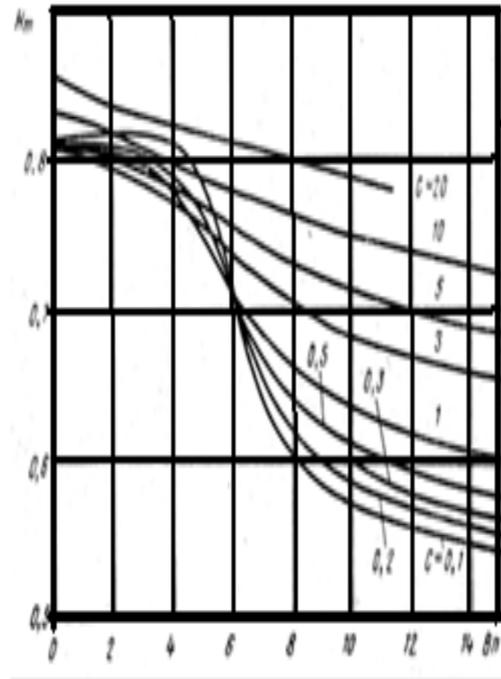


Рис. 16 – График зависимости наименьшей толщины слоя H_m от C и B_n

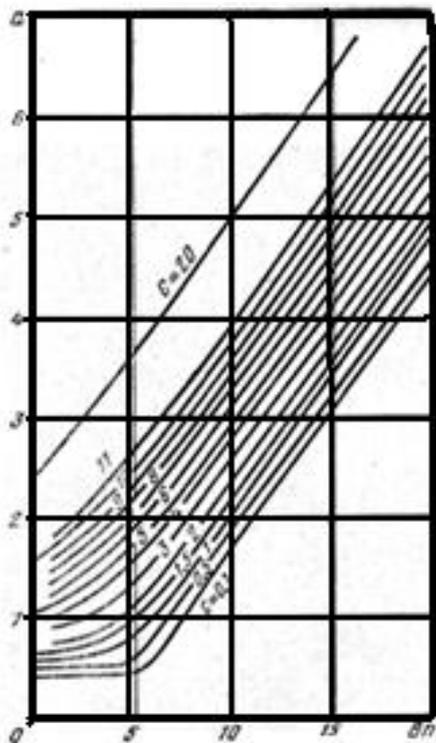


Рис. 15 – График зависимости координаты конца области трения от C и B_n

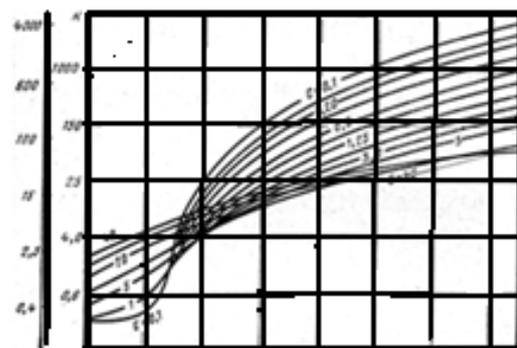


Рис. 17 – График зависимости погонной нагрузки K от B_n и C

Если при $C=1$ без учета зависимости вязкости масла от давления ($B_n=0$) $\frac{P_0}{P_{0\text{из}}} = 1,076$, то с учетом зависимости вязкости масла от давления при $B_n=9$, $\frac{K_0}{P_{0\text{из}}} = 25,9$ и при $B_n=15$ $\frac{K_0}{P_{0\text{из}}} = 164$.

При $C=20$ соответственно при $B_n=0$ $\frac{K_0}{P_{0\text{из}}} = 4,13$, при $B_n=7$ $\frac{K_0}{P_{0\text{из}}} = 18,35$. При $C=0,5$ и $B_n=15$ $\frac{K_0}{P_{0\text{из}}} = 286,9$. Таким образом, десяти- и стократное повышение гидродинамической грузоподъемности наблюдается уже при весьма малых коэффициентах деформации.

На рис. 15 приведено значение параметра A от B_n и C . На рис. 16 показана зависимость H_m от B_n и C . На рис. 17 и 18 приведена зависимость безразмерной нагрузки K от C и B_n .

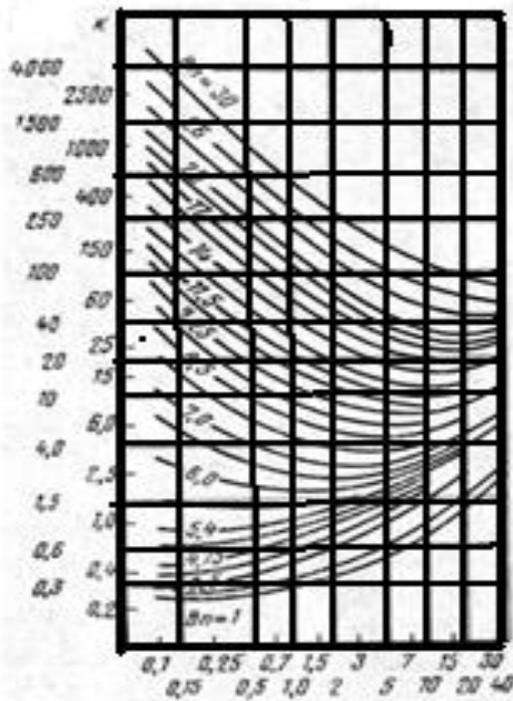


Рис. 18 – График зависимости погонной нагрузки K от C и B_n

Построенные графики при изменении параметра C от 0,1 до 40 и B_n от 0 до 30 позволяют проводить расчеты в широком диапазоне изменения эксплуатационных параметров всех зубчатых передач.

Выводы.

Предложена и теоретически обоснована система объективных критериев оценки технологических решений, характеризующих основные виды разрушения зубчатых колес и технологическое обеспечение эксплуатационных параметров зубчатых передач путем аппроксимативного решения контактно-гидродинамической теории смазки зубчатых передач.

Аппроксимативное решение основывается на физически обоснованном предположении о пропорциональности между прогибами активных эвольвентных поверхностей зубьев и соответствующими величинами давлений – эпюрой давлений (гипотеза Винклера–Циммермана) без решения сингулярного интегрального уравнения.

Повышение сопротивляемости зубьев выкрашиванию достигается аппроксимативным решением контактно-гидродинамической задачи, в котором прогибы поверхности зубьев определяются методами упругости при помощи системы нелинейных алгебра-

ических и трансцендентных уравнений последовательными приближениями..

Разработаны прикладные основы решения при постоянной вязкости и переменной вязкости с учетом коэффициент режима работы и соответствия значения области трения.

6. Графики изменения безразмерных технологических коэффициентов позволяют проводить расчеты в широком диапазоне изменения эксплуатационных параметров зубчатых цилиндрических передач.

Установлена зависимость вязкости масла от давления с учетом безразмерных коэффициентов при контактировании зубьев в области трения качения-скольжения и увеличения эпюры гидродинамических давлений.

Список литературы: 1. Исследование гидродинамических свойств высокоскоростных тяжело нагруженных зубчатых цилиндрических передач тяжелых токарных станков / В. Д. Ковалев, А. А. Клочко, Д. А. Кравченко, Е. Н. Киреев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 79–93. 2. Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667-3. 3. Константинов Ю.М. Техническая механика жидкости и газа: Учебник / Ю.М. Константинов, А.А. Гижя // М.: Высшая школа. - 2002. - 277с. 4. Кулинченко В.Р. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод: Учебник // Киев: Фирма "Инкос" Центр учебной литературы. - 2006. - 616с. 5. Ковалев В.Д. Опоры и передачи жидкостного трения станочного оборудования / В.Д. Ковалев, О.Ф. Бабин // Учебное пособие. -Краматорск: ДГМА, 2005.-188 с. ISBN 5-7763-1125-Х. 6. Анализ параметров поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес, характеризующих их эксплуатационные свойства / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Д. Кошелева, И. Г. Годзула // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 118–131.

Bibliography (transliterated): 1. Kovalev V. D., Klochko A. A., Kravchenko D. A., Kireev E. N.. *The hydrodynamic properties of high-speed heavy-duty toothed cylindrical gears heavy lathes*. Instrument reliability and optimization of technological systems : collected papers. Tr. - Kramatorsk : DSMA, 2012. - Vol. 31. pp. 79-93. 2.. Klochko A.A. [and others]. *The technological basis gears hardened coarse-grained gears: monograph*. - Friday, DSMA, 2014. - 479 p. ISBN 978-966-379-667-3. 3. Konstantinov Y.M., Gija A.A. *Technical fluid mechanics: a Textbook*. Moscow: Higher school. 2002. - 277 p. 4. Kulichenko V. R. *Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drive: Textbook*. Kiev: Firm "Incos" Center of educational literature. 2006. – 616 p. 5. Kovalev V. D., Babin O.F. *Bearings and transmission fluid friction in machinery. A training manual*. - Kramatorsk: DSMA, 2005.-188 p. ISBN 5-7763-1125. 6. Mironenko E. V., Klochko A. A., Kosheleva A. D., Gajula I. G. *Analysis of the parameters of the surface layer hardened coarse-grained gears characterizing their performance characteristics. Instrument reliability and optimization of technological systems : collected papers*. Tr. - Kramatorsk : DSMA, 2012. - Vol. 31. pp. 118-131

Поступила (received) 21.03.15

Ковалев Виктор Дмитриевич – док. техн. наук, проф. ДГМА, Краматорск;

Тимофеев Юрий Викторович – док. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технология машиностроения и металлорежущие станки» НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25 ;

Шелковой Александр Николаевич – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25 e-mail: shan-56@mail.ru;

Клочко Александр Александрович– док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25;

Кравченко Дмитрий Александрович – аспирант ДГМА, Краматорск.

Ю.А. Сизый, Д.В. Сталинский, П.В. Романченко

ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА, ОБУСЛОВЛЕННОЕ ПОГРЕШНОСТЯМИ ЕГО ФОРМЫ

Одной из важнейших характеристик абразивных кругов для ручного обдирочного шлифования является неуравновешенность, поскольку определяет вибрационную характеристику работы ручных шлифовальных машин и, как следствие, условия работы операторов по вибрационной безопасности. В условиях современного абразивного производства, когда неоднородность структуры инструмента сведена к минимуму, основной причиной неуравновешенности являются погрешности геометрической формы абразивного круга. В статье получены формулы для расчета величины смещения центра тяжести круга, обусловленного погрешностями его формы, такими как эксцентricность оси вращения относительно наружной поверхности круга и непараллельностью его торцов. На основе полученных формул произведен анализ требований к точности изготовления кругов для ручных шлифовальных машин. Установлена несогласованность требований ГОСТ 23182-78 между нормируемой им геометрической точностью абразивного круга и допустимым дисбалансом.

Ключевые слова: шлифовальный круг, погрешности формы круга, дисбаланс, ручная шлифовальная машина.

Введение. Одной из важнейших характеристик абразивных кругов для ручного обдирочного шлифования является неуравновешенность, поскольку определяет вибрационную характеристику работы ручных шлифовальных машин и, как следствие, условия работы операторов по вибрационной безопасности. В условиях современного абразивного производства, когда неоднородность структуры инструмента сведена к минимуму, основной причиной неуравновешенности являются погрешности геометрической формы абразивного круга. В настоящее время неуравновешенность масс абразивных кругов для ручных шлифовальных машин, как и геометрическая точность их изготовления, нормируется ГОСТ 23182-78, однако теоретической взаимосвязи между величиной неуравновешенности масс абразивного круга и погрешностями его геометрической формы не выявлено, что не позволяет оценить согласованность вышеуказанных требований.

Цель исследований. Целью исследований является установление математической зависимости между неуравновешенностью масс абразивного круга (дисбалансом) и величинами погрешностей его геометрической формы с последующим сравнением расчетного дисбаланса при максимально-допустимых погрешностях геометрической формы с нормируемым.

Основными погрешностями формы круга, ведущими к смещению его центра тяжести относительно оси вращения, т.е. к дисбалансу являются эксцентricность оси вращения относительно наружной поверхности круга, обозначенная e и непараллельность торцов круга, обозначенная b .

Результаты исследований. Так как эксцентricность рассматривается в плоскости перпендикулярной оси вращения круга, то высота круга не влияет на смещение центра тяжести круга от эксцентricности $X_c(e)$. Поэтому $X_c(e)$ находим рассматривая эту

задачу для плоской фигуры, ограниченной радиусом R (наружный радиус круга) с центром в точке O , и окружностью радиусом r (радиус посадочного отверстия) с центром в точке O' , смещенным относительно точки O на величину $OO' = e$ (рис. 1).

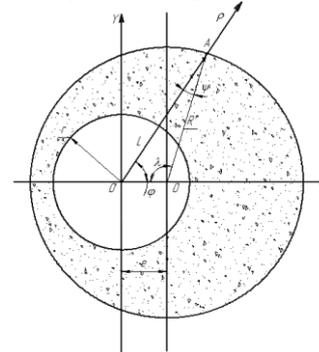


Рис. 1 – Схема к расчету положения центра тяжести при эксцентricности e отверстия в круге

Для плоской однородной фигуры координаты центра тяжести по оси X , т.е. X_c , определяются следующим образом [1]:

$$X_c = \frac{\int x ds}{S}, \quad (1)$$

где S – площадь фигуры.

Так как плоская фигура не сплошная, а с отверстием, то удобно X_c определять, описывая числитель и знаменатель в полярной системе координат. Полнос

расположим в центре декартовой системы координат $XO'Y$

Радиус-вектор ρ ограничим окружностью радиуса r с центром в точке O' и окружностью радиуса R с центром в точке O , смещенном вдоль оси X от центра O' на величину e .

Следовательно, чтобы описать фигуру на рис. 1 в полярной системе координат, необходимо описать окружность радиуса R с полюсом в точке O' в полярной системе координат.

Таким образом, надо описать вектор $\overline{O'A}$ из треугольника $O'AO$. Обозначим $O'A = L$; $O'O = e$ и $OA = R$. Углы этого треугольника обозначены на рис.2.1.

Согласно теореме синусов:

$$\frac{R}{\sin \varphi} = \frac{e}{\sin \psi} \Rightarrow \sin \psi = \frac{e \sin \varphi}{R} \Rightarrow \psi = \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right).$$

Из треугольника $O'AO$ найдем угол λ , противолежащий стороне L :

$$\lambda = \pi - \varphi - \psi.$$

Из треугольника $O'AO$, воспользовавшись теоремой синусов, определим сторону L :

$$\begin{aligned} \frac{L}{\sin \lambda} &= \frac{R}{\sin \varphi} \Rightarrow L = \frac{R \sin \lambda}{\sin \varphi} = \frac{R}{\sin \varphi} \sin(\pi - \varphi - \psi) = \\ &= \frac{R}{\sin \varphi} \sin \left(\pi - \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) \right) = \\ &= \frac{R}{\sin \varphi} \sin \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Теперь можно расписать (1) в полярной системе координат:

$$x_c = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_r^L \rho d\rho \cdot \rho \cos \varphi}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_r^L \rho d\rho}. \quad (3)$$

Рассмотрим решение числителя выражения (3):

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_r^L \rho d\rho \cdot \rho \cos \varphi &= \int_0^{2\pi} \cos \varphi d\varphi \int_r^L \rho^2 d\rho = \\ &= \int_0^{2\pi} \cos \varphi d\varphi \left(\frac{\rho^3}{3} \Big|_r^L \right) = \int_0^{2\pi} \cos \varphi d\varphi \left(\frac{L^3}{3} - \frac{r^3}{3} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив выражение (2) в (4) получим:

$$\begin{aligned} &\int_0^{2\pi} \cos \varphi d\varphi \left(\frac{R^3}{3 \sin^3 \varphi} \sin^3 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) - \frac{r^3}{3} \right) = \\ &= \int_0^{2\pi} \frac{R^3 \cos \varphi}{3 \sin^3 \varphi} \sin^3 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) d\varphi - \int_0^{2\pi} \frac{r^3}{3} \cos \varphi d\varphi = \\ &= \frac{R^3}{3} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi}{\sin^3 \varphi} \sin^3 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) d\varphi - \frac{r^3}{3} \sin \varphi \Big|_0^{2\pi} = \\ &= \frac{R^3}{3} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi}{\sin^3 \varphi} \sin^3 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) d\varphi. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим решение знаменателя в выражении (2.4):

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_r^L \rho d\rho = \int_0^{2\pi} d\varphi \cdot \left(\frac{L^2}{2} - \frac{r^2}{2} \right). \quad (6)$$

Подставив выражение (2) в (6) получим:

$$\begin{aligned} &\int_0^{2\pi} d\varphi \cdot \left(\frac{R^2}{2 \sin^2 \varphi} \sin^2 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) - \frac{r^2}{2} \right) = \\ &= \int_0^{2\pi} \frac{R^2}{2 \sin^2 \varphi} \sin^2 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) d\varphi - \int_0^{2\pi} \frac{r^2}{2} d\varphi = \\ &= \frac{R^2}{2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sin^2 \varphi} \sin^2 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) d\varphi - \frac{r^2}{2} \int_0^{2\pi} d\varphi = \\ &= \frac{R^2}{2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sin^2 \varphi} \sin^2 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) d\varphi - \frac{r^2}{2} \left(\varphi \Big|_0^{2\pi} \right) = \\ &= \frac{R^2}{2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sin^2 \varphi} \sin^2 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) d\varphi - \pi r^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставив полученные выражения числителя (5) и знаменателя (7) в выражение (3) получим общее вы-

ражение для определения координаты центра тяжести по оси X фигуры на рис.1:

$$X_c = \frac{\frac{R^3}{2} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi}{\sin^3 \varphi} \sin^3 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) d\varphi}{\frac{R^2}{2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sin^2 \varphi} \sin^2 \left(\varphi + \arcsin \left(\frac{e}{R} \sin \varphi \right) \right) d\varphi - \pi r^2}. \quad (8)$$

В качестве примера выполнен расчет $X_c(e)$ для круга ПП 150x25x32, т.е. для следующих данных: $R = 75$ мм, $r = 16$ мм; изменения e дискретно от 0,05мм до 0,6мм. Расчет выполнен в «Mathcad» и приведен на рис.2

Анализ расчета показывает, что различие между e и $X_c(e)$ растет с ростом e . Однако в пределах $e = (0,05 \div 0,45)$ мм это различие не превышает 4%, что позволяет принимать $X_c(e) \approx e$.

$$R := 75 \quad r := 16 \quad e_i := 0.05, 0.15, 0.6$$

$$X_c(e) := \frac{\frac{R^3}{3} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\phi)}{\sin(\phi)^3} \cdot \sin\left(\phi + \arcsin\left(e \cdot \frac{\sin(\phi)}{R}\right)\right)^3 d\phi}{\frac{R^2}{2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sin(\phi)^2} \cdot \sin\left(\phi - \arcsin\left(e \cdot \frac{\sin(\phi)}{R}\right)\right)^2 d\phi - \pi \cdot r^2}$$

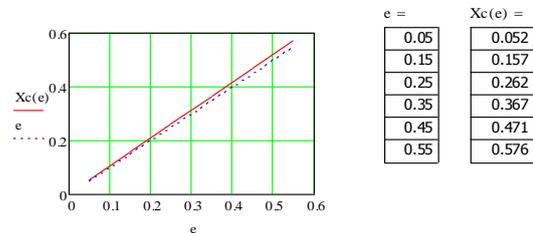


Рис.2 – Смещение центра тяжести X_c от эксцентриситета e

Расчет смещения центра тяжести круга, обусловленного непараллельностью торцов, выполняем из условия однородной плотности круга по всему его объему.

У круга, показанного на рис.3, центр тяжести смещен по оси X в положительном ее направлении и непараллельность торцов круга определяется параметром b .

В данном случае задача является объемной и координата центра тяжести X_c по оси X рассчитывается в общем случае для однородного тела следующим образом [1]:

$$X_c = \frac{\int_V x dv}{V}, \quad (9)$$

где V – объем тела.

Поскольку шлифовальный круг представляет собой тело вращения, то расчет X_c удобно производить в цилиндрической системе координат. В этом случае:

$$\begin{aligned} V &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_r^R \rho d\rho \int_{z_1}^{z_2} dz = \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_r^R \rho d\rho [z_2 - z_1], \end{aligned} \quad (10)$$

где: z_2 – уравнение прямой ED ;

z_1 – уравнение прямой AB (рис.3).

Согласно рис.3 $z_1 = 0$, а z_2 получим как линию, проходящую через точки $E(z_1, X_1) = E(C, -R)$ и $D(z_2, X_2) = D(C+b, R)$:

$$z_2 = \frac{b}{2R}(X + R) + C. \quad (11)$$

Подставив уравнение ED и AB , т.е. z_1 и z_2 и $X = r \sin \varphi$ в (8) получим:

$$V = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_r^R \rho dr \left[\frac{b}{2R} (\rho \sin\varphi + R) + C \right] = (R^2 - r^2) \left(\frac{b}{2} + C \right) \cdot \pi. \quad (12)$$

Распишем выражение для числительного (9) в цилиндрической системе координат:

$$\int_V x dv = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_r^R \rho dr \int_{z_2}^{z_1} \rho \sin\varphi dz \quad (13)$$

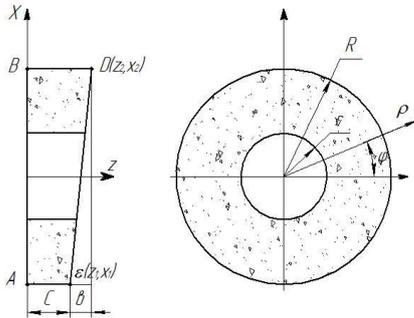


Рис. 3 – Схема для расчета положения центра тяжести в зависимости от непараллельности торцов

Подставив в (13) значения $z_1=0$,

$z_2 = \frac{b}{2R} (X + R) + C$, $X = r \sin\varphi$, получим

$$\int_V x dv = \int_0^{2\pi} \sin\varphi d\varphi \int_r^R \rho^2 dr \left[\frac{b}{2R} (\rho \sin\varphi + R) + C \right] \quad (14)$$

Проинтегрировав (14), получим

$$\int_V x dv = \frac{b \cdot \pi}{8 \cdot R} (R^4 - r^4) \quad (15)$$

Подставив (10) и (13) в (7) получим окончательно:

$$X_c(b, C) = \frac{b(R^2 + r^2)}{8R(\frac{b}{2} + C)} \quad (16)$$

На рис.4 выполнен анализ (14) для круга с $R = 75$ мм и $r = 16$ мм. Из графиков этого рисунка видно, что X_c растет практически линейно и уменьшается с ростом высоты круга C .

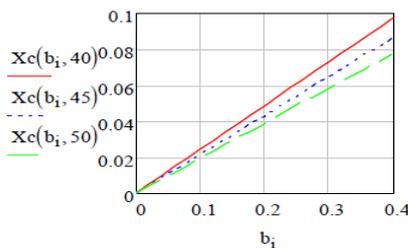


Рис.4 – Анализ смещения центра тяжести круга от непараллельности его торцов

Владея формулами $X_c(e)$ и $X_c(b, C)$ можно рассчитать неуравновешенность (дисбаланс) круга m_d .

Он рассчитывается как произведение неуравновешенной массы на расстояние до оси вращения:

$$m_d = m \cdot r, \quad (17)$$

где $r = X_c$; m – неуравновешенная масса, кг.

При расчете m_d от эксцентриситета $X_c = X_c(e) \approx e$, а при расчете m_d от непараллельности $X_c = X_c(b, C)$ и вычисляется по (14). ГОСТ 23182-78 нормирует ради-

альное биение наружной поверхности круга относительно оси посадочной поверхности величиной 0,2 мм. Следовательно, смещение оси отверстия относительно оси наружной поверхности т.е. эксцентриситет $e = 0,2/2 = 0,1$ мм.

Для круга ПП 150x25x32 массой $m_{кр} = 1,138$ кг величина дисбаланса $m_d(e) = 1,138 \cdot 0,1 = 0,1138$ кг·мм.

ГОСТ 23182-78 нормирует для кругов ручных шлифовальных машин отклонение от параллельности торцов величиной $b = 0,1$ мм. Расчет для круга ПП 150x25x32 по (14) дает $X_c(b, C) = 0,039$ мм, и соответственно $m_d(b) = 1,138 \cdot 0,039 = 0,0445$ кг·мм. Тот же ГОСТ 23182-78 нормирует допустимую неуравновешенную массу круга величиной $0,004 \cdot m_{кр}$ на радиусе круга.

Поэтому, допустимый дисбаланс согласно ГОСТ 23182-78 для круга ПП 150x25x32 получится равным $m_d = 0,004 \cdot m_{кр} \cdot R = 0,004 \cdot 1,138 \cdot 75 = 0,3414$ кг·мм.

Если исходить из того, что нормирование погрешностей формы круга преследует цель ограничения его дисбаланса, то возникающий дисбаланс как от предельно допустимых эксцентриситетов и параллельности торцов круга значительно меньше допустимого дисбаланса. Даже если предположить, что векторы $X_c(e)$ и $X_c(b)$ совпадут, то суммарный дисбаланс $m_d = m_d(e) + m_d(b) = 0,1138 + 0,0445 = 0,1583$ кг·мм, что в $0,3414/0,158 = 2,16$ раза меньше чем нормируемый.

Выводы. Результаты исследований указывает на несогласованность требований ГОСТ 23182-78 между нормируемой им точностью формы круга и допустимым дисбалансом.

Полученные формулы расчета $X_c(e)$ и $X_c(b)$ могут быть использованы для моделирования вибраций ручных шлифовальных машин, возбужденных дисбалансом вращающегося круга.

Список литературы: 1. Сталинский Д.В. Влияние неуравновешенности масс абразивных кругов на вибрационную характеристику работы ручных шлифовальных машин / Д.В. Сталинский, Ю.А. Сизый, Л.Г. Яровая, П.В. Романченко // Экология та виробництво. – 2002. – No2-3. – С. 53 – 56. 2. Сталинский Д.В. Влияние точности изготовления и эксплуатационных свойств абразивного инструмента на условия работы операторов ручных шлифовальных машин / Д.В. Сталинский, Л.Г. Яровая, П.В. Романченко // Сб. научн. статей к XI Международной научно-технической конференции «Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов». – Харьков. – УкрГНТЦ «Энергосталь», 2003. – Т1. – С. 89 – 97.

Bibliography (transliterated): 1. Stalinskiy D. V., Sizi Yu. A., Yrovay L. G., Romanchenko P. V. The influence of the unbalance mass of abrasive wheels on vibration characteristics of hand grinding machines. Ecology vrobniectvo. - 2002. - No. 2-3. - pp. 53 - 56. 2. Stalinskiy D. V., Yrovay L. G., Romanchenko P. V. The Impact of precision manufacturing and operational properties of the abrasive tool on the working conditions of the operators hand grinding machines. Sci. articles to the XI International scientific-technical conference "Ecology and human health. Protection of water and air basins. Disposal of waste". - Kharkov. - UkrSSEC "Energostal", 2003. - Vol 1. pp. 89 - 97.

Поступила (received) 31.03.2015

Сизый Юрий Анатольевич – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25;

Сталинский Дмитрий Витальевич – док. техн. наук, проф. Гп «УкрНТЦ «Энергосталь», Харьков, e-mail: energostal@energostal.org.ua;

Романченко Павел Владимирович – нач. отдела ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», Харьков, e-mail: Romanchenko@energostal.kharkov.ua.

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МІКРОРІЗАННЯМ З ФОРМУВАННЯМ СПЕЦІАЛЬНОГО МІКРОПРОФІЛЯ ПОВЕРХНІ

Наведено результати досліджень виконаних при розробці обладнання для високочастотної вібраційної обробки деталей мікрорізнанням. Для підвищення точності обладнання запропонована спеціальна методика, яка полягає у визначенні параметрів фігур Ліссажу, що формуються приводами переміщення стола. Наведено результати дослідно-промислової апробації розробленого обладнання. Підтверджена працездатність розробленого обладнання і можливість формування спеціального мікропрофіля.

Ключові слова: обладнання, вібрації, мікрорізнання, п'єзоприводи, мікропрофіль.

Вступ. Високочастотна вібраційна обробка дає можливість одержати поверхню деталі з особливими властивостями, тому розробка обладнання для високочастотної вібраційної обробки є актуальним. Проблема в загальному вигляді полягає в забезпеченні спеціального мікропрофіля обробленої поверхні. Проблема пов'язана із важливими науковими та практичними завданнями розробки пар тертя підвищеної несучої здатності та довговічності.

В останніх дослідженнях і публікаціях наведено ряд конструкцій обладнання для обробки деталей мікрорізнанням [1, 2]. В окремих публікаціях висвітлено робочі процеси мікрорізнання фрезами малого діаметра [3]. Ряд авторів наводять результати досліджень динамічних характеристик приводів мікропереміщень вібраційного обладнання [4]. Питання точності обладнання для мікропереміщень розглянуті в статті [5] та інших.

В літературних джерелах не виявлено результатів досліджень похибок обладнання для вібраційної обробки деталей мікрорізнанням.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься розробка обладнання підвищеної точності із заданими характеристиками, призначеного для формування спеціального мікропрофіля поверхні.

Метою досліджень поставлено розробку обладнання підвищеної точності для високочастотної вібраційної обробки деталей мікрорізнанням. Задачами досліджень поставлена розробка конструкції обладнання, виготовлення та вдосконалення дослідного зразка із забезпеченням його необхідних характеристик і апробація обладнання шляхом формування спеціального мікропрофіля обробленої поверхні.

Виклад основного матеріалу досліджень

Розроблене обладнання для високочастотної вібраційної обробки включає трьох координатний вертикально-фрезерувальний верстат, який укомплектовано двох координатним столом (рис. 1).

При обробці використані консольні (пальцеві) фрези малого діаметра (0,2 – 1,0 мм). Оброблювана деталь встановлюється на двохкоординатному

вібраційному столі, оснащеному спеціальними п'єзоприводами переміщення стола в напрямках x і y . Частота і амплітуда переміщення стола в двох напрямках регулюється спеціальною мехатронною системою керування, а закон переміщення стола корегується по результатам вимірів його положення лазерними вимірювачами.

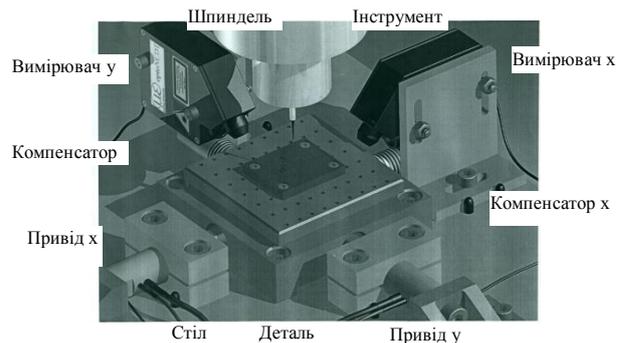


Рис. 1 - Конструктивна схема розробленого обладнання

Полоса робочих частот п'єзоприводів сягає 25 кГц і вище, при амплітудах переміщення стола в двох взаємно перпендикулярних напрямках до 0,03 мм.

Забезпечення вказаних динамічних параметрів рухомого стола здійснюється спеціальною системою пружного підвісу (рис. 2).

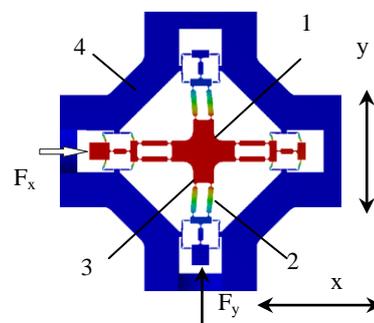


Рис. 2 – Принципова схема паралелограмного механізму пружного підвісу двохкоординатного стола

Пружний підвіс виготовлено у вигляді однієї деталі, яка має центральну частину 1 жорстко зав'язану із столом та тяги 2 із шарнірами 3, які з'єднують центральну частину із корпусом 4.

Пружний підвіс забезпечує незалежне переміщення стола в двох взаємно-перпендикулярних напрямках x і y . Конструкція підвісу дає повну розв'язку приводів переміщення стола. При цьому переміщення стола в напрямку x не впливає на переміщення стола у взаємно-перпендикулярному напрямку y . Незалежність переміщень забезпечена конструктивним виконанням паралелограмного механізму та реалізацією пружних шарнірів.

Шарніри являють собою ділянки тяг 2 із напівкруглими виборками 3 по краям (рис. 3). Шарніри забезпечують вільне переміщення центральної частини відносно нерухомого корпусу 4. Переміщення здійснюється за допомогою штоків 5, які зв'язані із п'єзоприводами.

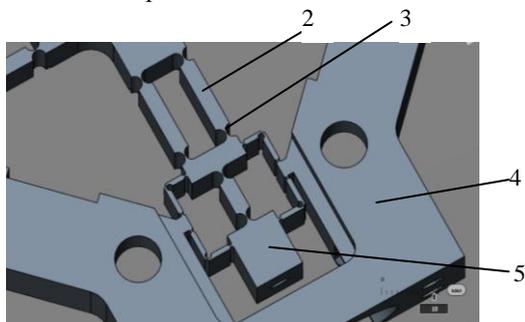


Рис. 3 - Конфігурація паралелограмного механізму стола

П'єзоприводи встановлені у двох взаємно перпендикулярних напрямках на столі (рис. 4).

Приводи через пружні зв'язки забезпечують динамічні зусилля на стіл в двох напрямках x і y . З протилежних приводом сторін стола встановлені пружні компенсатори зусилля у вигляді пружин із спеціальним регулюванням початкових зусиль.

Для забезпечення необхідних динамічних характеристик стола передбачені демпфери коливань стола.

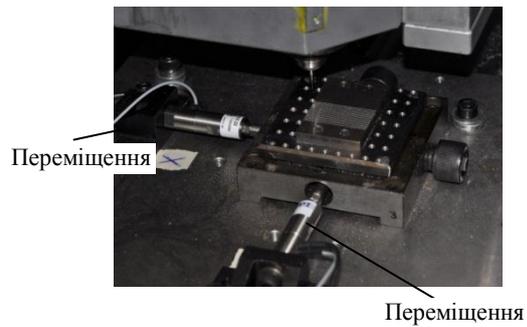


Рис. 4 - Встановлення приводів переміщення двохкоординатного стола

Демпфери коливань мають вигляд циліндрів поміщених у гільзи. При цьому зазори між циліндрами і гільзами заповнені в'язкою рідиною. Демпфери коливань забезпечують необхідний опір переміщеного стола в двох взаємно-перпендикулярних напрямках.

Приводи керуються мехатронною системою, яка включає окремі блоки та комунікації у вигляді прямих і зворотніх зв'язків (рис. 5).

Мехатронна система має набір засобів для реалізації необхідних законів переміщення стола по двох координатах.

В процесі розробки обладнання визначені його динамічні характеристики та проведена корекція системи керування з метою поліпшення параметрів динамічних характеристик. Проведені експериментальні виміри перехідних процесів в приводах без корекції (рис. 6).

По перехідній функції визначені основні параметри динамічної системи. Максимальне перерегулювання в приводі без корекції складає 60%; коливальність 6-8 коливань, а час перехідного процесу 3...4 мс. Такі показники динамічних

характеристик не є прийнятним для процесу мікрорізання. Тому проведена корекція системи керування (рис. 7).



Рис. 4 - Блок схема системи керування приводами переміщення двохкоординатного стола

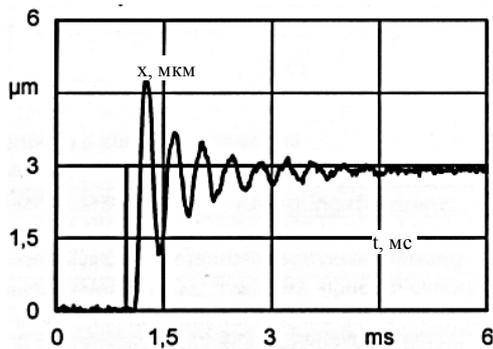


Рис. 6 - Експериментально визначена перехідна функція переміщення стола по одній із координат без корекції системи керування

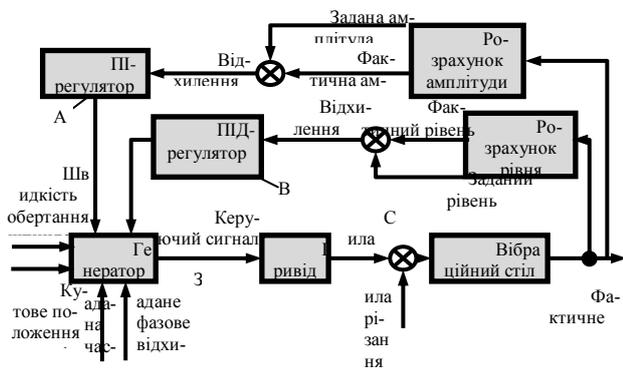


Рис. 7 - Введення корегуючих блоків А і В у мехатронну систему керування приводів переміщення стола

Корекція проведена за допомогою пропорційно інтегруючого блока (PI-регулятор) та пропорційно-інтегро-диференціального блока (PID-регулятор) [6]. Вказані блоки А і В включені в систему зворотнього зв'язку привода. Корекція в системі зворотнього зв'язку є найбільш ефективною і дозволяє суттєвим чином поліпшити динамічні характеристики системи.

Вибрані необхідні параметри корегуючих блоків та забезпечена їх працездатність в складі системи керування [7]. Після корекції проведені виміри перехідних функцій приводів переміщення стола. В результаті корекції вони набули аперіодичного характеру (рис. 8).

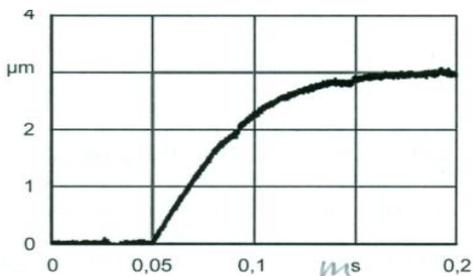


Рис. 8. Експериментально визначений перехідний процес в приводі після корекції

Встановлено, що параметри системи після корекції значно поліпшились. Час перехідного процесу

системи керування з приводами склав 0,12...0,16 мс. Таким чином проведена корекція суттєво підвищила швидкодію системи приводів і ліквідувала схильність системи до підвищеної коливальності.

В процесі розробки вібраційного стола визначено параметри динамічної точності його позиціонування. Це здійснено по спеціальній методиці засобами мехатронної системи керування. Згідно розробленої методики задавались траєкторії переміщення стола у вигляді фігур Ліссажу [8]. Базовою фігурою Ліссажу є еліпс. Він є результатом синусоїдального переміщення стола в двох взаємно перпендикулярних напрямках, але з однаковою (близькою частотою).

Фактично виміряна траєкторія переміщення стола дещо відрізняється від еліпса (рис. 9).

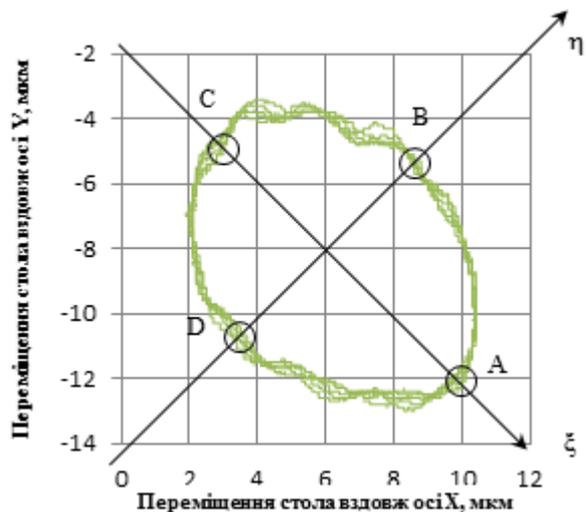


Рис. 9 - Експериментальне визначення динамічних похибок переміщення стола при типових траєкторіях руху (фігури Ліссажу) еліптичного виду

Для фактичних вимірних траєкторій руху стола розглянуті характерні перетини вимірних реалізацій еліптичних фігур Ліссажу в напрямку вісей координат η і ξ з центром в нульовому положенні стола. В якості характерних вибрані перетини в областях А, В, С, D, що відповідають діаметральним ділянкам еліптичної області.

В даних перетинах визначена множина координат точок перетину еліпсів із всіма координат. Вона має вигляд набору точок a_{Ai} з координатами ξ_{Ai} (рис. 10).

Набір точок перетину множини траєкторій з діаметральною площиною еліпса піддано статистичному аналізу. Знайдені математичні середні положення точок перетину в областях А, В, С і D. Вони визначені шляхом розрахунків згідно формул:

$$\xi_{mk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_{ki}, \quad k = A, C,$$

$$\eta_{m\ell} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_{\ell i}, \quad \ell = B, D,$$

де N – число траєкторій еліптичного виду піддане аналізу; ξ_{ki} – координати точки перетину траєкторії із віссю координат ξ , $\eta_{\ell i}$ – координата точки перетину із віссю координат η .

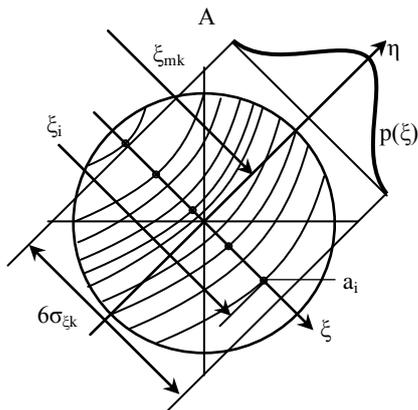


Рис. 10 – Схема статистичного аналізу еліптичних траєкторій в області А, що відповідає діаметральній ділянці еліптичної фігури Ліссажу

Математичні середні траєкторій в чотирьох областях А, В, С, D використані для аналізу розсіяння (дисперсії) значень траєкторій відносно математичних середніх. Оцінки розсіяння траєкторій в перетинах А, В, С і D визначені залежностями:

$$\sigma_{\xi k}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\xi_{ki} - \xi_{mk})^2, \quad k = A, C,$$

$$\sigma_{\eta \ell}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\eta_{\ell i} - \xi_{m\ell})^2, \quad \ell = B, D.$$

Проведена наближена оцінка випадкових змін траєкторій стола в областях А, В, С і D. По вимірним координатам точок побудовані гістограми частотей попадання точки перетину траєкторії із віссю координат у відповідний розряд (рис. 11).

По експериментально визначеним гістограмам зроблено висновок про якісні характеристики законів розподілу координат траєкторій в характерних областях. Закони розподілу є одновершинними близькими до симетричних.

По оцінкам математичних середніх і дисперсій побудовані наближені закони розподілу розташування траєкторій в перетинах.

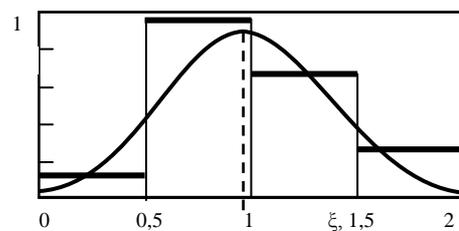
Для цього використано нормальні закони розподілу, в яких щільності ймовірності визначено у вигляді:

$$p_k(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\xi k}} e^{-\frac{(\xi_k - \xi_{mk})^2}{2\sigma_{\xi k}^2}}, \quad k = A, C,$$

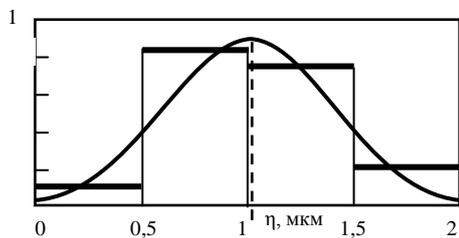
$$p_\ell(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\eta \ell}} e^{-\frac{(\eta_\ell - \eta_{m\ell})^2}{2\sigma_{\eta \ell}^2}}, \quad \ell = B, D,$$

Закони розподілу розраховані по даним залежностям відповідають експериментально визначеним. Відхилення, які спостерігаються, мають місце в області малої ймовірності значень траєкторії і не є суттєвими.

На основі знайдених статистичних характеристик встановлено область розташування фігури Ліссажу. Математичні середні послужили основою для побудови номінальної еліптичної траєкторії. Номінальна траєкторія відповідає еліпсу зміщеному відносно початку координат.



а



б

Рис. 11 - Гістограми відносної частоти точок перетину траєкторії переміщення стола в областях А і В відповідно: а – з віссю ξ , б – з віссю η

Більша a та менша b напівосі еліпса визначено у вигляді:

$$a = \frac{1}{2}(\xi_{mA} + \xi_{mC}), \quad b = \frac{1}{2}(\xi_{mB} + \xi_{mD}).$$

Зміщення центра еліпса відносно початку координат у напрямках ξ та η складають:

$$\xi_C = \xi_{mA} - a, \quad \eta_C = \eta_{mC} - b.$$

Таким чином рівняння еліпса в координатах ξ та η набуває вигляду:

$$\frac{(\xi - \xi_C)^2}{a^2} + \frac{(\eta - \eta_C)^2}{b^2} = 1.$$

Зміщення центра еліпса відносно початку системи координат, як правило, є незначним. Тому можна прийняти $\xi_C \approx 0$, $\eta_C \approx 0$ і визначити рівняння еліпса у вигляді:

$$\xi^2 / a^2 + \eta^2 / b^2 = 1.$$

Одержані параметри визначають фактичний зсув фаз між переміщеннями стола у двох напрямках:

$$\varphi = 2 \arctg b/a.$$

Дане значення використане для уточнення фактичних параметрів приводів. Вимірні відхилення траєкторій від еліпса є мірою оцінки динамічної похибки позиціонування стола. В результаті визначена систематична складова динамічної похибки, яка використана для корекції положення стола в системі ЧПК [9].

Розроблене обладнання застосовано при обробці деталей з метою формування спеціального мікропрофіля поверхні. Обробка ділянок деталі здійснена малорозмірною кінцевою фрезою (рис. 12).

Одержаний мікропрофіль має спеціальний мікрорельєф, який формується відповідним алгоритмом системи ЧПК. Типові різновиди спеціального мікропрофіля реалізовані в процесі обробки включають зигзагоподібні та віяльні поверхні (рис. 13).

В результаті обробки підтверджена можливість формування спеціального мікропрофіля, що є пози-

тивним результатом апробації розробленого обладнання.



Рис. 12 - Заготовка з ділянками обробки мікрофрезеруванням та фреза діаметром 0,5 мм, яка використана в процесі обробки: а – заготовка, б – інструмент

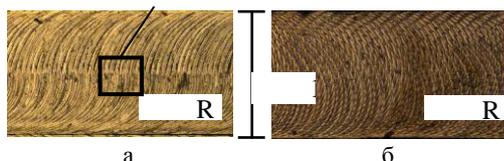


Рис. 13 - Типові спеціальні мікропрофілі поверхні сформовано шляхом обробки деталей на розробленому обладнанні: а – мікропрофіль із зигзагоподібними виступами і впадинами; б – система виступів віяльного виду сформована на обробленій поверхні

Висновки

1. Підтвержена можливість створення обладнання для високочастотної вібраційної обробки деталей мікрорізанням на частотах до 25 кГц з амплітудами вібрацій до 0,03 мм. Це досягається використанням п'єзоприводів стола, який встановлено на пружному підвісі паралелограмного виду.

2. Для надійної роботи системи керування необхідна корекція системи введення ПІ-регулятора та ПІД-регулятора в систему зворотнього зв'язку. При цьому швидкодія приводів підвищується до 0,12...0,16 мс і виключається коливальність перехідних процесів приводів.

3. Аналіз точності розробленого обладнання доцільно проводити на основі експериментальних вимірів переміщення стола відповідно реалізації фігури Ліссажу еліптичного типу. При вимірах встановлюється середнє значення вісей еліпса та відхилення від середнього значення у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Встановлено, що закон розсіяння траєкторії близький до нормального, а характеристика розсіяння траєкторій мало змінюються по периметру еліпса.

4. Результати обробки деталей на розробленому обладнанні підтвердили надійність його роботи і високу точність. Обладнання дає можливість формувати спеціальний мікропрофіль поверхні. Сформульовано мікрорельєф поверхні у вигляді петлеподібних та зигзагоподібних виступів і впадин та мікропрофіль із віяльною схемою розташування виступів.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується розробити метод аналізу характеристик одержаного мікропрофіля та дати рекомендації по застосуванні деталей із спеціальним мікропрофілем в парах рідинного тертя.

Список літератури: 1. Xinhua Long Active vibration control for peripheral milling processes [Text] / Xinhua Long, Hao Jiang, Guahg Meng // Journal of Materials Processing Technology 213 (2013). - pp. 660-670. 2. Wadikhaye, S.P. Design of a compact serial-kinematic scanner for high-speed atomic force microscopy an analytical approach [Text] / Wadikhaye, S.P., Yong, Y.K, Moheimani, S.O.R. // Published in Micro & Nano Letters, 2012. - Vol.7. - pp. 309-313. 3. Gwo-Liang Chern, Yuan-Chin Chang Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling [Text] / Gwo-Liang Chern, Yuan-Chin Chang // International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006). - pp. 659-666. 4. Elfizy, A.T. Design and control of a dual-stage feed drive [Text] / Elfizy, A.T., Bone, G.M., Elbestawi, M.A. // International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005). - pp. 153-165. 5. Shorya Awtar Design of a large range XY nanopositioning system [Text] / Shorya Awtar, Gaurav Parmar // Proceeding of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2010, August 15-18, 2010, Montreal, Quebec, Canada. - pp. 170-175. 6. Бесекевський, В.А. Теорія систем автоматичного регулювання [Текст] / Бесекевський, В.А., Попов, Е.П. // М.: Наука, 1972. - 768 с. 7. Черкашенко, М.В. Метод логічного проектування дискретних систем управління машин-автоматів з пневмо- или гидроприводом. Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления [Текст] / Черкашенко, М.В. // М.: Машиностроение, 1981. Вып. 8. - С. 181-189. 8. Мэнли, Р. Анализ и обработка записей колебаний / Мэнли, Р. // - М.: Машиностроение, 1972. - 368 с. 9. Кравцов, Н.В. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес [Текст] / Кравцов, Н.В., Тимофеев, Ю.В., Клочко, А.А. [и др.]; Науч. ред. Пермяков, А.А. // ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с.

Bibliography (transliterated): 1. Xinhua Long Active vibration control for peripheral milling processes [Text] Xinhua Long, Hao Jiang, Guahg Meng Journal of Materials Processing Technology 213 (2013). - pp. 660-670. Print 2. Wadikhaye, S.P. Design of a compact serial-kinematic scanner for high-speed atomic force microscopy an analytical approach [Text]. Wadikhaye, S.P., Yong, Y.K, Moheimani, S.O.R. / Published in Micro & Nano Letters, 2012. - Vol.7. - pp. 309-313. Print 3. Gwo-Liang Chern, Yuan-Chin Chang Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling [Text]. Gwo-Liang Chern, Yuan-Chin Chang. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006). - pp. 659-666. Print 4. Elfizy, A.T. Design and control of a dual-stage feed drive [Text] Elfizy, A.T., Bone, G.M., Elbestawi, M.A. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005). - pp. 153-165. Print 5. Shorya Awtar Design of a large range XY nanopositioning system [Text] Shorya Awtar, Gaurav Parmar. Proceeding of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2010, August 15-18, 2010, Montreal, Quebec, Canada. - pp. 170-175. Print 6. Besekerskiy, V.A., Popov, E.P. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija Moscow: Nauka, 1972. 768 p. Print 7. Cherkashenko, M.V. Metod logicheskogo proektirovanija diskretnykh sistem upravlenija mashin-avtomatov s pnevmo- ili gidroprivodom. Pnevmatika i gidravlika. Privody i sistemy upravlenija. Moscow: Mashinostroenie, 1981. pp.181-189. Print 8. Mjenli, R. Analiz i obrabotka zapisej kolebanij Moscow: Mashinostroenie, 1972. 368 p. Print 9. Kravcov, N.V., Timofeev, Ju.V., Klochko, A.A. [i dr.]; Nauch. red. Permjakov, A.A. Tehnologicheskie osobennosti obrabotki krupnomodul'nyh zakalennyh zubchatyh koles. VolGTU – Tol'jatti: ZAO «ONIKS», 2012. 254 p. Print.

Поступила (received) 21.02.2015

Струтинський Василь Борисович – док. техн. наук, проф., зав. кафедри конструювання верстатів та машин, НТУУ «КПІ», Київ; тел.: (044)- 454-94-61, e-mail: kvm_mmi@mail.ru;

Перфілов Іван Васильович – аспірант НТУУ «КПІ», Київ; тел.: (044)- 454-94-61.

Е.В. Мироненко, В.Ф. Шаповалов, А.А. Клочко, С.Ю. Палашек, Е.В. Остапович

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА ЗУБООБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ

Разработаны конструкторско-технологические способы с целью повышения производительности и качества зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов на основании анализа геометрии зацепления и профиля зубьев с учетом установления зависимости величины отклонения эвольвентной кривой профиля зуба. Отклонение от касательной к эвольвентной кривой профиля зуба, проведенной в точке, расположенной на делительной окружности при модуле свыше 25 мм и числа зубьев $Z_k \geq 130$ укладываются в допуски на изготовление колес с эвольвентным зацеплением по 9-й степени точности. В рассматриваемых случаях эвольвентный профиль зуба может быть заменен на прямолинейный, что позволяет значительно повысить эффективность технологического процесса зубофрезерования. Аналитически обосновано, что с прямолинейным профилем зубьев на колесе при $m=25$ мм и выше и числе зубьев $Z_k = 130-200$ необходимо вводить в зацепление шестерни, имеющие сопряженный профиль зубьев.

Ключевые слова: обработка отверстий, комбинированный осевой инструмент, технологический процесс, концентрация операций

Введение. При нарезании зубьев на колесах, диаметр которых превышает $\varnothing 5000$ мм, а модуль зацепления $m \geq 25$ мм, производительность операции зубонарезания очень низкая из-за нежесткой системы СПИД.

Зубчатые передачи большого диаметра с крупным модулем используются в механизмах поворота уникальных машин, работающих в горнодобывающей, строительной, и других отраслях промышленности. Примером могут служить роторные комплексы, экскаваторы и драглаины с большой ёмкостью ковша (4-100 цементные угле и рудоразмольные мельницы большой производительности и др. как правило, в этих машинах применяются цилиндрические тихоходные ($V_{\text{окр}}=1$ м\мин) крупномодульные ($m=20+60$ мм) зубчатые колеса ($Z_x=120+350$), диаметр которых достигает 5-19 м. Трудоемкость зубофрезерования подобных колес только на 5 заводах - ПАО "НКМЗ" ПАО "УЗТМ" ПАО «Волгоцемтяжмаш», ПАО "СЗТМ" г. Сызрань и ПАО «Сибтяжмаш» - составляет более 100 тыс. нормо-часов. Учитывая большую потребность в таких зубчатых колесах, актуальной задачей является изыскание путей повышения производительности и качества выполнения операций зубообработки.

Анализ последних исследований и литературы. Известные в отечественной и зарубежной литературе методы черновой обработки зубьев на крупногабаритных колесах сводятся к тому, чтобы максимально сократить время на удаление металла из впадин зубьев. Достигается это различными способами, например: путем фрезерования впадины пальцевой

фрезой; дисковыми профильными и черновыми фрезами; сверлением отверстий у основания зуба и дальнейшей обработкой впадины пальцевой фрезой; дисковыми пилами или строганием на долбежном или строгальном станке; отливкой черного зуба на венцах и др. Наиболее производительным способом зубообработки крупногабаритных венцов является метод трепанации зубьев, когда черновое нарезание осуществляется двумя дисковыми прорезными фрезами, при этом часть металла впадины вырезается и выпадает в виде отдельных кусков, а чистовая обработка зубьев осуществляется одновременно двумя торцовыми фрезами. Оба вида инструментов могут быть оснащены современными твердосплавными пластинками или режущими элементами из сверхтвердых материалов [1, 2]. Для осуществления такой технологии зубообработки тихоходные зубчатые венцы 9-11 степеней точности по ГОСТ 1643-81 с числом зубьев свыше 130 целесообразно изготавливать с прямолинейным профилем зубьев. При этом отклонения их профиля от эвольвентного не превышают допуска на профиль зубьев согласно ГОСТ 1643-81

Конструкторско-технологические способы. Сопрягаемые с крупногабаритными зубчатыми колесами шестерни могут иметь как эвольвентный профиль зубьев, так и сопряженный, рассчитываемый по известным методикам. Для черновой и чистовой обработки зубьев спаренными инструментами необходимо использовать специальный двухшпиндельный фрезерный суппорт, с углом наклона шпинделей $\alpha = 12^\circ$ (рис. 1) и схема установки дисковых прорезных и торцевых чистовых фрез (рис. 2).

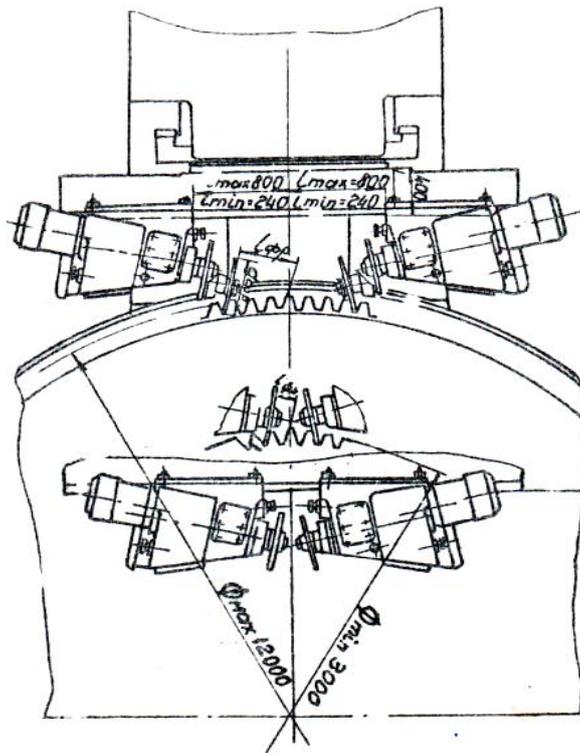


Рис.1 – Схема двухшпиндельного суппорта к вертикально-зубофрезерным станкам мод. 5В345П, 5В348, 5В348/12,5, КУ-279

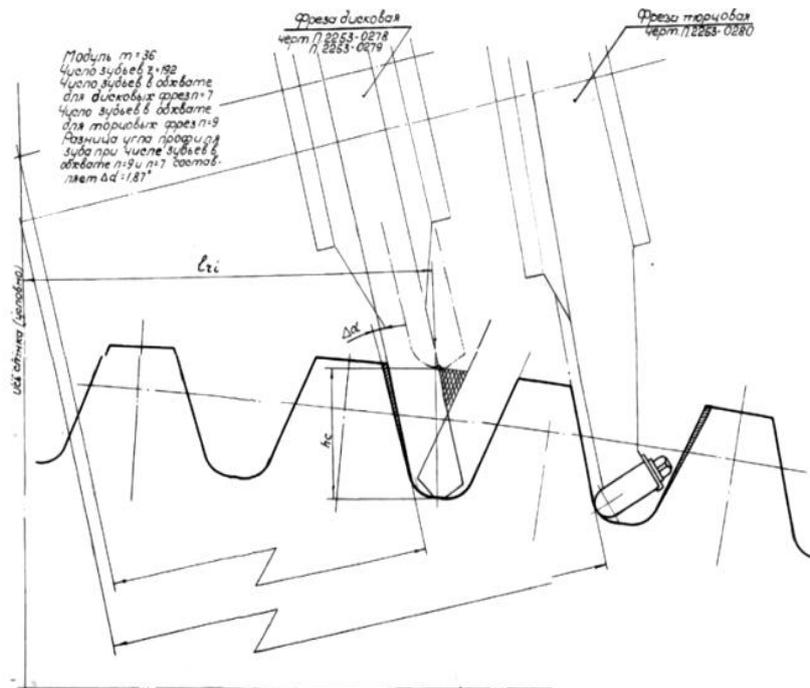


Рис. 2 – Схема установки дисковых прорезных и торцевых чистовых фрез

При черновой и чистовой обработке зубьев по рассматриваемой технологии угол профиля зубьев венца (рис. 3) определяется по формуле

$$\alpha_0 = \alpha_k + \frac{180^\circ}{\pi} (Z_{nIII} - 1) - \Delta\psi, \quad (1)$$

где α_k - угол наклона шпиндельных осей фрезерных головок станка в горизонтальной плоскости.

Z_{nIII} - число охватываемых зубьев венца при чи-

стой обработке торцевыми фрезами.

Рекомендуется назначать такое значение Z_{nIII} , при котором профильный угол зубьев имеет минимальное отличие от 20° .

$\Delta\psi$ - половина углового наименьшего обязательного утонения зуба

$$\Delta\psi = \psi_1 - \psi_2, \quad (2)$$

где

$$\sin \psi_1 = \frac{s_2}{2R_2} = \frac{\pi m}{4v_2} \quad (3)$$

$$\sin \psi_2 = \frac{s_2 - \delta_2 S}{2r_2} \quad (4)$$

Угол профиля впадины между зубьями определяется по формуле

$$\eta_0 = \alpha_k + \frac{180^\circ}{Z} Z_{nIII} + \Delta\psi \quad (5)$$

Угол зацепления передачи, зубчатый венец которой имеет зубья с прямолинейным профилем, определяется по зависимости

$$\alpha_w = \alpha_0 + \psi_2 \quad (6)$$

Рекомендуемое оптимальное число охватываемых инструментами зубьев венца Z_{nIII}
Число зубьев в охвате Z_{nIII} приведены в табл. 1.

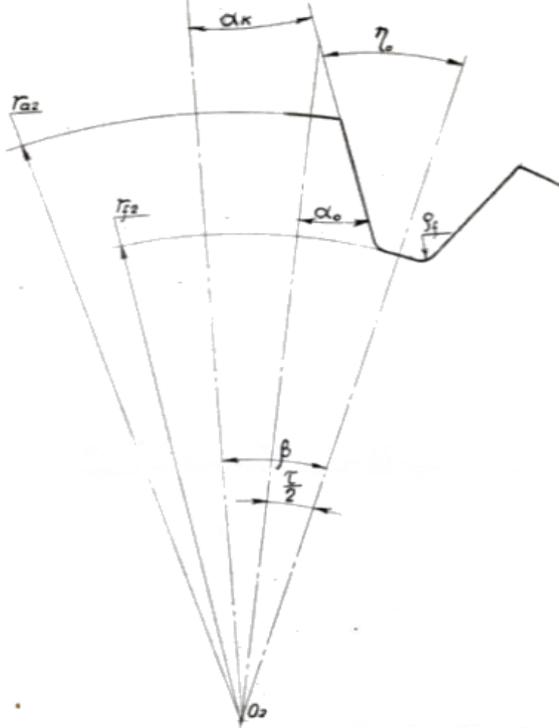


Рис. 3 – Угловые величины зубьев с прямолинейным профилем

Таблица 1 – Рекомендуемое оптимальное число охватываемых инструментами зубьев венца Z_{nIII}

Число зубьев колеса	46	68	91	113	136	158	181	203	226	242
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	67	90	112	135	157	180	225	225	242	264
Число охватываемых зубьев Z_{nIII}	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Согласно ГОСТ 1643-56 отклонения теоретического профиля зуба допускаются на величину. Допуск в микронах на профиль эвольвентного зуба прямозубого колеса 7-й степени точности рассчитывается по формуле:

$$\delta_f = 0,25d + 1,25m + 15, \quad (7)$$

где d – делительный диаметр. m – модуль зубьев.

Для колес 9-й степени точности вводится поправочный коэффициент $e=1.58^2$

Выразим диаметр через модуль и число зубьев колеса, тогда формула для подсчета δ_f

$$\delta_f = [(0.25Z_k + 1,25)m + 15] * 1.58^2 \quad (8)$$

Как видно, величина допуска δ_f увеличивается с увеличением модуля и числа зубьев колеса, тогда как отклонение прямолинейного профиля от эвольвентного для тех же модулей и чисел зубьев уменьшается с увеличением числа зубьев (рис. 4). Пересечение кривых, характеризующих допустимые и фактические отклонения профиля зубьев одного и того же модуля, происходит при условии, когда $\delta_f = \Delta_\epsilon = \Delta_i$ (точки 1, 2 и 3). Следовательно, для зубчатых колес вправо от кривой 1-8 возможно назначать прямолинейный профиль зубьев. При этом теоретический профиль прямолинейного зуба укладывается в поле допуска на неточность изготовления профиля зубьев по ГОСТ 1643-56.

Учитывая неизбежные отклонения прямолинейного профиля, получаемого при зубофрезеровании, от теоретического, а также отклонения профиля сопряженной шестерни, ужесточим полученные допускаемые значения на 40% (см. пунктирную кривую 1'-1'). Зубчатые колеса, соответствующие области, расположенной вправо от пунктирной кривой, рекомендуются изготавливать с прямолинейным профилем, а шестерни, сопряженные с ними, с эвольвентным профилем зубьев того же угла зацепления. Таким образом, зубчатые колеса с числом зубьев 200 и более можно изготавливать с прямолинейным профилем и сопрягаемую с ними шестерню с эвольвентным профилем того же угла зацепления.

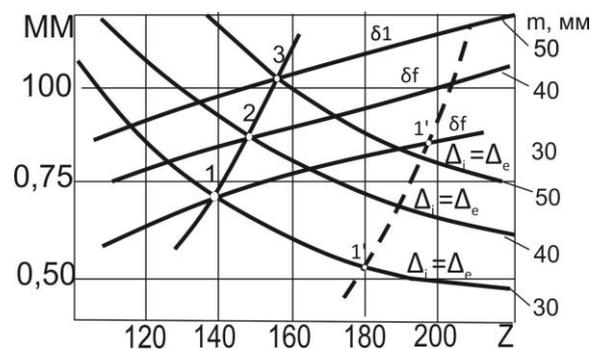


Рис. 4 – График применимости прямолинейного профиля зубьев.

Расчеты показывают, что для скорректированных зубчатых колес отклонения получаются меньшими по сравнению с некорректированными. Геометрия профиля зубьев шестерен при сопряжении их с прямолинейным профилем зуба зависит от числа зубьев колеса. Как показали исследования, колеса с числом зубьев $Z_k \geq 200$ могут работать в паре с шестернями

эвольвентного профиля. Если колеса с числом зубьев $Z_k \geq 200$ и прямолинейным профилем зубьев нарезаются методом трепанации с углом зацепления отличным от 20° , то профиль зубьев шестерен выполняется эвольвентным, и расчет его производится с учетом угла зацепления колеса. Профиль зубьев, шестерен, сопрягаемых с колесами, имеющими число зубьев в пределах от $Z_k = 130$ до $Z_k = 200$, должен быть сопряженным с прямолинейным профилем зубьев колеса.

На рис. 5 показана конструкция сборных дисковых прорезных фрез, оснащенных твердосплавными неперетачиваемыми пластинками круглой формы.

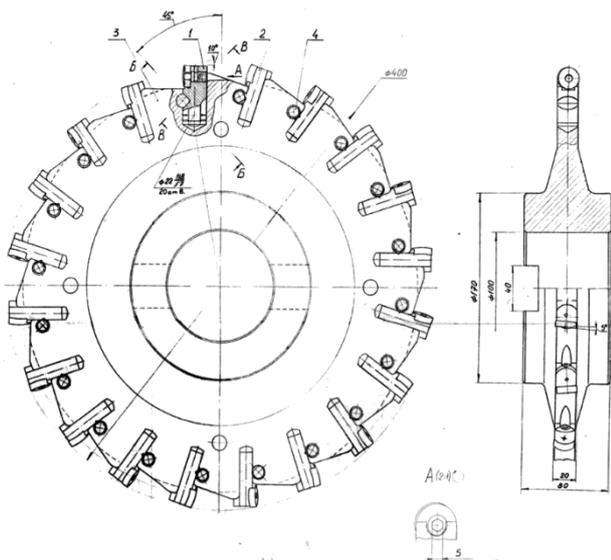


Рис. 5 – Дисковая прорезная фреза

Этими фрезами производится одновременно черновая обработка боковой поверхности зубьев и чистовая дна впадины зубьев (рис.1). При этом минутная подача инструментов может составлять 300-400 мм/мин. Рекомендуемые конструктивные параметры фрез приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Конструктивные параметры дисковых фрез

Размер фрезы, мм		Модуль, мм	Число нарезаемых зубьев Z_k
Диаметр	Ширина		
400	28	25-28	X)
		30	20-210 90-210
450	35	30	30-90
		32-36	30-210
		40	150-210
500	38	40	30-150
		42-45	30-210
		50	170-210
550	40	50	30-170
		55	30-210
		60	95-210

X) - в случае чернового нарезания шестерни

На рис. 6 показана сборная конструкция чистовых торцевых фрез, оснащенных твердосплавными неперетачиваемыми пластинками круглой формы.

Эти фрезы отличаются от торцевых стандартных фрез лишь конструктивными размерами, которые должны быть согласованы с размерами впадины зуба.

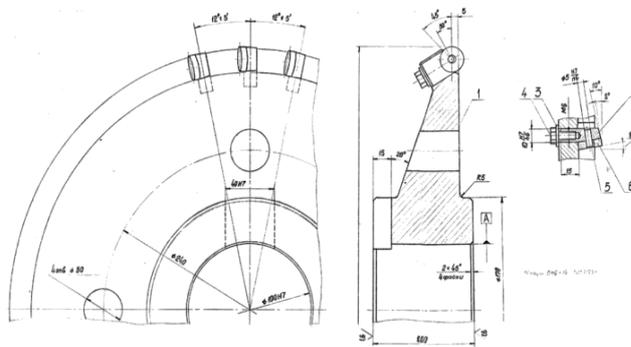


Рис. 6 – Торцевая фреза для обработки зубьев

Установка их на зубофрезерном станке производится так же, как и дисковых фрез (рис. 1). Рекомендуемые конструктивные элементы торцевых фрез для обработки прямолинейных профилей зубьев приведены в табл. 3.

Таблица 3 -Параметры торцевых фрез

Размеры фрезы		Модуль, мм	Число нарезаемых зубьев Z_k
Диаметр	Ширина		
370	43	26-36	190-229
420	43	36-42	137-248
450	43	42-55	130-260
520	43	55 и выше	130-253

Шестерни с сопряженным профилем зубьев могут быть нарезаны специальными торцевыми фрезами. Форма фасонных режущих кромок таких фрез определяется при профилировании и зависит от формы профиля детали и геометрических параметров режущей части фрез. Зубья шестерен с сопряженным профилем можно также фрезеровать методом единичного деления пальцевыми и дисковыми фрезами (рис. 7) соответствующего профиля. Они могут быть нарезаны и методом обкатки специальными червячными фрезами. С целью промышленного внедрения новой технологии зубообработки методом трепанации зубьев по техническому заданию НПО «НИИПТМАШ» (г. Краматорск) были разработаны ЗАО «КЗТС» (г. Коломна) технические проекты специальных двухшпиндельных скоростных суппортов к тяжелым зубофрезерным станкам мод. 5В345П, 5В348П, 5В348/П, 5В348/12,5(рис.1)/

По заказу ЗАО «НКМЗ» и при участии НПО «НИИПТМАШ», ЗАО «КЗТС» (г. Коломна) разработал технический проект и изготовил уникальный двухшпиндельный вертикально-зубофрезерный станок мод. КУ-279 с диаметром рабочего стола $\varnothing 8000$ мм. Практика зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов в условиях ЗАО «НКМЗ» с использованием станка мод. КУ-279 показала возможность повышения производительности зубонарезания в 2-3 раза.

На основе теоретических исследований и практики зубообработки разработан отраслевой стандарт

на допуск зубчатых передач с цилиндрическими колесами диаметром свыше 5 м [2].

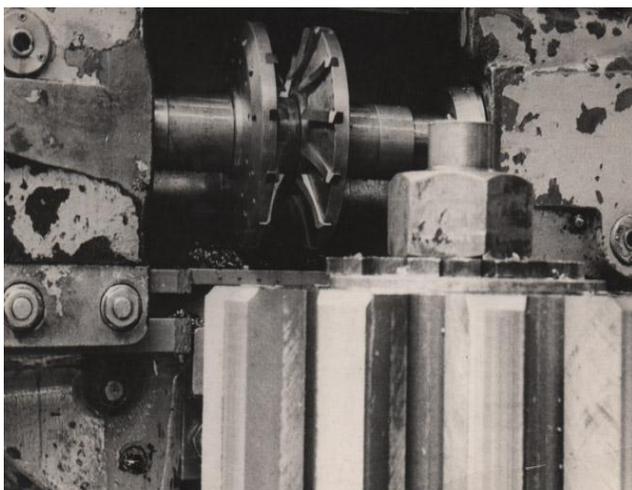


Рис. 7 – Нарезание шестерни $m=36$ мм $Z=18$ с сопряженным профилем зубьев двумя спаренными дисковыми фрезами

Выводы

Разработаны конструкторско-технологические способы с целью повышения производительности и качества зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов на основании анализа геометрии зацепления и профиля зубьев с учетом установления зависимости величины отклонения эвольвентной кривой профиля зуба. Отклонение от касательной к эвольвентной кривой профиля зуба, проведенной в точке, расположенной на делительной окружности при модуле свыше 25 мм и числа зубьев $Z_k \geq 130$ укладываются в допуски на изготовление колес с эвольвентным зацеплением по 9-й степени точности.

Анализ геометрии зацепления и профиля зубьев крупногабаритных зубчатых венцов показал, что величины отклонения эвольвентной кривой профиля зуба от касательной к нему прямой, проведенной в точке, расположенной на делительной окружности при модуле свыше 25 мм и числа зубьев $Z_k=130$ и более, укладываются в допуски на изготовление колес с эвольвентным зацеплением по 9-й степени точности. В рассматриваемых случаях эвольвентный профиль зуба может быть заменен на прямолинейный, что позволяет значительно повысить эффективность технологического процесса зубофрезерования. Аналитиче-

ски обосновано, что с прямолинейным профилем зубьев на колесе при $m=25$ мм и выше и числе зубьев $Z_k = 130 \dots 200$ необходимо вводить в зацепление шестерни, имеющие сопряженный профиль зубьев, а при $Z_k \geq 200$ сопрягаемые шестерни можно изготавливать с обычным эвольвентным профилем зубьев

Применение прямолинейного профиля зубьев на колесе позволяют использовать принципиально новую технологию зубонарезания - способ зубонарезания методом трепанации, при котором черновое фрезерование зубьев производится дисковыми прорезными фрезами, а чистовая обработка по профилю зубьев высокоскоростными торцевыми фрезами, обеспечивающими получение шероховатости рабочей поверхности зубьев в пределах $\sqrt{7} - \sqrt{8}$. Модернизация зубонарезных станков с применением новой технологии зубонарезания позволяет повысить производительность зубообработки до 200%, при этом затраты на модернизацию станка окупятся за 2-3 года при нормальной 3-сменной его нагрузке.

Список литературы: 1. Крупномодульные закаленные колеса. Новые технологические направления зубообработки. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, В. Ф. Шаповалов, А. А. Клочко [и др.] // Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2009. – No 4. – С. 18–19. 2. Специальные технологии зубообработки крупномодульных закаленных колес : монография / Ю. В. Тимофеев, В. Ф. Шаповалов, А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2011. – 128 с. ISBN 978-966-379-524-9. 3. Технология обработки крупномодульных зубчатых колес однокорпусными фрезами двустороннего резания с чередующимися коническими зубчатыми рейками / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – No 49. – С. 111–116.

Bibliography (transliterated): 1. Mironenko E. V., Shapovalov V. F., Klochko A. A. [and others]. *Coarse-grained tempered wheels. New technology trends gears. Metalworking. Equipment and tools for professionals. International information technology magazine.* - Kharkov, 2009. - No. 4. - pp 18-19. Print. 2. Timofeev Y. V., Shapovalov V. F., Klochko A. A. [and others]. *Special technologists gears hardened coarse-grained wheels : monograph.* - Kramatorsk : DSMA, 2011. – 128p. ISBN 978-966-379-524-9. Print. 3. Timofeev Y. V., Mironenko E. V., Klochko A. A., Shapovalov V. F. *Processing technology-pitch gears single-hull double-sided cutters cutting with alternating conical toothed racks.* Bulletin of National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"] Sciences. D. special issue: engineering Technologies. - Kharkov : NTU KhPI, 2010. - No. 49. pp 111-116. Print.

Поступила (received) 03.03.2015

Мироненко Евгений Васильевич – док. техн. наук, проф. ДГМА, Краматорск, тел.: (0626) 41-68-58;

Шаповалов Виктор Федорович – канд. техн. наук, с.н.с. ОАО «НИИПТМаш», Краматорск, тел.: +380 62647-09-00;

Клочко Александр Александрович – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25.

Палашек Станислав Юрьевич – аспирант, ДГМА, Краматорск, тел.: (099)-056-60-36, e-mail: Bistara@gmail.com;

Остапович Евгений Васильевич – магистр Ивано-Франковского НТУ нефти и газа, тел.: +380 (3422) 4-21-39.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГРАФІЧНИХ МОДЕЛЕЙ БІЧНИХ ПРОФІЛІВ ТРИКУТНОЇ РІЗЬБИ: ЗАДАНОГО СТАНДАРТОМ І ОТРИМАНОГО ЗА ДОПОМОГОЮ РІЗЦЯ З НЕНУЛЬОВИМ ЗНАЧЕННЯМ ПЕРЕДНЬОГО КУТА

Запропонована програмна реалізація дослідження впливу величини переднього кута різьбового різця на точність відтворення заданого профілю різьби. У алгоритмі прикладної програми використані розроблені нами раніше аналітичні залежності, щодо гіперболічної корекції різальної кромки різьбового різця випрямленої на основі лінійної інтерполяції. Алгоритм побудований з використанням розробленої нами алгоритмічної залежності осевого профілю конволютного гвинта від величини його діаметра, кута нахилу його профілю і величини переднього кута різця. Отримані результати показали значне відхилення профілю отриманої різьби з допомогою різця з невідкоректованим профілем різальної кромки і близький до заданого стандарту профіль різьби, яка отримується різцем, різальна кромка якої виконана за запропонованим нами алгоритмом.

Ключові слова: різьбовий різець, передній кут, конволютний гвинт, косий закритий гелікоїд, гіперболічний профіль, трансцендентна функція, алгебраїчна функція першого порядку, графічна модель, бічний профіль різьби.

Вступ. Технологія виготовлення різьбових поверхонь передбачає використання як одно і багато ниткових токарних різців, так і більш високопродуктивних інструментів – різьбових гребінок чи різцевих різьбових головок. Подавна більшість запропонованих виробниками твердосплавних різьбових пластинок для них, виконані в такій формі, щоб забезпечувати задану точність відтворення різьби, роблячи їх передні поверхні з нульовим кутом нахилу. Це обмежує можливості застосування різців як щодо продуктивності процесу, так і щодо шорсткості отриманої з їх допомогою різьбової поверхні.

У відомих працях [1], [2] розглядають можливість застосування ненульового значення переднього кута з відкоректованим профілем різальної кромки. Є пропозиції застосувати гіперболічний профіль різальної кромки [3], або профіль виконаний на основі прямолінійної інтерполяції гіперболічної кривої [4]. Тим не менше, поки що вказані пропозиції не набули широкого використання у виробників інструменту, оскільки у них не повною мірою проаналізовані можливі результати, отримані від застосування таких різців. Тобто не існує достатньо переконливих досліджень, які показували б, хоч би на рівні моделей величину відхилень профілю різьби отриманої за допомогою різців з ненульовим значенням переднього кута від заданого стандарту профілю різьби.

Метою даної роботи є здійснення порівняльного аналізу графічних моделей бічного профілю стандартної трикутної різьби і різьби, яка отримана різцями із ненульовим значенням кута нахилу передньої поверхні.

Аналіз останніх досліджень. Відомі алгоритми корекції різальної кромки різьбового різця зводяться

до побудови асиметричного її профілю. Осьові зміщення точок профілю різальної кромки, що власне і є причиною такої асиметричності, пов'язані із повздовжнім рухом різця, який власне є подачею на оберт. В ряді робіт величини цих осьових зміщень є досліджені на предмет їх залежності від кута нахилу передньої поверхні різця [1], [2], а також отримані програмно реалізовані дослідження даних залежностей [5]. У той сам час зазначені праці не описують отриманий профіль різьби ані аналітично, ані графічно.

Графічні залежності профілю різальної кромки різця від величини кута нахилу передньої поверхні отримані у роботах [3], [4]. У них запропоновано виконувати гіперболічний профіль [3], або прямолінійний профіль, виконаний на основі прямолінійної інтерполяції гіперболічної кривої [4]. Стосовно ж аналізу профілю отриманої з допомогою таких різців різьбової поверхні у вказаних першоджерелах не йдеться.

Моделювання процесу різьбонарізання і геометричний аналіз профілю отриманої різьби є предметом дослідження у праці [6]. У ній досліджено вплив зміщення точок профілю різальної кромки, що виникають внаслідок подачі на оберт, на точність виконання різьби. В тім і у цій роботі залишився поза дослідженням розгляд різальної кромки як твірної гвинтової поверхні. Адже відомо, що різьбова поверхня це власне гвинтова поверхня і якщо різьба має трикутний, або трапецеїдальний профіль то бічна поверхня такого гвинта є закритим косим гелікоїдом. Якщо площина передньої поверхні різьбового різця містить вісь гвинта, то його різальні кромки як твірні забезпечують саме таку гвинтову поверхню. Якщо кут нахилу передньої поверхні не дорівнює нулю, а значить площина передньої поверхні не проходить через вісь

гвинта, то різальна кромка як твірна створює відкритий конволютний гелікоїд. Отже ці два різних гелікоїди мають відношення до однієї і тієї ж різбової поверхні. Один з них по суті регламентується стандартом на трикутну різьбу, а інший є результатом формування різьби різцем з ненульовим значенням переднього кута.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день не проведений порівняльний аналіз розглянутих вище гелікоїдних поверхонь, одна із яких є функцією, що залежить від величини переднього кута, а друга відповідає стандарту різьби [9]. Можливо, що саме із-за цієї інформаційної прогалини, більш широке застосування різбових різців з похилою передньою поверхнею залишилося поза увагою виробників різальних інструментів [7]. Не регламентується величина переднього кута різбових різців і у діючих державних та міждержавних стандартах [8], що свідчить про певну упередженість офіційної науки, щодо можливостей отримання точного профілю різьби з допомогою таких інструментів.

Отримання заданого профілю трикутної різьби. Бічний профіль трикутної різьби, наприклад за стандартом [9] є прямолінійним відрізком спряженим з заданими радіусними профілями r_1 , r_2 . На рисунку 1 показано відрізок AB , що є вихідним профілем різьби і включає у себе прямолінійну частину дійсного профілю трикутної різьби. Жирною лінією показаний різбовий різець у плані. Якщо різець виконаний, так що його передня поверхня є площиною, яка проходить через вісь різьби, тобто його передній кут дорівнює нулю, то прямолінійна частина його різальної кромки повинна співпадати з бічним профілем різьби.

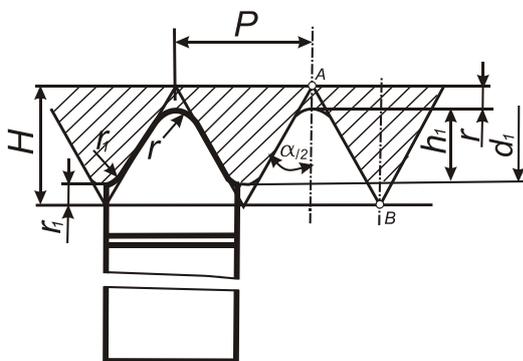


Рис. 1 – Схема профілю трикутної різьби, згідно із стандартом ГОСТ 632–80.

Згідно зі стандартом [9] параметри вказані граничні відхилення розмірів трикутної різьби таблиці 1.

Утворена однією прямолінійною частиною різальної кромки поверхня є закритим косим гелікоїдом, осьовий переріз якого і співпадає з бічним профілем різьби.

Порівняння графічних моделей дійсного профілю різьби отриманої різцем із ненульовим значенням переднього кута і профілю різьби, заданої стандартом. У випадку, коли різець виконаний із ненульовим значенням переднього кута, то твірна AB ,

яка не перетинатиме вісь гвинта забезпечить виконання конволютного відкритого косоного гелікоїда, що проілюстровано на рисунку 2.

Таблиця 1 – Параметри і граничні відхилення від номінальних розмірів трикутної різьби за стандартом ГОСТ 632–80

Параметр різьби	норма
Крок різьби P	3.175 мм
Висота вихідного профілю H	2,750 мм
Висота профілю h_1	1,810 $^{+0,05}_{-0,1}$ мм
Кут нахилу сторони профілю $\alpha/2$	$30^\circ \pm 1^\circ 15'$

Для порівняння профілю означеного відкритого гелікоїда із профілем закритим пропонуємо порівняти графічні моделі їхніх осьових перерізів.

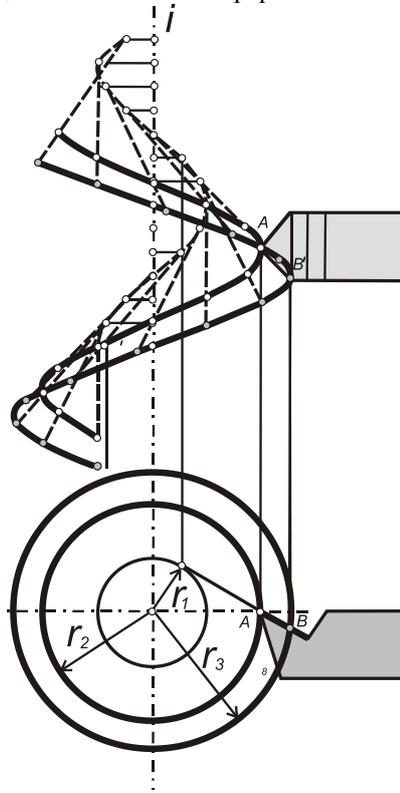


Рис. 2 – Схема отримання конволютної поверхні при застосуванні різця із ненульовим значенням переднього кута

Визначатимемо осьовий переріз однієї бічної поверхні. Для вказаної за стандартом [9] різьби графічна модель профілю відповідає лінійному рівнянню:

$$z(x) = tg\left(\frac{\alpha}{2}\right)x, \quad (1)$$

де z – вісь, що сумісна із віссю гвинтової поверхні різьби, x – вісь проведена перпендикулярно до осі гвинтової поверхні, $\frac{\alpha}{2}$ – кут нахилу сторони профілю, (табл. 1).

Користуючись методикою [10], можна отримати таку формулу профіля конволітного гелікоїда :

$$z(x) = tg\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)x \frac{\sin \tau}{\sin \gamma} - \frac{P}{2\pi} \tau, \quad (2)$$

де τ – одна із криволінійних координат різальної кромки, що визначається за формулою

$$\tau = \gamma - \arcsin\left(\frac{r_2 \sin \gamma}{x}\right);$$

P – крок заданої різьби;

γ – передній кут різця.

α_1 – кут між правою та лівою різальними кромками різьбового різця у площині його передньої поверхні. Згідно із [7, стор.4]

$$\frac{\alpha_1}{2} = \arctg\left(\frac{P + \Delta_{\max} - \Delta_{\min}}{2H}\right), \quad (3)$$

Де H – висота вихідного профілю різьби згідно з [3, стор.52];

$$\Delta_{\max} = \frac{r_2^2 \sin^2 \gamma}{1 + \cos \gamma};$$

$$\Delta_{\min} = \frac{r_2^2 \sin^2 \gamma}{r_3 + \sqrt{r_3^2 - (r_2 \sin \gamma)^2}};$$

де r_2 і r_3 відповідно внутрішній і зовнішній радіуси різьби.

Отримані результати. Для порівняння отриманих функцій: лінійної (1), та трансцендентної (2) автори застосували створену ними прикладну програму у середовищі мови програмування C++Builder. На рисунку 3 показаний фрагмент цієї прикладної програми на якому в одній системі координат XZ показано графік функції, що описана рівнянням (2) — верхня лінія, та графік функції, яка описана рівнянням (1) — нижня лінія.

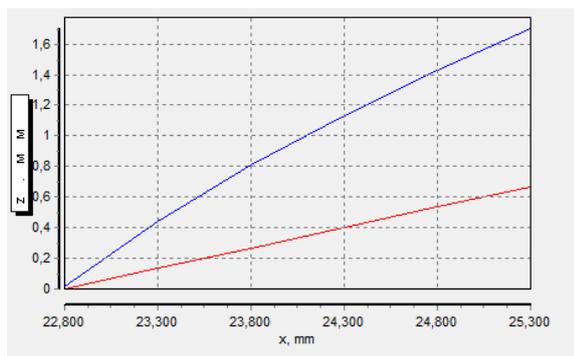


Рис. 3 – Графічна модель осевого перерізу конволітного гвинтової поверхні (верхня лінія) і графічне відображення алгебраїчної функції, що відповідає профілю трикутної різьби

Верхня лінія, це трансцендентна крива, яка отримана для різьби за стандартом [9] згідно з таблицею 1 для різьби, зовнішній діаметр котрої дорівнює 50 мм, а величина переднього кута різьбового різця

становить 45° . Цей рисунок ілюструє криволінійність, отриманої трансцендентної функції, але оскільки такі величини передніх кутів не є живані у токарних різцях, то варто проаналізувати графіки функцій (1) і (2) для більш прийняттого діапазону значень передніх кутів.

На рисунку 4 верхня лінія відповідає рівнянню (2), величина $\frac{\alpha_1}{2}$ прийнята як така, що відповідає куту нахилу сторони профілю за стандартом [9]. Тобто вказана лінія імітує профіль гвинтової поверхні, що виконана різцем без гіперболічної корекції його різальної кромки.

Як видно із графіків верхня трансцендентна крива на ділянці власне самої різьби, з внутрішнім радіусом 159,80 мм, та зовнішнім 162,30 мм (діаметр 324 мм). Максимальне відхилення між верхньою (трансцендентною) та нижньою (алгебраїчною) лініями у радіальному напрямку (тобто вздовж осі X) становить близько 0,1 мм. Це величина, яка співимірна із допуском на розмір висоти профілю різьби (див. табл.1).

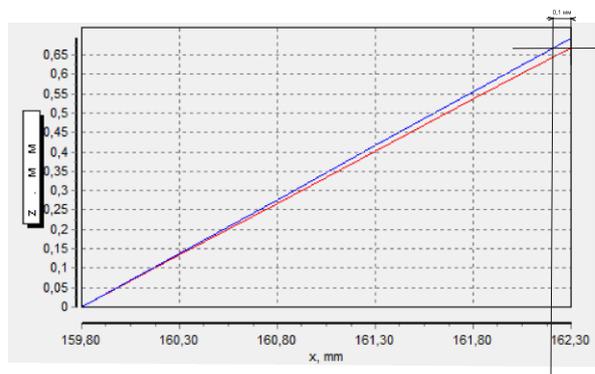


Рис. 4 – Профіль заданої стандартом ГОСТ 632 – 80 різьби (нижня лінія) і графічна модель осевого перерізу трикутної різьби отриманої різцем, передній кут якого при вершині різальної кромки становить 15° (верхня лінія)

На рисунку 5 проілюстрований фрагмент програми, який відрізняється від зображеного на рисунку 4, тим що додана ще одна лінія (дуже близька до нижньої), яка відповідає імітації створення гвинтової поверхні різцем з різальною кромкою профіль якої відповідає формулі (3).

З рисунку 5 бачимо, що відхилення нової лінії від лінії профілю заданої різьби, у порівнянні із верхньою кривою є доволі незначним, тобто фактично лінії за формулою 1 і 2 є дуже близькі.

На рисунку 6 показано збільшений фрагмент графіків, який унаочнює близькість отриманого профілю осевого перерізу різьби, отриманої за допомогою різця з відкоректованою за гіперболічним профілем і далі прямолінійно інтерпольованою різальною кромкою та профілю стандартної різьби. Як видно з рисунку максимальне відхилення між вказаними профілями не перевищує межі 0,015 мм. Близькі за значимістю результати отримані для передніх кутів у діапазоні від 0 до 35° .

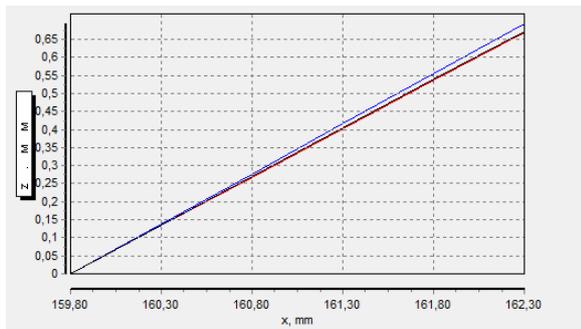


Рис. 5 – Профіль заданої стандартом ГОСТ 632 – 80 різьби (нижня лінія), графічна модель осевого перерізу трикутної різьби отриманої різцем, передній кут якого при вершині різальної кромки становить 15° (верхня лінія) і лінія поруч із нижньою – осевий переріз отриманий у результаті застосування різця з відкоректованим профілем різальної кромки різця

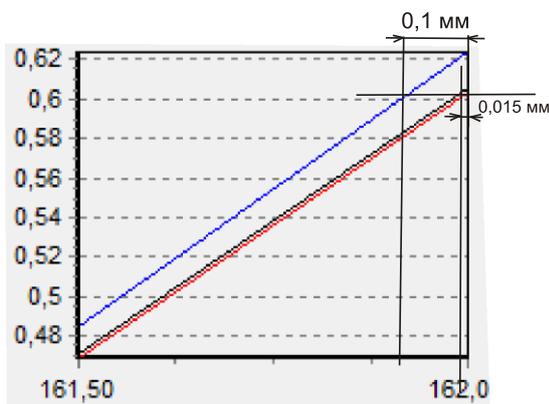


Рис. 6 – Збільшена частина отриманих на рисунку 5 графіків (різьба діаметром 324 мм).

Висновки. 1. Отримані результати підтверджують істинність аналітичних розрахунків прямолінійної інтерпольованої гіперболічної кривої профілю різальної кромки різбового різця, запропонованих у [3, 4, 5] і вказують на доцільність застосування запропонованих аналітичних рішень у [3, 4, 5] для високоточного профілювання різьби з допомогою різців із нульовим значенням переднього кута.

У подальших дослідженнях, варто зосередитися на дослідженні профіля різьби, котра отримана різцем із подвійним нахилом різальної кромки.

Список літератури: 1. *Родін П. П.* Металлорежущие инструменты [текст]: учебник для студентов машиностроительных вузов // П. Р. Родин. К.: Вища школа, 1986. – 456 с. 2. *Бобров В. Ф.* Многопроходное нарезание крепежных резьб резцом [текст] / В. Ф. Бобров. М.: Машиностроение, 1982.–104с. 3. *Онисько О. Р.* Розрахунок гіперболічної профілю різальної кромки різця для виготовлення різбових кінців труб нафтогазового сортаменту. [Текст]//О. Р. Онисько // Прикарпатський вісник НТШ. – Івано-Франківськ – 2014. –No1(25) . С. 126–137. 4. *Онисько О. Р.* Різьбові різці з відкоректованою за значенням переднього кута прямолінійною різальною кромкою

[Текст]//О. Р. Онисько, В. Г. Панчук, В. В. Врюкало // Міжнародний збірник наукових праць «Прогресивні технології і системи машинобудування».–Донецьк.: – 2014.– No2(48).– С.10–14. 5.*Онисько О. Р.* Забезпечення точності виготовлення різьб обсадних труб шляхом застосування параметричного проектування профіля різальної частини різьбонарізних інструментів в середовищі системи програмування Дельфі [Текст]//О. Р. Онисько, Л. О. Борушчак, В. Б. Копей // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету. – 2009.–No2(20).–С. 50-53. 6. *Фомин Е. В.* Повышение стойкости и точности резьбовых резцов на основе моделирования процесса резьбонарезания [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 : защищена 22.03.07 : утв. 24.09.07 / *Фомин Евгений Владимирович* – М., 2007. – 206 с. – Библиогр.: с. 194–202. – 003653715. 7. Ultra-rigid thread turning for all types of threads – internal and external. [Electronic resource] //Sandvik Coromant. Site. – Mode of access: www.sandvik.coromant.com/engb/products/corothread_266/Pages/default.aspx. - Last access: 2015. – Title from the screen. 8. DSTU GOST 18876:2008. Резцы токарные резьбовые с пластинами из быстрорежущей стали. Конструкция и размеры [Электронный ресурс]: Утвержден Госпотребстандарт 01.07.2008 – Электрон. дан. (1 файл). – К., 2008. — 7с.– Режим доступа: document.ua/rezcytokarnye-rezbovye-s-plastinami-iz-bystrorozhushhei-stal-std5221.html– Название с экрана. 9. ГОСТ 632–80. Межгосударственный стандарт. Трубы обсадные и муфты к ним [Текст]. Утвержден и внесен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 05.06.80 No 2578. М.: «Стандартинформ», 2010. — 75с. 10. *Люкшин В.С.* Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов[текст]//В.С.Люкшин. М.: Машиностроение, 1967.–372с.

Bibliographi (transliterated): 1. *Rodin P. R.* Metallorazushchije instrumenty: uchebnik dlja mashinostroitelnyh vuzov – Kiev.: Vyscha shkola, 1986. 456 p.. Print. 2. *Bobrov V. F.* Mnogoprohodnoje narezanie krepznyh rezv rezcom.– Moscow.: Mashinostroyeniye, 1982. 104 p. Print. 3. *Onysko O. R.* Rozrahunok hiperbolichnoho profilju rizalnojki kromky riztsia dlja vyhotovlennia rizbovyh kintsiv trub naftogazovoho sortaменту. Prykarpatskij visnyk NTSh. Ivano-Frankivsk, 2014. – No(25) . p. 126 –137. Print. 4. *Rizbovi riztsi z vidkorectovanoju za znachenniam perednioho kuta priamolinijnou rizalnoju kromkoju* O. R Onysko, V. G. Panchuk., V.V. Vrukalo Miznarodnyj zbirnyk naukovyih prats “Prohresyjni tehnolohii I systemy mashynobuduvannia” – Donetsk: 2014, No 2 p.10–14. Print. 5. *Onysko O. R.* Zabezpechennia tochnosti vyhotovlennia rezv obsadnyh trub shlahom zastosuvannia parametrychnoho proektuvannia profilju rizalnojki chastyny rizbonariznyh instrumentiv v seredovyshchi systemy prohramuvannia Delph. O. R. Onysko, L. O. Borushchak, V. B.Kopej Naukovyj visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tehničnogo universytetu. –2009. No2 . p. 50-53. Print. 6. *Fomin E.V.* Povysheniye stojkosti I tochnostirezbovyh reztsiv na osnovе modelirovaniа protsessа rezьbonarezaniya. Dys...kand. tehn. nauk/ Fomin Evgenij Vladimirovich – Moscow., 2007.–206 p. Print. 7. Ultra-rigid thread turning for all types of threads – internal and external. [Electronic resource] Sandvik Coromant. Site. – Mode of access: www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/corothread_266/Pages/default.aspx. - Last access: 2015. – Title from the screen. 8. DSTU GOST 18876:2008. Reztsy tokarnye rezbovye s plastinami iz bystrorozhushchej stali. Konstruktsija I razmery. Gospotrebstandart 01.07.2008 Mode of access: document.ua/rezcytokarnye-rezbovye-s-plastinami-iz-bystrorozhushhei-stal-std5221.html – Title from the screen. 9. HOST 632–80. Mezhhosudarstvenni standart. Truby obsadne y mufty k nym [Tekst]. Utverzhden y vnesen v deystvye postanovleniem Hosudarstvennoho komyteta SSSR po standartam ot 05.06. Moscow: «Standartynform», 2010. — 75p. Print. 10. *Lukshyn V.S.* Teoriya vynytovyh poverhnostiej v proektirovanii rezushchih instrumentov V.S.Lukshyn. Moscow.: Mashinostroyeniye, 1967, –372 p.

Поступила (received) 06.03.2015

Онисько Олег Романович — канд. тех. наук, доц., ІФНТУНГ, Івано-Франківськ; тел.: 0954885401, e-mail: onysko.oleg@gmail.com

Процак Павло Михайлович — студент, ІФНТУНГ, Івано-Франківськ; тел.: 0950643533, e-mail: ProcaCTC@ukr.net

ОПЫТ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ CAD/CAM/CAE СИСТЕМ

Для снижения материалоемкости машин в современном машиностроении необходимо увеличение в общей номенклатуре деталей с тонкостенными, нежесткими элементами. Достижение конструктивной прочности деталей машин предлагается оптимизация за счет использования возможностей передовых CAD/CAM/CAE систем, которые позволяют выполнить не только качественную организацию технологической подготовки производства на отдельных этапах создания передовых технологий, но и в режиме «on-line» исследовать влияние различных технологических факторов на качественные изменения в пластически деформированном слое материала и дифференцировать корреляцию процесса стружкообразования и напряженно-деформированного состояния материала в зависимости от угла наклона стружкоотводной канавки инструмента. Полученные результаты имитационного 3D моделирования позволили установить, что с повышением скорости резания возрастает перспектива использования инструмента с положительным передним углом режущей кромки для обеспечения требуемых параметров качества и производительности обработки.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, техпроцесс, обрабатывающий центр, CAD/CAM/CAE системы, конкурентоспособность, оптимизация.

Введение. Развитие машиностроения предполагает снижение материалоемкости изделий. Одним из направлений этой тенденции является увеличение в общей номенклатуре изделий деталей машин и узлов с тонкостенными, нежесткими элементами. При этом достижение конструктивной прочности обеспечивается, как правило, за счет применения материалов с более высокими прочностными характеристиками. Вместе с тем, производство конкурентоспособных изделий машиностроения предполагает применение материалосберегающих технологий [1]. Одним из направлений таких технологий является применение заготовок с малыми припусками на обработку, что стало возможным с развитием технологии производства и появлением современных обрабатывающих центров.

Однако, в настоящее время ресурсы украинских машиностроительных предприятий (парк оснащения, состав профессионалов, организация работ, уровень технологической подготовки производства и т.д.) не обеспечивают в должной мере выпуска продукции, которая могла бы соответствовать мировым стандартам. Кроме того изготовление такой продукции сегодня, как правило, не укладывается в сроки, определяемые темпами мирового научно-технического прогресса. В отечественном машиностроении время «жизни» изделия может быть сопоставимо с временем, затрачиваемым на его проектирование и подготовку производства. Такие обстоятельства иногда приводят к тому, что изделие, вследствие длительных сроков технологической подготовки производства (ТПП), фактически устаревает уже к моменту его запуска в серийное производство. А, следовательно, является не только не конкурентоспособным, но и

приносит убытки, как отдельному предприятию, так и всему машиностроению Украины в целом.

Анализ последних исследований и литературы. Из обзора работ зарубежных и отечественных авторов установлено [1–3], что при реализации существующих технологических процессов изготовления нежестких деталей машин встречаются серьезные затруднения, связанные с возникновением коробления деталей, а также с потерей точности изготовления вследствие действия технологических факторов в сочетании со схемами обработки.

Существует большое количество различных методов, которые позволяют оценивать и прогнозировать деформации нежестких деталей. Такие методы, как правило, имеют частный характер и распространяются преимущественно на оценку остаточных деформаций. Так как именно этот показатель приводит к потере формы деталей вследствие влияния технологических напряжений. Проблема прогнозирования и управления деформациями нежесткого фланца в процессе обработки, при одновременном действии сил в технологической системе и остаточных напряжений, является актуальной в настоящее время. Одновременное действие перечисленных выше факторов приводит к возникновению большого количества технологических потерь при производстве дорогостоящих ответственных деталей. Указанные потери проявляются в виде остаточного осевого смещения, погрешности формы, которые являются недопустимыми.

Целью данной статьи является оптимизация технологической подготовки производства нежестких деталей на базе применения передовых CAD/CAM/CAE систем, лежащих в основе изготовления качественной продукции.

Постановка проблемы. Некоторые основные проблемы создания современных технологий для изготовления конкурентоспособной тонкостенной продукции в условиях нынешнего машиностроительного предприятия можно охарактеризовать следующим образом:

- коммуникативная составляющая процесса ТПП нежестких деталей машин имеет зачастую «бумажных» характер. Это является первопричиной замедления всех этапов изготовления продукта и может привести к неполному соответствию конечного результата из-за многочисленных изменений в конструкторской документации;
- конструкторские неточности и упущения приводят к значительным финансовым и временным затратам на проведение необходимых изменений;
- отработка технологических режимов обработки материалов, проведение прочностных и динамических испытаний, обнаружение коллизии кинематики также приводят к финансовым и временным затратам на оптимизацию производственных возможностей;
- влияние технологических факторов в сочетании со схемами обработки, частые перестановки деталей с оборудованием на оборудование, что приводит к возникновению погрешности закрепления и базирования являются еще одним показателем, тормозящим процесс создания качественного продукта.

Совокупность выше перечисленных факторов является причиной увеличения сроков запуска новых изделий в производство, неоправданного увеличения затрат, и неконкурентоспособного качества отечественной продукции в сравнении с западными аналогами.

Одним из наиболее эффективных методов решения описанных проблем является внедрение передовых CAD/CAM/CAE систем в процесс ТПП.

Материалы исследований. Использование возможностей передовых CAD/CAM/CAE систем является тем инструментом, который позволяет выполнить не только качественную организацию ТПП на отдельных этапах создания передовых технологий, но и в режиме «on-line» исследовать последствия тех или иных изменений, внесенных в результате качественного анализа рассматриваемых процессов. Это в свою очередь позволяет выбирать наиболее выгодный вариант технологического процесса изготовления ответственных деталей машин, который удовлетворяет заранее выдвинутым ограничениям, и как результат – получить качественные показатели изделия, которые являются оптимальными при заданных условиях.

В представляемой работе были исследованы процессы изготовления нежесткого фланца производства ООО НПП «Квант-Эфир». Основная задача, решаемая при этом, заключалась в совершенствовании технологического процесса выпускаемой продукции.

В условиях эксплуатации фланец выполняет связующую роль, между двигателем и редуктором.

Поскольку процессы проектирования и изготовления являются составляющими единого инструмента для создания конкурентоспособной детали в кратчайшие сроки, и в значительной степени определяет

эксплуатационные и качественные характеристики изделия, следовательно, неоспоримой представляется важность и ответственность симбиоза этих этапов в едином жизненном цикле изделия. Метод твердотельного моделирования, в этом случае, является оптимальным с точки зрения совершенствования конструкторской и технологической подготовки производства, что, прежде всего, заключается в многократном улучшении точности обработки поверхностей и сокращении времени создания программ для станков с ЧПУ. В работе [5] отмечено, что основная задача этапа создания CAD моделей деталей заключается в обеспечении точности проектированной модели раз в 10 выше, чем допуск чистовой обработки (рис. 1).

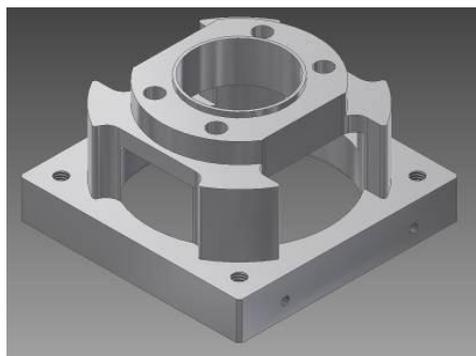


Рис. 1 – CAD модель разрабатываемого изделия

Учитывая тот факт, что повышение качества нежесткого изделия требует особого внимания к процессу ТПП, улучшения точности обработки поверхностей и создания высокоточных траекторий инструментов, что в свою очередь влечет к генерированию огромного объема данных – на передний план вышел вопрос решения задачи о сокращении времени создания программ для станков с ЧПУ. Эту задачу решалась посредством современной САМ-системы FeatureCAM (рис. 2), что позволило в диалоговом режиме проверить твердотельную модель изделия на технологичность, быстро сгенерировать качественные и эффективные траектории, которые были получены на основе конструкторско-технологических элементов твердотельной модели нежесткого фланца, и осуществить коррекцию выбора режущего инструмента, основываясь на 3D модель изделия. В качестве исходной информации для генерации траекторий движения инструментов использовалась заранее созданная высокоточная геометрическая модель (рис. 1).

Поскольку процесс написания программ для станков с ЧПУ является заключительным этапом разработки ряда мероприятий с целью изготовления высококачественной продукции – перед нами оставалась стоять задача предварительно разработки оптимальной технологии изготовления конкурентоспособного изделия.

Выполнение этого этапа зачастую требует больших материальных и временных затрат на поиск оптимальных технологических режимов обработки рассматриваемого материала, что отрицательно сказывается на себестоимости продукции.

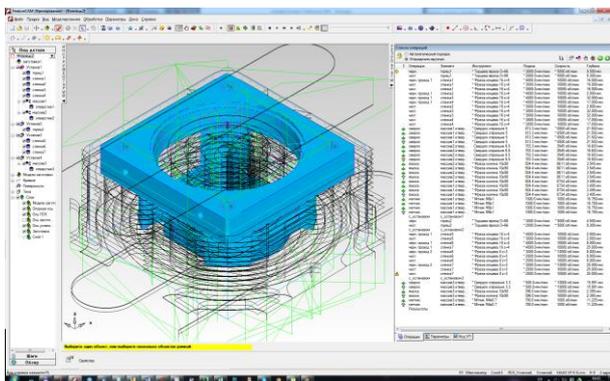


Рис. 2 – Генерация управляющей программы обработки жесткого фланца в среде САМ-системы FeatureCAM

Для решения задачи определения области существования оптимальных технологических режимов обработки фланца, дефиниции и геометрии режущего инструмента, исключения ошибок геометрии жестких элементов (коробления, перекоса, искривления в процессе механообработки) и проведения прочностных расчетов было решено использовать компьютерное проектирование и моделирование образов исследуемых технологических объектов на базе вычислительных логических алгоритмов с применением метода конечных элементов с среде CAE-модуля Deform-3D (рис. 3).

Исходя из того, что компьютерное моделирование механообработки жесткого фланца использовано для исследования, оптимизации и проектирования реальных технологических задач изготовления высококачественной продукции, было выделено два объекта исследования: процесс прямоугольного (режущим инструментом с прямоугольными стружкоотводными канавками) и процесс косоугольного резания материалов (режущим инструментом с косоугольными стружкоотводными канавками).

Поиск области существования оптимальных режимов резания осуществляли с помощью многочисленных экспериментов с изменением скорости резания (м/мин), подачи инструмента (мм/зуб) и глубины резания (мм). Экспериментальный анализ выполняли на базе построения модели обновленным лагранжианом, которая, в свою очередь, использует метод автоматического перестроения сетки.

Проведенный анализ влияния различных технологических факторов на качественные изменения в пластически деформированном слое материала показал, что существует прямая корреляция процесса стружкообразования и напряженно-деформированного состояния материала в зависимости от угла наклона стружкоотводной канавки инструмента, это подтверждено рядом численных расчетов с различными вариантами изменений 3D модели инструмента.

Кроме того определены перспективы применения инструмента с различной геометрией. С точки зрения технологии машиностроения традиционные режимы обработки материалов не позволяют использовать инструмент с положительным передним углом режущей кромки, так как большие температуры в зоне резания приводят к быстрому износу инструмента. Полученные результаты имитационного 3D моделирования позволили предположить, что с повышением скорости резания возрастает перспектива использования инструмента с вышеуказанными параметрами (рис. 3). Высокие температуры в зоне резания не успевают проникать вглубь материала инструмента и заготовки и локализуется в области резания и отводится со стружкой.

В результате имитационного моделирования выполнены теоретические исследования температуры в зоне резания. Установлено, что с увеличением скорости резания температура в зоне обработки уменьшается.

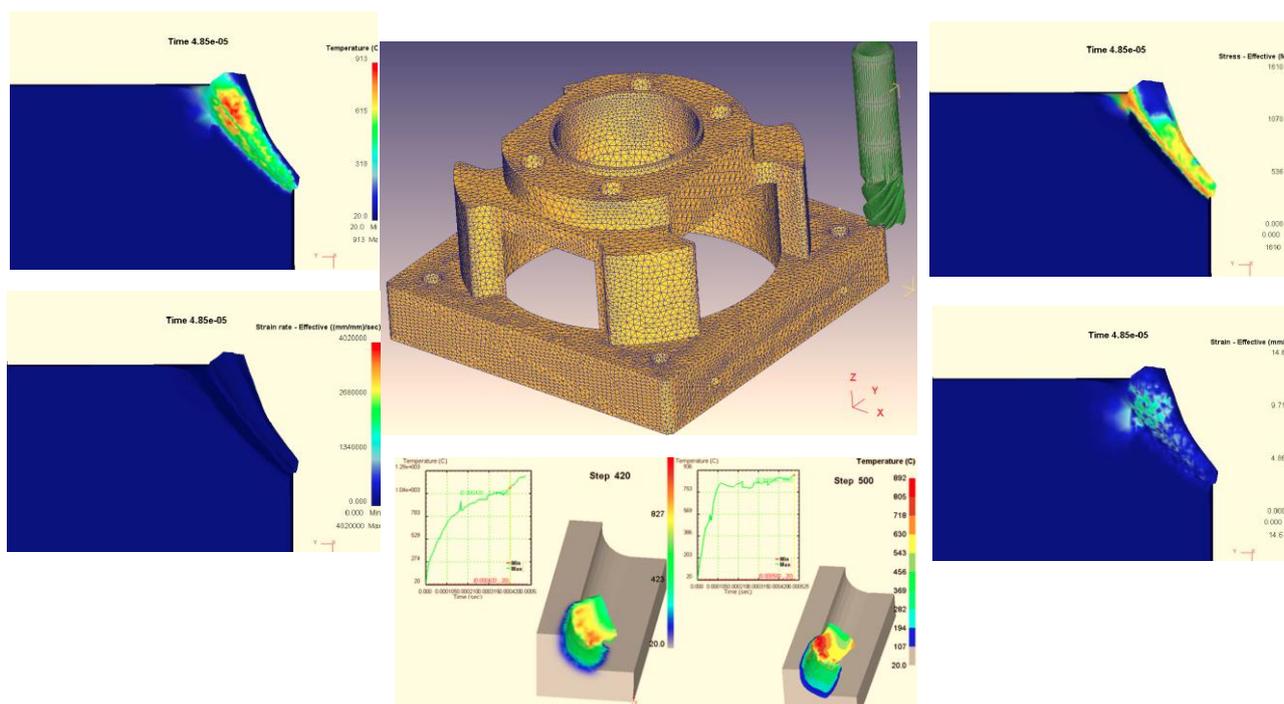


Рис. 3 – Проведение различных видов инженерного анализа с среде САЕ-модуля Deform-3D

Проведен анализ температурного поля и расчет с помощью ЭВМ температуры в теле заготовки, а также проведен анализ распределения тепловых потоков в зоне резания и по всему объему детали в процессе обработки. Решение тепловой задачи позволило убедиться в том, что назначенные технологические режимы не вызывают интенсивного тепловыделения, опасного для сохранения механических характеристик обработанной поверхности и правильности ее формы.

Использование САЕ-модуля Deform-3D позволило реализовать многокритериальную оптимизацию процесса механообработки нежестких деталей, проранжировать его технологические параметры и получить достаточно точные прогнозы физических и физико-механических характеристик разрушения материала в удобном графическом интерфейсе.

Результатами исследований стало получение высококачественных нежестких фланцев в кратчайшие сроки (рис. 4). Обработка фланца производилась на вертикальном обрабатывающем центре HAAS VF-3 (рис. 5). Необходимо отметить, что реализация сквозного цикла проектирования изготовления детали заняла 18 часов, что сократило время на запуск изделия в серийное производство в среднем на 64%.



Рис. 4 – Готовое изделие «нежесткий фланец» – результат применения передовых CAD/CAM/CAE-систем



Рис. 5 – Обрабатывающем центре HAAS VF-3

Выводы. Для снижения материалоемкости машин в современном машиностроении необходимо увеличение в общей номенклатуре деталей с тонкостенными,

нежесткими элементами за счет использования возможностей передовых CAD/CAM/CAE систем:

1. Полученные результаты имитационного 3D моделирования позволили установить возможность увеличения режимов резания с использованием инструмента с положительными углами;

2. Решение тепловой задачи обеспечило стабильность назначенных технологических режимов обработки, которые не вызывают интенсивного тепловыделения, опасного для сохранения механических характеристик обработанной поверхности и правильности ее формы;

3. Использование САЕ-модуля Deform-3D реализует многокритериальную оптимизацию процесса механообработки нежестких деталей и позволяет проранжировать технологические параметры с получением физических и физико-механических характеристик разрушения материала в удобном графическом интерфейсе.

Список литературы: 1. Нестеренко Г.А. Совершенствование технологии изготовления нежестких дисков энергетических машин с обеспечением характеристик качества обработки : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.08 / Нестеренко Григорий Анатольевич. – Омск, 2002. – 192 с.: ил. 2. Нестеренко Г.А. Оценка смещения полотна диска осевого гидравлического насоса при механической обработке / А.Г. Нестеренко, Е.А. Лысенко, И.С. Нестеренко и др. // Modern direction of theoretical and applied researches'2014: сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции (18-30 марта). Украина: Sworld. 3. Егоров Е.С. Повышение эффективности процессов обработки нежестких деталей инструментом из композитов с применением магнитной технологической оснастки: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.т.н.: Спец. 05.03.01 / Егоров Евгений Сергеевич. [Волгогр. гос. техн. ун-т]. - Волгоград: 2004. - 16 с.: ил. 4. Лысенко, С.В. Исследование деформирования фланца на различных режимах заваривания болтовых отверстий [Текст] / Лысенко С.В., Смирнов М.М. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Динаміка та міцність машин №36 - Вестник НТУ "ХПИ", 2008 - С. 129-132. 5. Добротворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мясца // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Технологии в машиностроении. X.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.5542. – С. 25-31.

Bibliography (transliterated): 1. Nesterenko G.A. *Sovershenstvovanie tehnologii izgotovlenija nezhestkih diskov jenergeticheskix mashin s obespecheniem harakteristik kachestva obrabotki : dissertacija ... kandidata tehniceskix nauk : 05.02.08.* Omsk: ONTU, 2002. 192p. Print. 2. Nesterenko A.G., Lysenko E.A., Nesterenko I.S. i dr. *Ocenka smeshhenija polotna diska oseвого gidravlicheskogo nasosa pri mehanicheskoy obrabotke.* Ukraine: Sworld, 2014. Print. 3. Egorov E.S. *Povyshenie jeffektivnosti processov obrabotki nezhestkih detalej instrumentom iz kompozitov s primeneniem magnimnoj tehnologicheskoy osnastki: Avtoref. dis. na soisk. uchen. step. k.t.n.: Spec. 05.03.01.* Volgograd: VGTU, 2004. 16 p. Print. 4. Lysenko S.V., Smirnov M.M. *Issledovanie deformirovanija flanca na razlichnyh rezhimah zavarivaniya boltovyh otverstij.* Kharkov: NTU «KhPI», 2008. pp. 129-132. Print. 5. Dobrotvorskij S.S., Basova E.V., Dobrovol'skaja L.G., Mjalica A.K. *Povyshenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitel'nogo proizvodstva v sovremennyh uslovijah.* Kharkov: NTU «KhPI», 2014. pp. 25-31. Print.

Поступила (received) 20.02.2015

Добротворский Сергей Семенович – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: sdbro@mail.ru;

Гасанов Магамедэмин Исамагомедович – канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail:

Басова Евгения Владимировна – канд. техн. наук, ст. препод. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: evgeniya.ivaschenko@mail.ru;

Головатый Роман Витальевич – руководитель группы эксплуатации станков с ЧПУ, ООО Научно-производственное предприятие «Квант-Эфир», Киев; тел.: (044) 531-42-20, e-mail:mechanic@kvantefir.com;

Гаков Сергей Александрович – канд. техн. наук, ст. препод. ДГМА, Краматорск;

Гнучих Сергей Сергеевич – магистр, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25.

А.Н. Кравцов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрено обеспечение эксплуатационных характеристик блочно-модульных инструментов при многокритериальной регламентации параметров поверхностного слоя их деталей с помощью комплексных параметров и системной оптимизации для механических методов обработки, разработаны рекомендации по применению комплексных параметров состояния контактирующих поверхностей деталей блочно-модульных резцов для повышения качества изготовления инструмента.

Ключевые слова: эксплуатационные свойства, блочно-модульный инструмент, комплексные параметры, системная оптимизация, контактирующие поверхности.

Введение. В настоящее время одним из важных вопросов повышения надежности инструментов является обеспечение показателей качества при их изготовлении. Качество изделия в значительной степени определяется состоянием контактирующих поверхностей деталей и возможностью обеспечить ее эксплуатационные характеристики (свойства) (ЭС). Одним из самых слабо изученных вопросов, решаемых при конструкторско-технологической подготовке изготовления инструментов, является назначение и технологическое обеспечение параметров состояния, характеризующих ЭС поверхностей их деталей.

Анализ последних исследований и литературы. В последнее время, наблюдается недостаток работ, в которых обеспечение ЭС поверхностей деталей инструмента производится при помощи комплексных параметров их состояния (КП). Хотя и присутствуют исследования И.В. Крагельского, Э.В. Рыжова, А.Г. Сулова и др. (см. [1 - 3]), посвященные обеспечению ЭС с помощью многокритериальной регламентации состояния поверхностей несколькими КП, но отсутствуют решения задачи оптимизации при их помощи. Поэтому, предложенная методика многокритериальной оптимизации технологического обеспечения нескольких ЭС поверхностей инструмента, при помощи КП, является особо актуальной, представляющей большой интерес для исследования.

Следовательно, для широкого применения блочно-модульных инструментов на промышленных предприятиях, необходимы исследования, направленные на совершенствование методики технологического обеспечения показателей надежности на основе анализа состояния поверхностей их деталей.

Целью данной статьи является обеспечение ЭС блочно-модульных инструментов при многокритериальной регламентации параметров поверхностного слоя их деталей с помощью КП и системной оптимизации для механических методов обработки. Объектом исследования являются блочно-модульные то-

карные инструменты, применяемые в системах автоматического управления технологической обрабатывающей системой (ТОС). Предметом исследования являются ЭС деталей блочно-модульных токарных режущих инструментов в системах автоматического управления ТОС.

Материалы исследований

В данной работе (и др., см [1 - 3]) автором приводятся теоретические и экспериментальные исследования поверхностей деталей блочно-модульных инструментов с применением системной оптимизации их ЭС, режимов обработки, функционально-стоимостного анализа, вероятностной оценки методов их обработки при многокритериальной регламентации параметров их качества. А также с применением статистических методов обработки экспериментальных данных и системно-структурного анализа при разработке конструкций токарного инструмента.

Оптимизация основана на применении двухступенчатой схемы технологического обеспечения ЭС поверхностей деталей инструмента с разделением задач технолога и конструктора при задании КП на каждой из стадий. С последующим решением задачи системной оптимизации ЭС поверхностей с применением функционально-стоимостного анализа и вероятностной оценки (ВО) метода их обработки.

Под системной оптимизацией понимается решение задачи нахождения оптимального условия обеспечения ЭС поверхностей деталей на основе анализа функций ее КП (т.е. функции эксплуатации). Функционально-стоимостной анализ (ФСА) представляет собой метод системного исследования функций объекта, направленный на минимизацию затрат в сферах проектирования, производства и эксплуатации. Системно-структурный анализ (ССА) конструкций блочно-модульных токарных инструментов позволяет классифицировать элементы этих конструкций, установить условия внешнего и межэлементного воздействия, регламентируемые параметры качества по-

верхности и др. Он является одновременно завершением конструкторского проектирования и началом технологической подготовки производства, заключающийся в анализе надежности инструмента и выборе параметров, оказывающих решающее влияние его на качество (регламентируемые параметры).

Функциональное назначение поверхности инструмента, его ЭС, геометрические и физико-механические параметры поверхности и КП связаны друг с другом при помощи теории графов и соответствий (см. [1 - 3]). Научная новизна работы автора состоит в разработке методики многокритериальной оптимизации технологического обеспечения ЭС деталей блочно-модульных токарных инструментов на основе применения КП их состояния.

Автором, в работах [1 - 3], обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи, рассмотрена ее научная новизна. Проанализировано современное состояние проблемы технологического обеспечения ЭС поверхностей деталей блочно-модульных токарных инструментов. Определены основные направления развития блочно-модульных инструментов на примере резцов для тяжелых токарных станков.

Рассмотрены отличительные особенности и условия возникновения цельных, напайных, сборных, блочно-модульных, а также инструментов с элементами диагностики и контроля. Отмечены преимущества и недостатки многоэлементных блочно-модульных инструментов, а также то, что применение последних наряду с преимуществами (быстросменяемость и возможность автозамены, экономии материала, обеспечение централизации изготовления) приводит к росту числа контактирующих поверхностей, ЭС которых определяют рабочие характеристики инструмента.

Выполнен анализ взаимодействия контактирующих поверхностей. Раскрыты три основных подхода к оценке геометрических характеристик имеющихся в нашей стране. Традиционный - параметрический, непараметрический, с использованием спектральной теории неровностей. Проанализированы основные теоретические предпосылки и принимаемые модели, используемые при рассмотрении вопросов контактного взаимодействия. Показано, что параметры состояния поверхностного слоя в процессе эксплуатации изменяют свои значения, что приводит к изменению характеристик зоны контактного взаимодействия.

Проблема обеспечения ЭС поверхностей деталей анализируется с позиций двух основных подходов:

1. Технологического обеспечения системы параметров, определяющих их ЭС.

2. Технологическое обеспечение непосредственно ЭС деталей.

Результаты исследований. Проведенный анализ показал, что в настоящее время при наличии хорошей научной базы по вопросам технологического обеспечения деталей очень мало работ, посвященных изготовлению многоэлементных сборных режущих инструментов, наиболее типичными представителями которых, являются блочно-модульные резцы для токарных станков. Сделан вывод, что дальнейшее совершенствование и создание новых видов многоэле-

ментных инструментов требуют разработки теоретических предпосылок по их технологическому обеспечению ЭС.

Одно из основных направлений решения этой задачи является установление и обеспечение научно-обоснованных показателей ЭС контактирующих поверхностей деталей, входящих в состав инструмента. А также изучение параметров поверхностного слоя и показателей, характеризующих ЭС, меняющие свои значения в процессе эксплуатации инструмента, что позволяет установить время выхода из строя инструментов и на базе этого рационально использовать их в процессе эксплуатации.

Следовательно, при решении задачи технологического обеспечения ЭС деталей необходимо применять КП состояния поверхностного слоя. Выделяется два вида таких параметров – технологических и расчетно-конструкторских. При этом критериями по определению метода обработки на финишном этапе являются необходимые условия максимума площадей области эффективного значения ЭС при рассматриваемом методе обработки (ОЭМО, см. **рис. 1** и **рис. 2**), минимума проекции функции затрат на их ось, а также максимума плотности распределения вероятности при ограниченном наборе регламентируемых параметрах состояния поверхности.

Выходной информацией конструктора и исходными данными для технолога служит область регламентируемых значений ЭС - ОРЭС. Она включает все ЭС, которые конструктор задал технологу. А значение этой области не зависит от, тех, которые достигнуты технологически. Но совсем не обязательно, для решения такой задачи, использовать КП состояния поверхности. В работах по технологическому обеспечению ЭС (см. [1 - 3]) найдены теоретические зависимости интенсивности изнашивания I_h от условий обработки. В тоже время, критерием оптимальности выбора режимов обработки может служить условие $J_h \leq J$. Где, J_h и J – интенсивности изнашивания, определяемые из условий обработки и процесса нормального износа.

Регламентируемый параметр элементов режимов обработки подчиняется законам распределения случайных величин. Как видно из рис. 1 и рис. 2, метод обработки, обеспечивающий оптимальную величину интенсивности изнашивания можно найти, используя критерий максимальности значения плотности распределения вероятностей, на участке ($t_{min}; t_{max}$) при регламентации в качестве лимитирующего параметра технологической системы глубины резания t .

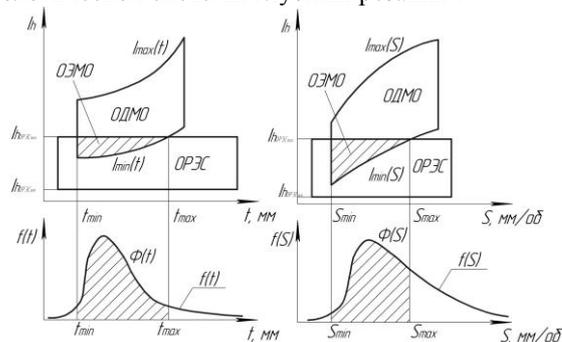


Рис. 1 – Схема выбора метода обработки при обеспечении износостойкости

Она является температурным фактором обработки, оказывая влияние на состояние поверхности. По зависимости вида $R_z = f(t)$, можно определить диапазон параметров, которые будут обеспечивать оптимальную износостойкость поверхности. Выбор остальных элементов режимов резания можно осуществить аналогично. Для анализа влияния динамики процесса резания применяется модель продольного точения резцом по динамической схеме.

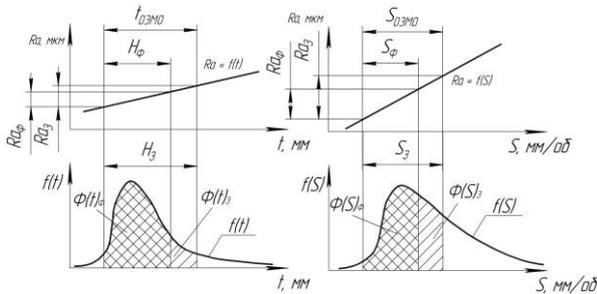


Рис. 2 – Схема выбора метода обработки при обеспечении износостойкости

Фактическая глубина резания H_f и подача S_f зависят от соотношений заданной подачи и глубины резания соответственно (S_3 и H_3) и передаточных функций звеньев системы автоматического управления ($W_{ПР}$ и $W_{ЭУС}$). Поэтому, рассматривая обеспечение высотных геометрических параметров состояния поверхности можно заметить, что фактический параметр при обработке будет отличаться от заданного. С другой же стороны, вероятность обеспечения эксплуатационных свойств режимами обработки, при учете динамики процесса резания, снижается: плотность распределения вероятностей $\Phi_f < \Phi_3$, вероятность $P(S_0; t)_f < P(S_0; t)_3$ (рис. 1, рис. 2). И это нужно учитывать при использовании блочных конструкций резцов в системах автоматического управления.

В работах [1 - 3] автором рассмотрен метод решения задачи многокритериальной оптимизации технологического обеспечения ЭС поверхностей деталей инструмента. Приведена система КП, обоснование их выбора, элементы ФСА при обеспечении ЭС поверхности и вероятностной оценки методов ее обработки. Необходимость получения ЭС, предъявленных к поверхностям деталей, выдвигает задачу обеспечения КП состояния поверхностного слоя, как функций эксплуатации, каждая из них представляет собой совокупность отдельных параметров шероховатости, вол-

нистости, макроотклонений и физико-механических свойств (табл. 1).

Воспользуемся графической интерпретацией метода на базе двух критериального случая. Для этого в заданном пространстве выберем некоторую область Р (рис. 4а). Определим, что эта область является областью регламентированных значений ЭС (ОРЭС).

Она имеет ограничения:

$$X_i = X_{iPijmax}; X_i = X_{iPijmin};$$

$$Y_j = Y_{jPijmax}; Y_j = Y_{jPijmin}; \quad (1.1)$$

$$Z_k = Z_{kPkjmax}; Z_k = Z_{kPkjmin} \quad (1.2)$$

Далее ограничим область достижимых значений ЭС при рассматриваемом методе обработки (ОДМО) (рис. 3б и рис. 4а). Для учета разброса не регламентированных параметров состояния поверхностного слоя, как например $W_a = W_{amin} \dots W_{amax}$ функция $J = f(Ra)$, где Ra – регламентируемый параметр состояния поверхности, функция эксплуатации изменит свое положение от $J_{min} = f_2(Ra)$ до $J_{max} = f_1(Ra)$ (рис. 3а и рис. 3б).

С этой целью представим зависимости, отражающие технологическое значение КП в виде:

$$Y_j = K_{ijk} \cdot f(X_i; Z_k) \quad (2)$$

где X_i - значения i-го параметра, которые регламентируются и откладываются на оси абсцисс; Z_k - значения k-го параметра, которые регламентируются и откладываются на оси ординат; K_{ijk} - коэффициент, отражающий влияние не рассматриваемых j КП при i и k регламентируемом параметре состояния поверхностного слоя.

Тогда область ОДМО ограничится функциями:

$$X_i = X_{iDijmax}; X_i = X_{iDijmin}; \quad (3.1)$$

$$Y_j = K_{ijkmax} \cdot f(X_i; Z_k); Y_j = K_{ijkmin} \cdot f(X_i; Z_k) \quad (3.2)$$

$$Z_k = Z_{kDkjmax}; Z_k = Z_{kDkjmin}; \quad (3.3)$$

Объемы ОДМО и ОРЭС определяются из выражений:

$$V_{Dijk} = (K_{ijkmax} - K_{ijkmin}) \cdot \int_{X_{idijmin}}^{X_{idijmax}} \left[\int_{Z_{kdjmin}}^{Z_{kdjmax}} f(X_i; Z_k) dZ_k \right] dX_i \quad (4)$$

$$V_{Pijk} = (X_{iPijmax} - X_{iPijmin}) \cdot (Y_{jPijmax} - Y_{jPijmin}) \times (Z_{kPkjmax} - Z_{kPkjmin}) \quad (5)$$

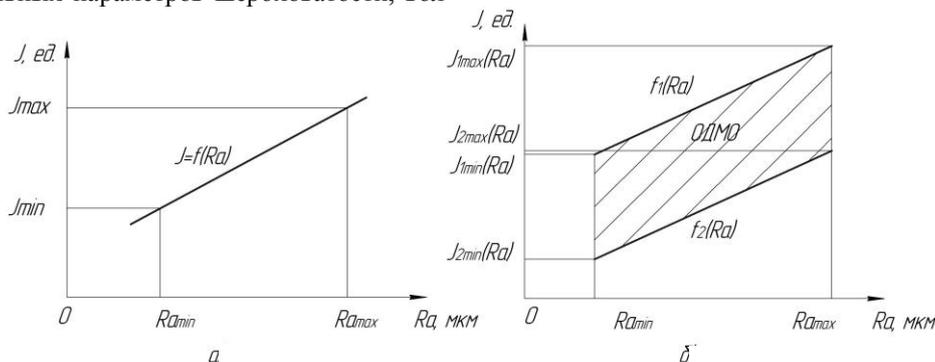


Рис. 3 – Схема построения области ОДМО при регламентации одного параметра состояния поверхностного слоя для одной функции эксплуатации: а – характер изменения функции эксплуатации; б – ограничение области достижимых значений

Таблица 1 - Комплексные параметры, применяемые при технологическом обеспечении ЭС поверхностей деталей и инструмента

Наименование поверхности	КП	Технологическое значение параметров	Расчетно-конструкторское значение параметров
Работающие в условиях трения и износа	C_x	$\frac{H_p \cdot W_p \cdot (R_p)^4}{(S_m)^6 \cdot (K^l)^{12}}$	$3375 \cdot \left[\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left(\frac{10 \cdot J_{II} \cdot \lambda}{\chi \cdot P} \right)^6$
Опорные поверхности работающие на сдвиг	Π	$\left[\frac{R_p \cdot W_p \cdot H_p}{(K^l)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}}$	$\left[\frac{\sigma_T \cdot J_{III}}{1.7 \cdot P} \right]^{\frac{1}{6}}$
Опорные поверхности работающие в упор	H	$\frac{R_a^2 \cdot K^l}{W_z \cdot H_{man}}$	$\frac{P}{A \cdot \sigma_T}$
Работающие в условиях линейного износа	I	$\frac{R_a}{S_m \cdot K^l}$	$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E}$
Работающие в условиях циклического нагружения	D	$\frac{K^l \cdot S_{mw}^{0.4} \cdot R_a}{W_a^{0.2} \cdot S_m \cdot t_m}$	$\frac{\gamma^{0.2}}{13.5} \cdot \left[\frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_{-1}} - 1 \right]$
Поверхности соединений посадок с натягом	C_M	$R_p + W_p + H_p$	$\Delta - 2 \cdot 10^3 \cdot \frac{M}{\pi d l f} \cdot \frac{C}{E}$

Пересечение областей ОДМО и ОРЭС ограничит область эффективных значений ОЭМО, в которой при применении рассматриваемого метода обработки будут иметь место значения ЭС и параметров, определяемых регламентацией.

Объем области ЦОРЭС можно определить при помощи смешанного произведения векторов. Для этого рассмотрим области ОРЭС₁, ОРЭС₂, ..., ОРЭС_i, которые образованы множествами векторов O₁{a₁; b₁; c₁}, O₂{a₂; b₂; c₂}, ..., O_i{a_i; b_i; c_i} соответственно. Таким образом, объем областей ОРЭС_i определяется смешанным произведением векторов, которые лежат на гранях соответствующих областей ОРЭС: V₁ = [a₁b₁]c₁ = (Se₁)c₁; V₂ = [a₂b₂]c₂ = (Se₂)c₂; ... ; V_i = [a_ib_i]c_i = (Se_i)c_i. В этих выражениях Se_i – площадь параллелограмма, построенного на векторах a_i и b_i соответственно, приведенных в одну точку.

Для примера, приведенного на рис. 4б, объем областей ОРЭС_i:

$$V^{ОРЭС}_1 = \begin{vmatrix} Wa_1 & 0 & 0 \\ 0 & Ra_1 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 \end{vmatrix} = Wa_1 \begin{vmatrix} Ra_1 & 0 \\ 0 & J_1 \end{vmatrix} = Wa_1(Ra_1 - J_1), (6)$$

$$V^{ОРЭС}_2 = \begin{vmatrix} Wa_2 & 0 & 0 \\ 0 & Ra_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_2 \end{vmatrix} = Wa_2 \begin{vmatrix} Ra_2 & 0 \\ 0 & J_2 \end{vmatrix} = Wa_2(Ra_2 - J_2), (7)$$

...

$$V^{ОРЭС}_i = \begin{vmatrix} Wa_i & 0 & 0 \\ 0 & Ra_i & 0 \\ 0 & 0 & J_i \end{vmatrix} = Wa_i \begin{vmatrix} Ra_i & 0 \\ 0 & J_i \end{vmatrix} = Wa_i(Ra_i - J_i), (8)$$

где, J_i = J_i(Ra_i; Wa_i)^{max} - J_i(Ra_i; Wa_i)^{min}, Ra_i и Wa_i - среднее арифметическое отклонение профиля продольного сечения и среднееарифметическое отклонение профиля волнистости соответственно.

Объем области ЦОРЭС определится вычитанием из самой большой по значению объема области ОРЭС_i (V^{ОРЭС}_i) областей V^{ОРЭС}₁, V^{ОРЭС}₂, ..., V^{ОРЭС}_{i-1}, т.е.: V_{ЦОРЭС} = V^{ОРЭС}_i - (V^{ОРЭС}₁ + V^{ОРЭС}₂ + ... + V^{ОРЭС}_{i-1}). Объемы областей ОДМО_i и СОДМО находятся при помощи двойных интегралов, взятых в соответствующих пределах:

$$V_1^{max} = \int_{Ra_{min}^1}^{Ra_{max}^1} \left(\int_{Wa_{min}^1}^{Wa_{max}^1} [C_m^{max}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa \quad (9)$$

$$V_1^{min} = \int_{Ra_{min}^1}^{Ra_{max}^1} \left(\int_{Wa_{min}^1}^{Wa_{max}^1} [C_m^{min}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa \quad (10)$$

где, C_{m i}^{max} и C_{m i}^{min}, для задачи, приведенной на рис. 4б:

$$C_{m 1}^{max} = (K_1 Ra)_1 + (K_2 Wa)_1 + Const_1, (11)$$

$$C_{m 1}^{min} = (K_1 Ra)_1 + (K_2 Wa)_1 + Const_2, (12)$$

...

$$C_{m i}^{max} = (K_i Ra)_i + (K_r Wa)_i + Const_j, (13)$$

$$C_{m i}^{min} = (K_i Ra)_i + (K_r Wa)_i + Const_k, (14)$$

Аналогичным образом находятся объемы областей ОДМО_i:

$$V_i^{max} = \int_{Ra_{min}^i}^{Ra_{max}^i} \left(\int_{Wa_{min}^i}^{Wa_{max}^i} [C_m^{max}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa, (15)$$

$$V_i^{min} = \int_{Ra_{min}^i}^{Ra_{max}^i} \left(\int_{Wa_{min}^i}^{Wa_{max}^i} [C_m^{min}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa, (16)$$

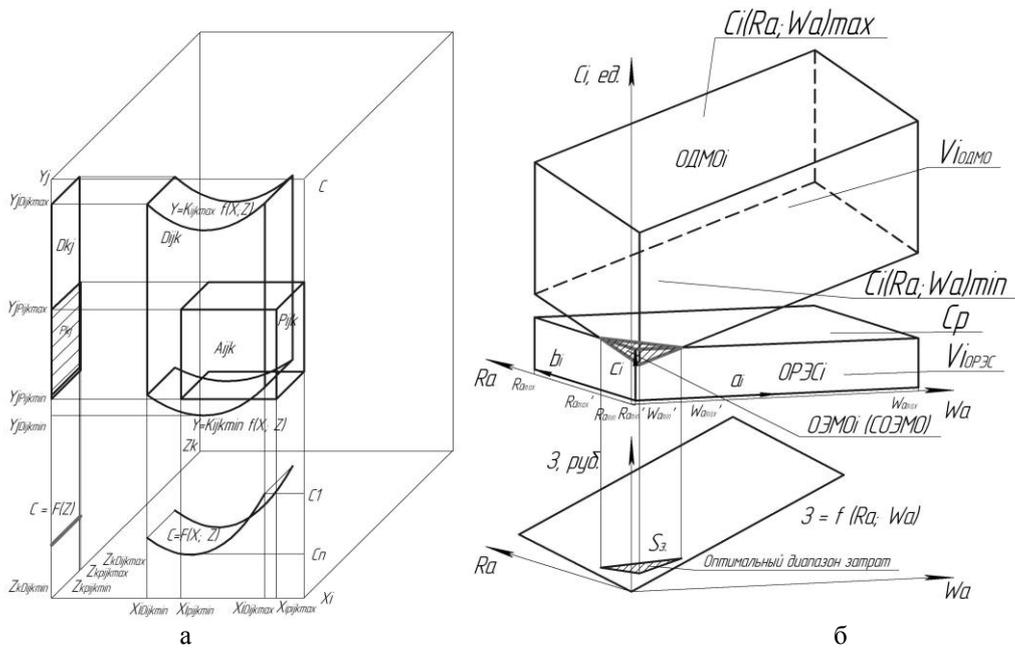


Рис. 4 – Решение задачи выбора оптимальной площади затрат S_3 для обеспечения заданного ЭС при регламентации двух параметров состояния поверхностного слоя: а – зависимости затрат от параметров состояния поверхностного слоя; б – результаты решения задачи

$$V_{\text{ОДМО}}^{\text{ОДМО}} = V_1^{\text{max}} - V_1^{\text{min}} \quad (17)$$

$$V_{\text{ОДМО}}^{\text{ОДМО}} = V_i^{\text{max}} - V_i^{\text{min}} \quad (18)$$

Объем области СОДМО определяется аналогично нахождению объема области ЦОРЭС в предыдущих рассуждениях: $V_{\text{СОДМО}} = V_{\text{ОДМО}}^{\text{ОДМО}} - (V_{\text{ОДМО}}^{\text{ОДМО}} + V_{\text{ОДМО}}^{\text{ОДМО}} + \dots + V_{\text{ОДМО}}^{\text{ОДМО}})$.

Нахождение наиболее оптимального варианта на стадии подготовки производства является задачей, которая эффективно решается с применением принципов ФСА. Используя системный подход, введем в систему $X_i Y_j Z_k$ ось затрат C . Построим зависимости затрат от параметров состояния поверхностного слоя X_i, Z_k (рис. 4а).

$$C = F_j(X_i; Z_k) \quad (19)$$

Проецирование экстремумов X_i, Z_k из области ОЭМО на ось затрат (рис. 4а) ограничит максимум и минимум издержек при рассматриваемом методе обработки. В предыдущем изложении рассматривался случай выбора метода обработки с позиций обеспечения одного j -го КП, при заданном уровне i -го и k -го параметра состояния поверхностного слоя. Однако, часто необходимо обеспечить несколько ЭС с регламентацией двух и более параметров.

Для решения задачи построим совмещенную систему координат $X_1, Y_1, Z_1 \dots X_n, Y_n, Z_n$ с коррелированными по масштабу координатным осям. Введем единую ось затрат C (рис. 4а). Масштабный фактор по осям Y_j выберем исходя из совместного решения уравнений, отражающих конструкторско-расчетное значение КП состояния поверхности, отражающего ее ЭС. Соотношения масштаба по осям X_i и Z_k определяются на основании зависимостей между параметрами состояния поверхностного слоя, известными из теории технологического обеспечения ЭС деталей.

Параметры не коррелированных значений будем учитывать в структуре коэффициента K , поэтапно

производя решения по всем регламентируемым параметрам. Очевидно, что проводимый при регламентировании нескольких коррелированных параметров и обеспечении двух и более ЭС, анализ является общим. На основании ограничений (1.1 – 1.2), (2), (3.1 – 3.3) построим области ОДМО и ОРЭС, а также функции затрат для всех j ЭС, по i и k регламентируемым параметрам. Пересечение областей ОДМО образует D_Σ – совместную область достигаемых значений ЭС при рассматриваемом методе обработки (СОДМО). Пересечение областей ОРЭС образует P_Σ – целеобразную область регламентируемых значений ЭС (ЦОРЭС). Пересечение областей СОДМО и ЦОРЭС образует A_Σ – совместную область эффективных значений ЭС при рассматриваемом методе обработки (СОЭМО).

На рис. 5 области D_i и D_1 – области достижимых значений ЭС при рассматриваемом методе обработки (ОДМО) образуют совместную область СОДМО – область V . Области регламентируемых значений ЭС (ОРЭС) P_i и P_1 образуют совместную область ЦОРЭС – область P . Пересечение областей эффективных значений ЭС – V (СОДМО) и P (ЦОРЭС) образуют совместную область СОЭМО – область A . Объемы ЦОРЭС, СОДМО, СОЭМО определяются так:

$$V_{D\Sigma jk} = \sum_{\psi=1}^e \left[K_{BD\Sigma jk} \cdot \iint_{D_i} f_{BD\Sigma jk}(X_i; Z_k) dX_i dZ_k - K_{HD\Sigma jk} \cdot \iint_{D_i} f_{HD\Sigma jk}(X_i; Z_k) dX_i dZ_k \right]_e \quad (20)$$

$$V_{A\Sigma jk} = \sum_{\psi=1}^t \left[K_{BA\Sigma jk} \cdot \iint_{P_i} f_{BA\Sigma jk}(X_i; Z_k) dX_i dZ_k - K_{HA\Sigma jk} \cdot \iint_{P_i} f_{HA\Sigma jk}(X_i) dX_i dZ_k \right]_t \quad (21)$$

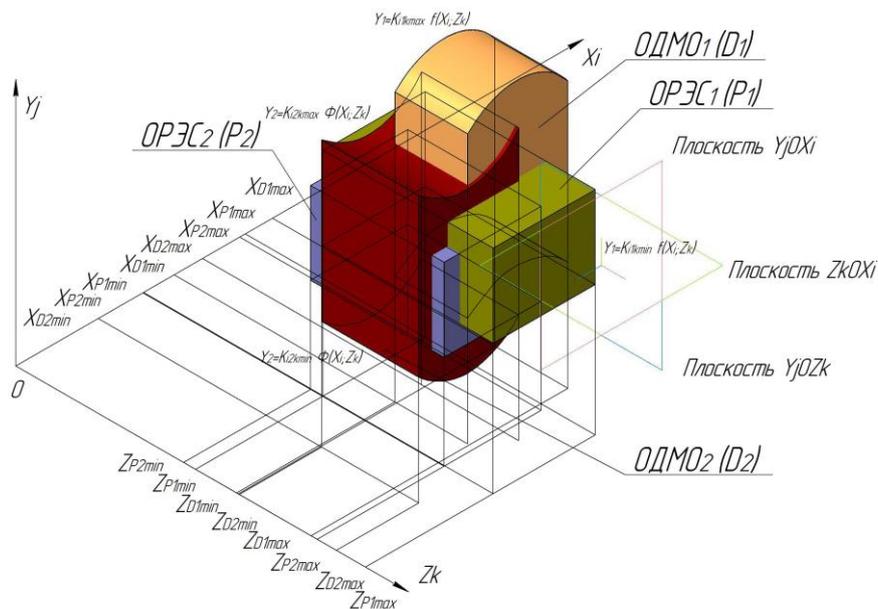


Рис. 5 – Схема построения областей ОДМО и ОРЭС при регламентации двух параметров состояния поверхностного слоя для двух функций эксплуатации

$$V_{P\Sigma ij k} = (X_{iP\Sigma ij k \max} - X_{iP\Sigma ij k \min}) \times (Y_{jP\Sigma ij k \max} - Y_{jP\Sigma ij k \min}) \times (Z_{kP\Sigma ij k \max} - Z_{kP\Sigma ij k \min}), \quad (22)$$

где, ψ - количество пересеченных множеств; $f_{HD\Sigma ij k}(X_i; Z_k)$, $f_{BD\Sigma ij k}(X_i; Z_k)$ - приведенная к j показателю функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область $D_{\Sigma ij k}$; $X_{iP\Sigma ij k \max}$, $X_{iP\Sigma ij k \min}$ - минимальные и максимальные значения параметров состояния поверхности, являющихся ограничительными функциями области $P_{\Sigma ij k}$ (по первому регламентируемому параметру); $Z_{kP\Sigma ij k \max}$, $Z_{kP\Sigma ij k \min}$ - минимальные и максимальные значения параметров состояния поверхности, являющихся ограничительными функциями области $P_{\Sigma ij k}$ (по второму регламентируемому параметру); $Y_{jP\Sigma ij k \max}$, $Y_{jP\Sigma ij k \min}$ - минимальные и максимальные значения КП состояния поверхности, отражающих ее ЭС; $f_{HA\Sigma ij k}(X_i; Z_k)$, $f_{BA\Sigma ij k}(X_i; Z_k)$ - приведенная функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область $A_{\Sigma ij k}$ по регламентируемому параметру; $K_{BD\Sigma ij k}$, $K_{HD\Sigma ij k}$ - приведенные значения коэффициентов отражающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область $D_{\Sigma ij k}$; $K_{BA\Sigma ij k}$, $K_{HA\Sigma ij k}$ - приведенные значения коэффициентов, учитывающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область $A_{\Sigma ij k}$; e - количество множеств СОДМО; t - количество множеств СОЭМО.

Проецирование экстремальных значений $X_{iD\Sigma}$, $X_{iA\Sigma}$ областей СОДМО и СОЭМО на функции затрат образуют области затрат, которые показывают в каких пределах колеблется стоимость обработки дета-

лей при обеспечении ЭС данным методом обработки. В случае не пересечения области ОЭМО (СОЭМО) с областью ОРЭС (ЦОРЭС) возможны следующие пути решения задачи технологического обеспечения ЭС: а) Смена метода обработки поверхности на финишном этапе технологического процесса; б) Смена регламентируемого(-ых) параметра(ов) состояния поверхностного слоя; в) Увеличение числа этапов обработки поверхностей в технологическом процессе.

При оптимизации технологических процессов важно определить критерии оптимальности, которые могут заключаться не только в обеспечении ЭС поверхностей детали, но и точности ее размеров. А также уровни оптимальности, как например, перехода и операции. Таким образом, на уровне перехода, это необходимые условия максимума площадей эффективного значения ЭС при рассматриваемом методе обработки (ОЭМО), минимума проекции функции затрат на их ось, а также максимума плотности распределения вероятности при ограниченном наборе регламентируемых параметрах качества поверхности (и др., см. [1 - 3]) (табл. 2). На уровне операции, соблюдение условия отношения максимального и минимального припусков $Z_{L\max}/Z_{L\min} < 3$ ($Z_{R\max}/Z_{R\min} < 3$) на чистовых и отделочных переходах, а также то, чтобы допуск конструкторского размера TK_i (TR_{Ki} – при наличии основных отверстий в конструкции заготовки) был больше, либо равным сумме допусков технологических размеров TL_i (TR_i), входящих в соответствующую размерную цепь: $TK_i \geq \sum TL_i$ ($TR_{Ki} \geq \sum TR_i$). При не обеспечения условий оптимальности технологической операции (табл. 2) необходимо перестроить размерные схемы технологического процесса таким образом, чтобы (I – IV)-й критерии не нарушались.

Таблица 2 – Критерии выбора оптимального варианта технологического обеспечения ЭС поверхностей деталей и точности конструкторских и технологических размеров

Критерий оптимальности технологического перехода		
I-й критерий оптимальности	II-й критерий оптимальности	III-й критерий оптимальности
Максимум площади ОЭМО (СОЭМО)	Минимум величины затрат C_i	Максимум вероятности $P(K_i)$
$\forall MOED \in C$; $\exists_B B_{joon} . S_D \rightarrow \max$; $D = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_i\}$; $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_i\}$;	$\exists_B B_{joon} . C_i \rightarrow \min$; $C_i = F(x_i); A \cap D = B$; $B = \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_j\}$; $B_{onm} \in B$;	$\exists_B B_{joon} . P_i(A) \rightarrow \max$;
Критерий оптимальности технологической операции		
I-й критерий оптимальности	II-й критерий оптимальности	
Обеспечение точности линейных технологических размеров	Обеспечение точности линейных конструкторских размеров	
$Z_{Lmax}/Z_{Lmin} < 3$	$TK_i \geq \sum TL_i$	
III-й критерий оптимальности	IV-й критерий оптимальности	
Обеспечение точности технологических размеров основных отверстий	Обеспечение точности конструкторских размеров основных отверстий	
$Z_{Rmax}/Z_{Rmin} < 3$	$TR_{Ki} \geq \sum TR_i$	

Этого можно добиться различными способами, некоторые из которых, могут быть такими: увеличение числа этапов обработки поверхностей, в т.ч. и замена методов их обработки, смена технологических баз (а также их последовательности в технологическом процессе), замена типа и способа получения исходной заготовки и другие.

Предложенная система оценок позволяет установить схемы проведения ФСА в зависимости от требований, предъявляемых к поверхностям контактного взаимодействия в процессе эксплуатации, которые регламентируются в соответствии с ГОСТ 2789-73 и 24642-81. При этом регламентация лишь частично определяет ЭС поверхности. Наиболее жесткая регламентация на стадии конструкторской разработки изделия не эффективна, так как ведет к увеличению затрат на производство, а иногда приводит к невозможности совместного получения регламентируемых параметров и требуемых ЭС в процессе изготовления.

Системно-структурный анализ, основывается на анализе контактного взаимодействия поверхностей деталей инструмента и построением структурных их схем. Основой которых является схема базирования и закрепления режущего элемента. По направлению силовых векторов P_x, P_y, P_z показываются элементы, которые воспринимают силовую нагрузку в рассматриваемом направлении. Начало цепи закрепления условно обозначено ветвью Р. Ее силовой диапазон определяется силовыми характеристиками механизма зажима. В частности, для винтовых прижимов усилием винта, а для других конструкций, например силами упругости. Разработанный блочно-модульный токарный инструмент с двумя элементами контроля (ЭК) (рис. 6) имеет структурную схему, изображенную на рис. 7. Элементы контроля (ЭК₁ и ЭК₂, рис. 7) измеряют составляющие силы резания P_y^{\parallel} и P_x^{\parallel} , входящие в формулы, предназначенные для определения сил, действующих на опорную поверхность контакта пла-

стины режущего элемента и державки, а также угловые и линейные перемещения режущей пластины.

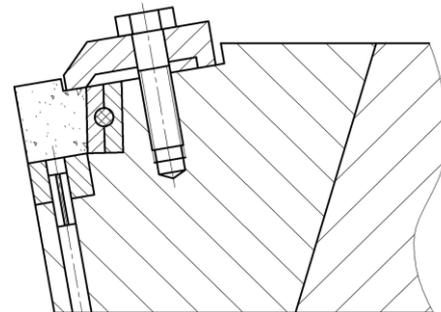


Рис. 6 – Эскиз блочно-модульного токарного резца с двумя ЭК

Для обеспечения ЭС блочного инструмента применяется системно-структурный анализ существующих конструкций, который позволяет классифицировать их элементы, условия внешнего и межэлементного воздействия, параметры качества поверхности и т.д.

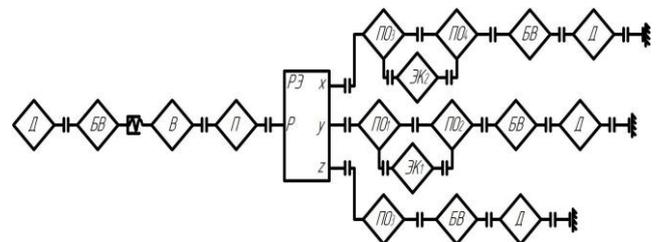


Рис. 7 – Структурная схема блочно-модульного токарного резца с двумя ЭК

Структурная схема блочно-модульного токарного резца представляет собой взвешенный граф (рис. 8). Граф является взвешенным, если его ребрам соот-

ветствуют вполне определенные весовые коэффициенты. Весовые коэффициенты ребер графа присваиваются типам контактного взаимодействия поверхностей (табл. 3), а его вершинами являются детали блочных резцов (табл. 4). Рассматривая каждую ветвь структурной схемы блочного резца, при применении теории графов, ее можно описать с помощью кортежа вершин. При написании кортежей вершин считаем, что опорные пластины u_5 и u_5^I идентичны, а элементы контроля u_9 и u_9^I входят в этот узел, а также передача усилий происходит именно через этот элемент. Каждую ветвь структурной схемы на графе рассматриваем отдельно.

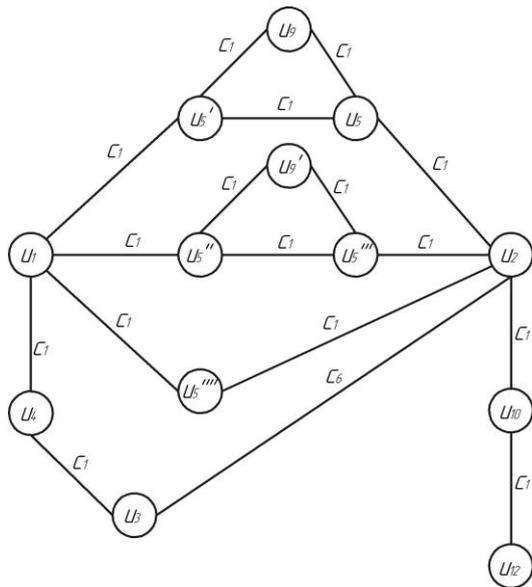


Рис. 8 – Взвешенный граф основных элементов и контактных взаимодействий блочных токарных резцов

Кортежи вершин, которые являются элементами структурных схем токарных блочно-модульных резцов, на взвешенном графе, соответствующие структурным схемам с выделением ветвей:

Ветвь Р (механизм закрепления элементов блочного резца): $K_P = K_{u1-u12} = \langle u_1, u_4, u_3, u_2, u_{10}, u_{12} \rangle$. Ветвь Х (элементы резца, воспринимающие силу P_x): $K_X = K_{u1-u12} = \langle u_1, u_5^I, u_9, u_5, u_2, u_{10}, u_{12} \rangle$. Ветвь Y (элементы резца, воспринимающие силу P_y): $K_Y = K_{u1-u12} = \langle u_1, u_5^{II}, u_9, u_5^{III}, u_2, u_{10}, u_{12} \rangle$. Ветвь Z (элементы резца, воспринимающие силу P_z): $K_Z = K_{u1-u12} = \langle u_1, u_5^{IV}, u_2, u_{10}, u_{12} \rangle$.

Таблица 3 – Таблица вершин графа структурных схем токарных блочных резцов

№ п.п.	Название деталей токарных блочных резцов	Обозначение вершины графа
1	Режущий элемент (РЭ)	u_1
2	Блок-вставка (БВ)	u_2
3	Винт (В)	u_3
4	Прихват, прижим (П)	u_4
5	Пластины опорные (ПО)	u_5
...
9	Элемент контроля (ЭК)	u_9
10	Державка (Д)	u_{10}
11	Прочие элементы (Х)	u_{11}
12	Резцедержатель станка (РС)	u_{12}

Таблица 4 – Таблица весовых коэффициентов взвешенного графа, построенного по структурной схеме токарных блочно-модульных резцов

№ п.п.	Наименование поверхностей контактного взаимодействия деталей блочных резцов	Весовой коэффициент
1	Плоскость-плоскость	c_1
...
6	Винтовая	c_6
...
12	Другое	c_{12}

Для определения доминирующих контактных взаимодействий в конструкции блочных резцов применяются матрицы смежности (см. [1 - 3]). По матрицам смежности можно заключить при помощи каких типов контактных взаимодействий связаны (речь идет о весовых коэффициентах) друг с другом различные детали (элементы) блочно-модульных токарных резцов. Вершина графа, в которую приходит больше всего ребер, представляет собой деталь блочного резца, обладающая большим набором поверхностей, а следовательно, и большим набором ЭС, предъявляемым к этой детали.

Автором, в работах [1 - 3], рассмотрен выбор и обоснование КП состояния поверхностей блочных резцов.

КП равномерного износа: При изготовлении поверхностей деталей необходимо обеспечить такое состояние трущихся поверхностей, которое гарантировало бы минимальный износ при эксплуатации инструмента, а так же постоянство коэффициента трения. Минимальный линейный износ и стабильность коэффициента трения будет обеспечиваться в случае выполнения равенств: $J_h \leq J, f_h \leq f$. Решив которые таким образом, чтобы в правой части оказались параметры, зависящие от технологического обеспечения, а в левой те из них, на которые процесс обработки не оказывает влияния, получим:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1 - \mu^2)}{E} = \frac{R_a}{K^I (S_m - R_a)}$$

Величиной R_a , стоящей в знаменателе правой части можно пренебречь, так как при механических методах обработки они на два порядка меньше величины S_m (в формуле значение в микрометрах):

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1 - \mu^2)}{E} = \frac{R_a}{K^I \cdot S_m}$$

Запишем левую часть данного уравнения в виде КП - И, характеризующего условие равномерного износа в различных стадиях обработки: $I = \frac{R_a}{K^I \cdot S_m}$. Значение

КП, обеспечивающего требуемое условие, определится из выражения: $[I] = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1 - \mu^2)}{E}$. Результаты

эксперимента, описанного в [1 - 3], показывают что при выполнении условия $I \leq [I]$ наблюдается меньший линейный износ и наиболее стабильное значение коэффициента трения.

КП долговечности опорных пластин режущих пластин: Одной из важных характеристик ин-

струментов является способность длительной работы их режущих пластин без разрушения, которые могут быть вызваны процессами усталости. После соответствующих преобразований выражений, аналогичных по смыслу предыдущим рассуждениям, но имеющих другую физическую сущность, которые решены его так, чтобы в правой части оказались параметры, формируемые при подготовке пластин, а в левой - не зависящие от технологического обеспечения:

$$\frac{1}{7,5 \cdot \gamma^{0,2}} \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) = \frac{K^1 \cdot S_{mv}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m}. \text{ Обозначим пра-}$$

вую часть через КП - D_T , характеризующий снижение порога усталости в зависимости от качества подготовки опорных поверхностей режущих пластин:

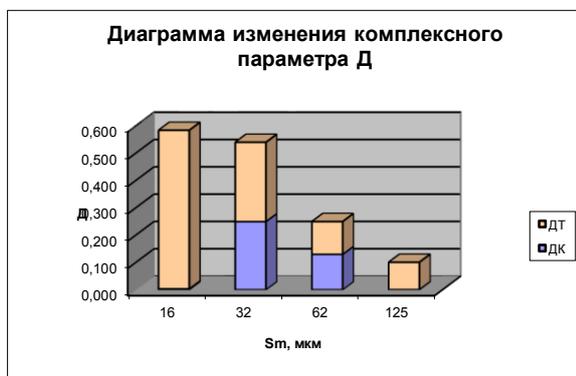
$$D_T = \frac{K^1 \cdot S_{mv}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m}. \text{ Левую часть обозначим } D_K \text{ (кон-}$$

структурское значение параметра):

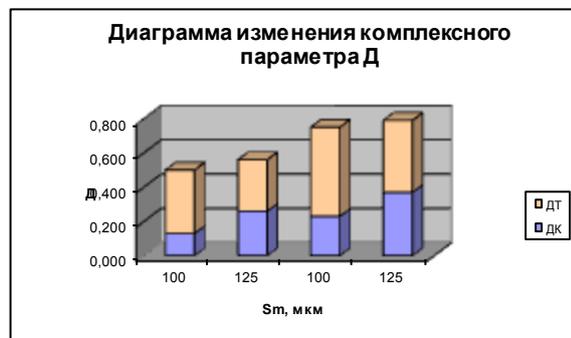
$$D_K = \frac{1}{7,5 \cdot \gamma^{0,2}} \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right). \text{ Тогда: } D_T = \frac{S_{mv}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} \text{ и}$$

$$D_K = 0,1 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right). \text{ С целью проверки теоретических}$$

результатов были проведены экспериментальные исследования. Результаты исследования параметров D_K и D_T приведены на рис. 9. При назначении данного КП всегда соблюдается соотношение $D_K \leq D_T$.



а



б

Рис. 9 – Диаграмма изменения комплексного параметра D: а – при изменении параметра S_m , при $W_a = 5$ мкм, $R_a = 0,63$ мкм; б – при изменении параметра S_m , при $W_a = 5$ мкм, $R_a = 2,50$ мкм

КП поверхностей деталей инструментов, работающих в упор: Необходимо стремиться создать состояние поверхности с минимально изменяющей свои параметры поверхностного слоя в процессе эксплуатации. Изменения параметров шероховатости, являющихся определяющими при оценке ЭС, будут минимальными при наступлении насыщения, которое определяется из условия: $Y_{nl} \geq 0,9 \cdot R_p$. Из теории контактного взаимодействия известно, что пластическая составляющая контактных перемещений равна:

$$Y_{nl} = \pi \cdot \left(\frac{2 \cdot P \cdot R_a \cdot W_z \cdot H_{\max}}{A \cdot K^1 \cdot \sigma_T} \right). \text{ Подставим величи-}$$

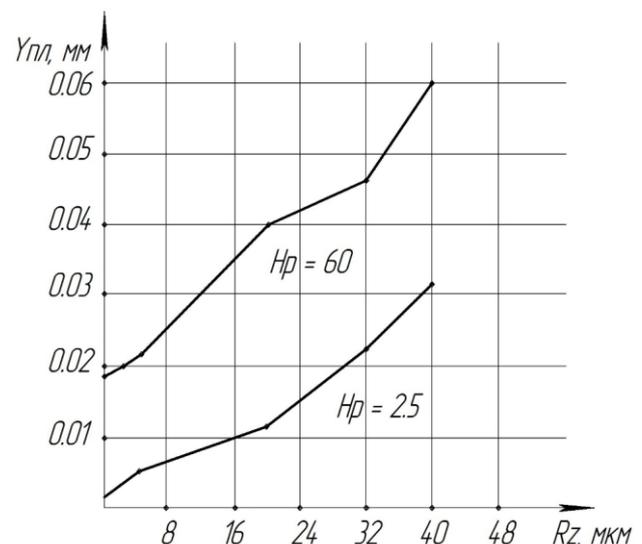
ны из первой формулы во вторую, заменив $R_p \approx 3 \cdot R_a$ и выполнив преобразования так, чтобы в левой части оказались величины не зависящие от технологического обеспечения, а в правой - формируемые в ходе из-

$$\text{готовления: } \frac{P}{A \cdot \sigma_T} \geq \frac{R_a^2 \cdot K^1}{W_z \cdot H_{\max}}. \text{ Представим правую}$$

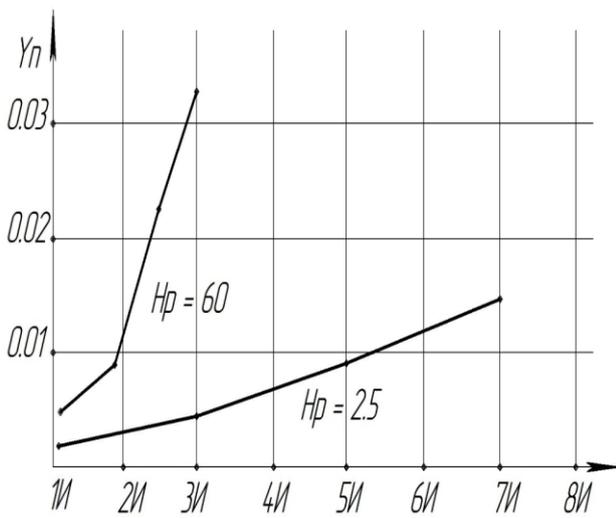
$$\text{часть в виде КП: } H = \frac{R_a^2 \cdot K^1}{W_z \cdot H_{\max}}.$$

$$\text{Тогда: } H = \frac{P}{A \cdot \sigma_T}. \text{ На рис. 10а показаны зави-}$$

симости изменения величины линейного смещения вершины резца Y_n после 100 смен блока, что соответствует 1 минуте работы поверхностей в режиме износа при скорости движения 8 м/мин, при регламентации параметра И. На рис. 10б регламентация проводилась по параметру R_z . Проведенное исследование резцов показывают, что такие показатели, как линейный износ при одних и тех же регламентируемых параметрах состояния поверхностного слоя, имели меньшую дисперсию рассеяния при использовании предлагаемых рекомендаций, чем в случае традиционной методики регламентации состояния контактируемых поверхностей.



а



б

Рис. 10 – Величина линейного смещения вершины реза: а – традиционная методика регламентации качества поверхности, б – регламентация при помощи КП; (H_p – высота сглаживания макроотклонений, мкм)

Выводы.

1. Состояние контактирующих поверхностей деталей оказывает значительное влияние на ЭС блочно-модульных инструментов, в особенности, оснащенных ЭК, применение которых предполагает процесс роботизации и создания "безлюдных" систем металлорежущего оборудования;

2. С целью обеспечения надежности и долговечности блочно-модульного инструмента целесообразно использовать КП состояния, характеризующие ЭС контактирующих поверхностей их деталей;

3. Рекомендации по применению КП состояния контактирующих поверхностей деталей блочно-модульных резцов повышают качество изготавливаемого инструмента;

4. Применение ФСА технологического обеспечения ЭС контактирующих поверхностей позволяет уменьшить вероятность ошибки и минимизировать затраты на его изготовление;

5. В настоящее время качество поверхности регламентируется параметрами в соответствии с ГОСТ 2.308-2011, 2789-73, их применение обуславливает многокритериальную регламентацию качества поверхности.

Кравцов Алексей Николаевич – аспирант каф. «Технологии машиностроения» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург (Россия), тел.: +7 (912)-2623576, E-mail: zao-oniks@yandex.ru.

6. Разработанная методика ФСА обеспечивает получение рекомендуемых КП состояния, при сохранении традиционных подходов к регламентации поверхности;

7. Решение задачи определения плотности вероятности для нескольких случайных величин и применение модели, использующей статистические данные, позволяет использовать методику ФСА для выработки решений по выбору метода обработки при обеспечении заданных ЭС;

8. Применение моделирования и формализация задачи открывает возможности использования ЭВМ для решения задач технологического обеспечения деталей блочно-модульных инструментов.

Результаты работы дают предпосылки для развития теоретических основ по технологическому обеспечению поверхностей с прогнозируемыми изменениями показателей, характеризующих ЭС.

Список литературы: 1. Мироненко Е.В. Проектирование блочно-модульных инструментов для тяжелых токарных станков [Текст] / Е.В. Мироненко, А.Н. Кравцов / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 299 с.: ил., табл.; - (Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). 2. Соломенцев Ю.М. Моделирование и оптимизация технологических процессов механической обработки [Текст] / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, О.И. Драчев, А.В. Капитанов, А.Н. Кравцов / Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) - Волгоград: ВолгГТУ; Тольятти: ОНИКС, 2013 – 457 с.: ил., табл.; - (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Общ. ред. Ю.М. Соломенцева). 3. Ключко А.А. Технологические основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / А.А. Ключко, А.Н. Кравцов / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 293 с.: ил., табл.; - (Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев).

Bibliography (transliterated): 1. Mironenko E.V., Kravcov A.N. *Proektirovanie blochno-modul'nyh instrumentov dlja tjazhelyh tokarnyh stankov*. Kramators – Irbit: DGMA – ONIKS, 2014. 299 p. Print. 2. Solomencev Ju.M., Mitrofanov V.G., Drachev O.I., Kapitanov A.V., Kravcov A.N. *Modelirovanie i optimizacija tehnologicheskikh processov mehanicheskoj obrabotki*. Volgograd – Tol'jatti: VolgGTU – ONIKS, 2013. 457 p. Print. 3. Klochko A.A., Kravcov A.N. *Tehnologicheskoe osnovy obespechenija processa zuboobrabotki zakalennyh krupnomodul'nyh zubchatyh koles*. Kramators – Irbit: DGMA – ONIKS, 2014. 293 p. Print.

Поступила (received) 02.03.2015

НОВЫЙ СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННОГО БАББИТОВОГО СЛОЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

В работе обоснована необходимость создания поверхностных слоев деталей машин с особыми свойствами для узлов трения скольжения. Исследования процессов формирования баббитовых покрытий, направленные на повышение их качества, своевременны и актуальны, а создание поверхностных слоев с особыми свойствами для узлов трения скольжения, в данном случае подшипников скольжения (ПС), является актуальной задачей. Полученное комбинированное электроэрозионное покрытие имеет минимальную толщину 250 мкм, а максимальную толщину 1,0 мм. Дальнейшее увеличение толщины слоя возможно, но не целесообразно вследствие увеличения времени обработки и снижения механической прочности баббита. Вкладыши подшипников скольжения, обработанные предлагаемым способом, имеют высокую надежность и долговечность при работе ПС так как на всех этапах формирования антифрикционного покрытия, обеспечивается прочная металлическая связь, как между подложкой и промежуточным слоем из меди, оловянной бронзы или олова, так и с последующим слоем из оловянного баббита.

Ключевые слова: электроэрозионное легирование, поверхностный слой, структура, баббит, вкладыш подшипника, медь, олово, бронза, микротвердость.

Введение. Одним из путей повышения надежности и долговечности работы машин и механизмов является решение проблемы повышения износостойкости и надежности их узлов трения. Повышение работоспособности поверхностей трения деталей машин, наряду с традиционными методами упрочнения, неразрывно связано с формированием специальных защитных покрытий, обладающих особыми свойствами: низким коэффициентом трения, повышенной износостойкостью и выдерживающих высокие удельные давления. Таким свойствам соответствуют подшипниковые сплавы, созданные на основе свинца, олова, цинка или алюминия, так называемые баббиты, которые наносятся, как правило на стальную подложку различными методами. Таким образом, исследования процессов формирования баббитовых покрытий, направленные на повышение их качества, своевременны и актуальны, а создание поверхностных слоев с особыми свойствами для узлов трения скольжения, в данном случае подшипников скольжения (ПС), является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и литературы. Традиционно баббитовые сплавы наносятся на основу вкладышей ПС различными способами, это: ручная заливка, центробежная заливка, под давлением, газотермическое напыление [1]. Как правило, во всех случаях основой для напыления является Ст.20 (ГОСТ 1050-88). Хотя могут использоваться и другие материалы, имеющие хорошую адгезию с оловом, такие, как Ст.10, Ст.15, бронза, латунь.

Наряду с традиционными способами изготовления и ремонта ПС появляются и новые, такие как гальваническое наращивание и штамповка в температурном интервале [2, 3].

В последние годы для нанесения антифрикционных покрытий все шире используется метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), который представляет собой перенесение материала на обрабатываемую поверхность искровым электрическим разрядом [4].

Способ имеет следующие специфические особенности: материал анода (легирующий материал) может образовывать на поверхности катода (легируемой поверхности) слой покрытия, чрезмерно крепко сцепленный с поверхностью, в этом случае не только отсутствует граница раздела между нанесенным материалом и металлом основы, но происходит даже диффузия элементов анода в катод; легирование можно осуществлять лишь в указанных местах, не защищая при этом остальную поверхность детали.

Наиболее близким к предлагаемому в настоящей работе является способ обработки вкладышей подшипников скольжения, заключающийся в лужении вкладышей и заливке в кокиль на подогретые до 250°C вкладыши под давлением и при температуре 450-480°C антифрикционного сплава из мягких металлов. Перед заливкой антифрикционного сплава на подлежащие заливке поверхности методом электроэрозионного легирования наносят промежуточный слой посредством электрода-инструмента из меди или оловянной бронзы при энергиях импульса 0,01-0,5 Дж с последующим образованием крепкого диффузионного слоя из меди или оловянной бронзы, при этом при лужении медь образует с оловом твердый раствор замещения, обеспечивая гарантированную металлическую связь [5].

Следует отметить, что все методы контроля заливки баббита не могут дать полной гарантии ее качества. Вкладыши подшипников скольжения, обрабо-

танные указанным способом, имеют недостаточную надежность и долговечность при их работе вследствие того, что при некачественной заливке может произойти разрушение баббита и как следствие отказ подшипника.

Кроме того, указанный способ является довольно трудоемким из-за процессов лужения и заливки.

Таким образом, **целью** работы является повышение качества вкладышей ПС, их несущей и нагрузочной способности, надежности и долговечности работы, а также снижение трудоемкости изготовления за счет того, что антифрикционный баббитовый слой формируют методом ЭЭЛ.

Для достижения поставленной цели в способе обработки вкладышей подшипников скольжения, включающем нанесение на вкладыши электроэрозионного покрытия из меди или оловянной бронзы методом электроэрозионного легирования с помощью электрода-инструмента при энергиях импульса 0,01-0,5 Дж, согласно предлагаемому способу вместо меди или оловянной бронзы с помощью электрода-инструмента на этих же режимах наносят покрытие из олова, причем медь, оловянную бронзу или олово наносят поэтапно, сначала на больших режимах при энергиях импульса 0,1-0,5 Дж затем на меньших - при энергиях импульса 0,01-0,05 Дж, после этого на сформированное покрытие наносят с помощью электрода-инструмента электроэрозионное покрытие из баббита для меди и оловянной бронзы поэтапно, сначала при энергиях импульса 0,01- 0,05 Дж, затем при энергиях импульса 0,1-0,4 Дж, а на покрытие из олова баббит наносят за один этап - сразу при энергиях импульса 0,1-0,4 Дж после чего, для повышения качества поверхностного слоя, проводят поэтапное электроэрозионное легирование с помощью электрода-инструмента графитовым электродом, причем сначала на больших режимах при энергиях импульса 0,2-0,4 Дж, затем на меньших - при энергиях импульса 0,05-0,15 Дж.

Методика исследований. Для проведения исследований использовались образцы из стали 20. Причем размером 15 x 15 x 6 мм (рис. 1, а) для металлографических и дюрOMETрических исследований, а 50 x 20 x 5мм (рис. 1, б) для определения наиболее рациональной производительности процесса ЭЭЛ при использовании различных материалов электродов.



а



б

Рис. 1 – Плоские образцы из стали 20: а – образец для металлографических и дюрOMETрических исследований; б – образец для определения наиболее рациональной производительности процесса ЭЭЛ при использовании различных материалов электродов.

Поверхности образцов шлифовались до Ra=0,5 мкм.

ЭЭЛ образцов производилось на установке с ручным вибратором модели «Элитрон – 22А». Основные режимы ее работы приведены в табл. 1.

В качестве электродов использовались: медь, оловянная бронза марки БрОФ10-1, олово, баббит Б88 и графит марки ЭГ-4 ОСТ 229-83.

Таблица 1 – Режимы работы установки модели «Элитрон 22-А»

No режима	Напряжение холостого хода $U_{х.х.}$, В	Рабочий ток I_p , А	Емкость накопительного конденсатора С, мкФ	Энергия разряда $W_{из}$, Дж
1	15	0,4-0,7	360	0,02
2	22	0,7-0,8		0,05
3	35	0,9-1,3		0,13
4	50	1,4-1,8		0,27
5	60	1,9-2,3		0,39
6	70	2,4-2,8		0,52

После изготовления шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюрOMETрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под различной нагрузкой.

Толщину слоя покрытия измеряли микрометром, а шероховатость поверхности – на приборе профилографе – профилометре мод. 250 завода «Калибр» путем снятия и обработки профилограмм. Сплошность покрытия оценивали визуально.

Для повышения качества формируемых покрытий после каждого этапа ЭЭЛ производилась обработка поверхности металлической щеткой.

После каждого этапа легирования, сформированное покрытие тщательно осматривалось с помощью лупы 6-ти кратного увеличения. Таким образом проводили оценку сплошности нанесенного слоя. В случае выявления необработанных участков процесс ЭЭЛ повторялся.

Результаты исследований

Формирование покрытия Ст20+Си+Б88

Изначально на поверхность образца наносилась медь. С целью формирования покрытия с максимальной сплошностью и минимальной шероховатостью

легирование проводили поэтапно, сначала при энергии импульса $W_p = 0,27$ Дж, затем при $W_p = 0,05$ Дж/ При этом толщина слоя снизилась с 0,08 до 0,05 мм, а шероховатость (Ra) с 10,4 до 6,2 мкм. Сплошность слоя составила 100% (рис. 2).



Рис. 2 – Образец стали 20 после ЭЭЛ медью

Следует отметить, что при нанесении меди на 2-м этапе с использованием более низкого режима легирования электрические разряды происходят по выступам шероховатости, нанесенного ранее слоя, в результате чего они частично разрушаются и деформируются, что приводит к снижению шероховатости поверхности и увеличению ее сплошности.

Электроды из меди периодически окисляются, что значительно сказывается на качестве формируемых покрытий. При длительном легировании появляются прижоги, электроды механически разрушаются и отдельные частички, размером до 0,2 мм привариваются к легируемой поверхности. Последующая обработка металлической щеткой устраняет возможные недостатки и таким образом значительно повышает качество сформированной поверхности.

Далее, на медное покрытие наносился баббит Б88.

Учитывая специфические особенности легирования баббитом и с целью формирования слоев с максимальной сплошностью, процесс формирования баббитового слоя протекал поэтапно.

Сначала, для получения 100% сплошности покрытия и последующего нанесения баббита с меньшей шероховатостью поверхности использовали режим с энергией импульса $W_p = 0,05$ Дж, а затем с $W_p = 0,27$ Дж.

Следует отметить, что при нанесении оловянно-го баббита на медную подложку с энергией импульса больше 0,05 Дж резко снижается качество покрытия (снижается сплошность и увеличивается шероховатость). Баббит переносится в виде отдельных капель, и чем больше энергия импульса, тем больше размеры капель и меньше сплошность покрытия.

Первоначально нанесенный слой баббита при энергии импульса $W_p = 0,05$ Дж аккумулирует тепло и увеличивает время растекания капли при нанесении последующего слоя баббита на больших режимах легирования.

На рис. 3 показана поверхность образца после ЭЭЛ баббитом при энергии импульса $W_p = 0,05$ Дж, а затем с $W_p = 0,27$ Дж.

Шероховатость поверхности при увеличении энергии импульса с 0,05 на 0,27 Дж возросла с 6,5 до 23 мкм, а толщина нанесенного слоя 0,08 до 0,42 мм.

Далее, с целью снижения шероховатости поверхности производилось ЭЭЛ покрытия графитовым электродом при $W_p = 0,39$ Дж, а затем при $W_p = 0,13$ Дж. Перед каждой обработкой графитом поверхность покрытия зачищалась щеткой.



Рис. 3 – Плоский образец стали 20 после ЭЭЛ медью и баббитом

При ЭЭЛ графитовым электродом электрические разряды протекают по выступам микронеровностей поверхности нанесенного ранее покрытия. При этом происходит их расплавление, снижение высоты микронеровностей и растекание материала покрытия на большую площадь, увеличивая тем самым сплошность баббитового покрытия. Общая толщина покрытия после легирования баббитом и последующей обработки графитовым электродом составила 0,35 мм, а шероховатость (Ra) 8,6 мкм.

Для получения более толстого слоя, электроэрозионное легирование с помощью электрода-инструмента из оловянного баббита, с последующей обработкой графитовым электродом можно неоднократно повторять, начиная с обработки при энергиях импульса 0,27 Дж. После трёх таких процедур можно получить суммарную толщину покрытия до 1 мм.

На рис. 4 показана структура антифрикционного баббитового покрытия с подслоем из меди, а на рис. 5 распределение микротвердости по глубине сформированного слоя.

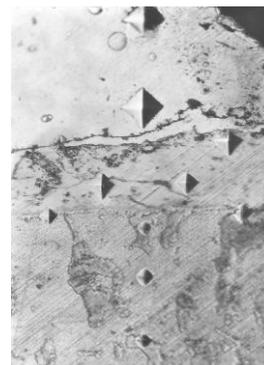


Рисунок 4 – Структура баббитового покрытия с медным подслоем на образце из стали 20, X 400.

Анализ структуры баббитового покрытия с медным подслоем показал, что сформированный слой состоит из 4-х зон. Самый верхний слой толщиной до 300 мкм и микротвердостью $H_u = 24-36$ кгс/мм² из баббита, ниже расположен слой из меди, глубина которого находится в пределах 50 мкм, а микротвердость $H_u = 75-85$ кгс/мм². Еще ниже, между медью и

сталью 20, располагается переходная зона глубиной 10 - 20 мкм и $H_{\mu} = 95 - 120$ кгс/мм². Далее, по мере углубления микротвердость плавно увеличивается до микротвердости зоны термического влияния (220-240 кгс/мм²) и затем переходит в микротвердость основного металла $H_{\mu} = 175-180$ кгс/мм².

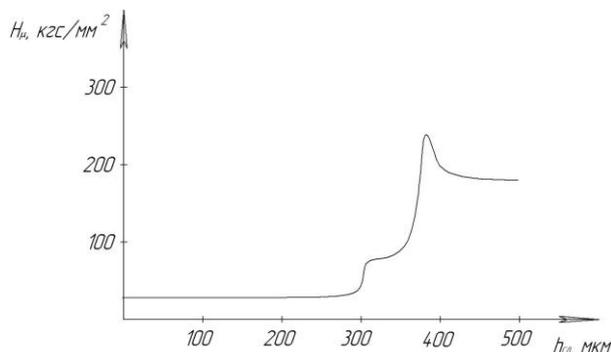


Рис. 5 – Распределение микротвердости по глубине сформированного антифрикционного слоя на подложке из стали 20

Формирование покрытия Ст20+ БрОФ10-1+Б88

Изначально на поверхность образца наносилась оловянная бронза. С целью формирования покрытия с максимальной сплошностью и минимальной шероховатостью легирование проводили поэтапно, сначала при энергии разряда $W_p = 0,13$ Дж, затем при $W_p = 0,05$ Дж. При этом толщина слоя снизилась с 0,10 до 0,05 мм, а шероховатость (Ra) с 30,2 до 7,3 мкм. Сплошность слоя составила 100% (рис. 6).



Рис. 6 – Образец стали 20 после ЭЭЛ оловянной бронзой

Далее, на бронзовое покрытие поэтапно наносился баббит Б88 с последующей обработкой графитом, причем и баббит и обработка графитом производились на тех же режимах и в той же последовательности, что и на образце с подслоем из меди.

Общая толщина покрытия после легирования баббитом и последующей обработки графитовым электродом составила 0,40 мм, а шероховатость (Ra) 8,6 мкм.

Для получения более толстого слоя, электроэрозионное легирование с помощью электроинструмента из оловянного баббита, с последующей обработкой графитовым электродом можно неоднократно повторять, начиная с обработки при энергиях импульса 0,27 Дж. После трёх таких процедур можно получить суммарную толщину покрытия до 1 мм.

Анализ структуры баббитового покрытия с подслоем из оловянной бронзы показал, что сформированный слой состоит из 4-х зон. Самый верхний слой толщиной до 350 мкм и микротвердостью $H_{\mu} = 24-36$ кгс/мм² из баббита, ниже расположен слой из оловянной бронзы, глубина которого находится в пределах 50-80 мкм, а микротвердость $H_{\mu} = 75-90$ кгс/мм². Еще ниже, между оловянной бронзой и сталью 20, располагается переходная зона глубиной до 10 мкм в которой, по мере углубления, микротвердость плавно увеличивается до микротвердости зоны термического влияния (250-300 кгс/мм²) и затем снижаясь переходит в микротвердость основного металла $H_{\mu} = 175-180$ кгс/мм².

Формирование покрытия Ст20+ Sn+Б88

Изначально на поверхность образца наносилось олово. С целью формирования покрытия с максимальной сплошностью и минимальной шероховатостью легирование проводили поэтапно, сначала при энергии разряда $W_p = 0,13$ Дж, затем при $W_p = 0,05$ Дж. При этом толщина слоя снизилась с 0,10 до 0,07 мм, а шероховатость (Ra) с 32,7 до 14,8 мкм. Сплошность слоя составила 100%.

На оловянное покрытие наносился баббит Б88 при $W_p = 0,27$ Дж.

Далее, с целью снижения шероховатости поверхности производилось ЭЭЛ покрытия графитовым электродом при $W_p = 0,39$ Дж, а затем при $W_p = 0,13$ Дж. Перед каждой обработкой графитом поверхность покрытия зачищалась щеткой.

Общая толщина покрытия после легирования баббитом и последующей обработки графитовым электродом составила 0,35 мм, а шероховатость (Ra) 8 мкм.

Для получения более толстого слоя, электроэрозионное легирование с помощью электроинструмента из оловянного баббита, с последующей обработкой графитовым электродом можно неоднократно повторять, начиная с обработки при энергиях импульса 0,27 Дж. После трёх таких процедур суммарная толщина покрытия составила 0,9 мм.

На рис. 7 показана структура антифрикционного покрытия после трех этапов нанесения баббита на образце из стали 20 с переходным подслоем из олова, а на рис. 8 представлено распределение микротвердости по глубине сформированного слоя.

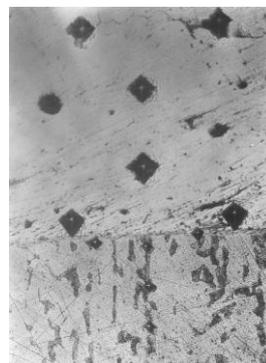


Рис. 7 - Структура антифрикционного баббитового покрытия с переходным подслоем олова на плоском образце из стали 20, X 200

Анализ структуры баббитового покрытия с подслоем из олова показал, что сформированный слой состоит из 3-х зон. Самый верхний слой толщиной до 900 мкм и микротвердостью $H_u = 24-36$ кгс/мм² состоит из баббита и олова, ниже располагается переходная зона глубиной до 10 мкм в которой, по мере углубления, микротвердость плавно увеличивается до микротвердости зоны термического влияния (200 - 220

кгс/мм²) и затем переходит в микротвердость основного металла $H_u = 175-180$ кгс/мм².

В табл. 2 представлены режимы поэтапного нанесения антифрикционных покрытий из оловянного баббита с подслоем из меди, оловянной бронзы и олова, а также толщина слоя и шероховатость поверхности на каждом этапе ЭЭЛ.

Таблица 2 – Качественные параметры и режимы ЭЭЛ при формировании покрытий из оловянного баббита с подслоем из меди, оловянной бронзы и олова

№ Этапа	Материал электрода	Импульс разряда, W_p , Дж	Производительность, см ² /мин	Шероховатость, Ra, мкм	Толщина нанесенного покрытия, мм
Сталь 20 + Cu + Б88					
1	Cu	0,27	2,0	10,4	0,08
2	Cu	0,05	1,0	6,2	0,05
3	Б88	0,05	1,0	6,5	0,08
4	Б88	0,27	2,0	23,0	0,42
5	Графит	0,39	3,0	16,4	0,38
6	Графит	0,13	1,3	8,6	0,35
7	Б88	0,27	2,0	24,3	0,74
8	Графит	0,39	3,0	16,7	0,71
9	Графит	0,13	1,3	9,1	0,70
10	Б88	0,27	2,0	23,6	1,04
11	Графит	0,39	3,0	16,2	1,02
12	Графит	0,13	1,3	8,7	1,00
Сталь 20 + БрОФ10-1 + Б88					
1	БрОФ10-1	0,13	1,3	30,2	0,10
2	БрОФ10-1	0,05	1,0	7,3	0,05
3	Б88	0,05	1,0	6,8	0,08
4	Б88	0,27	2,0	23,2	0,45
5	Графит	0,39	3,0	16,4	0,42
6	Графит	0,13	1,3	8,6	0,40
7	Б88	0,27	2,0	24,6	0,74
8	Графит	0,39	3,0	16,3	0,71
9	Графит	0,13	1,3	9,2	0,69
10	Б88	0,27	2,0	23,1	1,01
11	Графит	0,39	3,0	16,8	0,98
12	Графит	0,13	1,3	8,9	0,97
Сталь20 + Sn + Б88					
1	Sn	0,13	1,33	32,7	0,1
2	Sn	0,05	1,0	14,8	0,07
3	Б88	0,27	2,0	23,2	0,40
4	Графит	0,39	3,0	16,8	0,37
5	Графит	0,13	1,3	8,0	0,35
6	Б88	0,27	2,0	24,6	0,71
7	Графит	0,39	3,0	16,3	0,68
8	Графит	0,13	1,3	8,2	0,66
9	Б88	0,27	2,0	22,1	0,95
10	Графит	0,39	3,0	15,1	0,92
	Графит	0,13	1,3	8,0	0,90

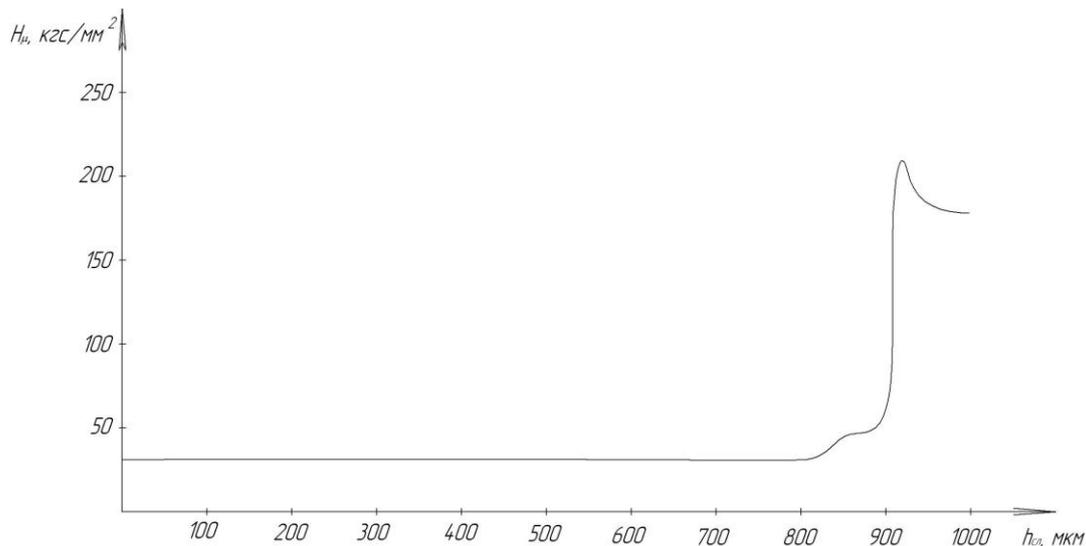


Рис. 8 - Распределение микротвердости по глубине покрытия из оловянного баббита с подслоем из олова на подложке из стали 20.

Следует отметить, что существенным недостатком баббитов является их малое сопротивление усталости, особенно при температуре более 100°C. С уменьшением толщины заливки подшипника сопротивление усталости увеличивается, при этом допускается минимальная толщина заливки баббита 0,25-0,4 мм.

Выводы. Таким образом, электроэрозионное покрытие воспринимает большую нагрузку в границах допустимого рабочего зазора подшипника скольжения вкладыш – вал, когда оно нанесено тонким слоем. Кроме того тонкое покрытие удешевляет способ изготовления вкладышей подшипника. Полученное комбинированное электроэрозионное покрытие имеет минимальную толщину 250 мкм, а максимальную толщину 1,0 мм. Дальнейшее увеличение толщины слоя возможно, но не целесообразно вследствие увеличения времени обработки и снижения механической прочности баббита. Вкладыши подшипников скольжения, обработанные предлагаемым способом, имеют высокую надежность и долговечность при работе ПС так как на всех этапах формирования антифрикционного покрытия, обеспечивается прочная металлическая связь, как между подложкой и промежуточным слоем из меди, оловянной бронзы или олова, так и с последующим слоем из оловянного баббита. Способ дает полную гарантию высокого качества полученных вкладышей. Кроме того, он проще по сравнению со способом, выбранным в качестве прототипа. Его можно применять как при изготовлении новых вкладышей подшипников скольжения, так и для их ремонта.

Тарельник Вячеслав Борисович – док. техн. наук, проф. СНАУ, Сумы, тел.: (050)-307-25-72, e-mail: tarelnik@i.ua;
Дзюба Александр Владимирович – аспирант, СНАУ, Сумы, тел.: (050)-585-62-46, e-mail: dzu-uba1989@gmail.com

Список литературы: 1. Галиахметов И.Г. Конструкционные материалы центробежных и винтовых компрессоров. Выбор и технология их применения / И.Г. Галиахметов. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2009. – 155 с. 2. Лебедева А.П. Восстановление деталей машин / А.П. Лебедева, Т.Н. Погорелова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с. 3. Барыкин Н.П. Изготовление подшипников скольжения с применением штамповки антифрикционного слоя в условиях кристаллизации и последующей пластической деформации / Н.П. Барыкин, Р.Ф. Фазлыахметов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2006. – №9. – С. 27-29. 4. Тарельник В.Б. Анализ технологий нанесения антифрикционных покрытий подшипников ковзання / В.Б. Тарельник, О.В. Дзюба // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, 2013. – Випуск 134. – С. 244-251. 5. Пат. 64613 Україна, МПК В23Н 1/00, 3/00, 5/00, F16С 33/04. Спосіб обробки вкладишів підшипників ковзання / Марцінковський В.С., Тарельник В.Б.; заяв. 17.07.2003; опубл. 16.02.2004, Бюл. №2.

Bibliography (transliterated): 1. Galiahetov I.G. *Konstrukcionnye materialy centrobezhnyh mashin i vintovyh kompressorov. Vybór i tehnologija ih primenenija*. Kazan': FEN, 2009. 155 p. Print. 2. Lebedeva A.P., Pogorelova T.N. *Vosstanovlenije detalej mashin*. Moscow: Mashinostroenie. 2003. 672 p. Print. 3. Barikin N.P., Fazyahmetov R.F. *Izgotovlenie podshipnikov skol'zhenija s primeneniem shtampovki antifrikcionnogo sloja v uslovijah kristallizacii i posledujušej plasticheskoj deformacii*. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. Moscow, 2006. №9. – pp. 27-29. Print. 4. Tarelnik V.B., Dzjuba O.V. *Analiz tehnologij nanesennja antifrikcijnih pokryttiv pidshipnikov kovzannja*. Khar'kov: Visnik khar'kovskogo nacional'nogo tehničnogo universitetu sil'skogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka. 2013. – No134. – С. 244-251. Print. 5. Marcinkovskij V.S., Tarelnik V.B. *Patent. 64613 Ukraine, MPK V23N 1/00, 3/00, 5/00, F16C 33/04. Sposib obrobki vkladishej pidshipnikov kovzannja*. *Reguest 17.07.2003; proclaim 16.02.2004 Buletен 2, 2004*. Print.

Поступила (received) 17.02.2015

ГЕОМЕТРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ГІПЕРБОЛІЧНОГО ПРОФІЛЮ ЗАДНЬОЇ ПОВЕРХНІ КРУГЛОГО ФАСОННОГО РАДІАЛЬНОГО РІЗЦЯ

У статті запропоновано геометричний розрахунок точок профілю гіперболічної форми задньої поверхні круглого радіального фасонного різця. Алгоритм розрахунку функціонально залежний від висоти установки різця і його максимального діаметру, а також профілю конічної деталі. Така конструкція різця дасть змогу найбільш точно відтворювати конічні поверхні деталей, які ним обробляють. У той сам час, пропонується різець має пласку передню поверхню, що є найбільш технологічно для підгострювання вказаного інструмента упродовж часу його експлуатації.

Ключові слова: різець, круглий радіальний фасонний різець, фасонне точіння, обробка конічних поверхонь, гіперболічний профіль, задній кут.

Актуальність проблеми. Нерідко у виробництві зустрічається потреба обробки одним інструментом деталей, у яких містяться поруч декілька різних конічних і циліндричних поверхонь. Такий технологічний підхід продиктований потребами високої продуктивності виробництва. Водночас точність таких виробів значною мірою залежить від точності інструмента та процесу формоутворення. Саме тому постає питання можливості застосування для таких цілей високопродуктивних фасонних радіальних різців, які спрофільовані так, щоб максимально точно здійснювалося формоутворення ними конічних і циліндричних поверхонь фасонних деталей.

Огляд досліджень і публікацій. Відомо, що як призматичні так і круглі радіальні фасонні різці з переднім кутом, який не дорівнює нулю, не забезпечують точної обробки конічних ділянок поверхні деталі. У теоретично точного різця кромка повинна бути лінією перетину площини передньої поверхні різальної частини і конічної поверхні деталі. Однак подібні різці є складними у виготовленні [1]. Із технологічних міркувань криволінійну різальну кромку замінюють на прямолінійну. Для уникнення похибок застосовують фасонні різці із подвійним нахилом передньої поверхні. Положення передньої поверхні вибирають таким, щоб вона перетинала вісь конуса. У такому разі призматичні різці забезпечують точну обробку конічних ділянок фасонних поверхонь. Круглі ж різці, вісь котрих є паралельною до осі деталі, все одно надають викривлення, оскільки під час обертання прямої різальної кромки навколо мимобіжної щодо неї осі інструмента створюється поверхня гіперboloїда обертання. Однак з технологічних міркувань профіль задньої поверхні різця приймається прямолінійним [1]. Щоб обробити конічну поверхню круглим різцем без похибок, його вісь встановлюють похило і пара-

лельно до твірної конуса, котру приймають за різальну кромку різця. Однак у такому разі не забезпечують точне виконання циліндричних поверхонь деталі.

У публікації [2] пропонує усунути вказаний недолік круглих радіальних фасонних різців шляхом загострення їх по криволінійній фасонній передній поверхні. Для визначення геометричних параметрів теоретично точного інструмента при цьому використовується графічний метод, який зображений на рис. 1 [2]. Прямолінійний профіль різця $k'm'$ виконаний за відомою і загальноприйнятою методикою. Таким чином, знаючи положення плоскої задньої поверхні різця, визначають його різальну кромку як лінію перетину цієї задньої поверхні і поверхні деталі. Для цього на рис. 1 застосовані допоміжні січення, які перпендикулярні до осі різця. Для прикладу січення II перетинається із задньою поверхнею різця по колу CE , а із поверхнею деталі по колу NC . Точка C є одночасно точкою перетину ліній CE і NC та точкою перетину різальної кроки різця і січення II . За цим методом [2] виконується пошук усіх інших потрібних для побудови профілю різальної кромки точок. Проекція різальної кромки $a'c'b'$ на площину проєкцій V — це шуканий профіль круглого фасонного різця, за допомогою якого можна теоретично точно виконати як конічні так і циліндричні ділянки поверхні деталі.

Використовуючи показану на рис. 1 графічну побудову отримуються аналітичні залежності для розрахунку координат довільної точки c' профілю передньої поверхні різця [2]

$$\begin{cases} x_c = r_c \cos(\varphi - \varphi_1) - r_a; \\ y_c = r_c \sin(\varphi - \varphi_1); \end{cases} \quad (1)$$

де

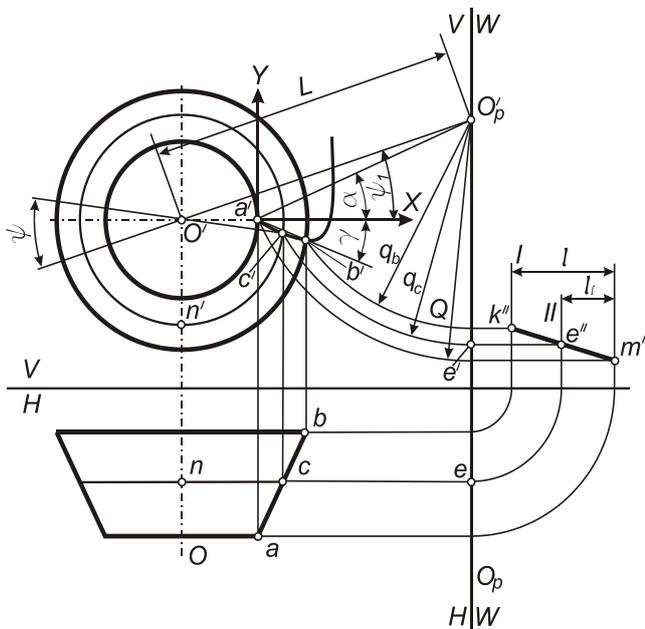


Рис.1 – Круглий радіальний фасонний різець із криволінійною передньою поверхнею.

$$r_c = r_a + (r_b - r_a) \frac{l_i}{l},$$

$$\cos \varphi = \frac{r_c^2 + L^2 - q_c^2}{2r_c L},$$

$$\tan \varphi_1 = \frac{Q \sin \alpha}{r_a + \cos \alpha},$$

$$L = \sqrt{r_a^2 + 2Qr_a \cos \alpha + Q^2},$$

$$q_c = Q - (Q - q_b) \frac{l_i}{l},$$

$$q_b = \sqrt{Q^2 + t^2 - 2Qt \cos(\alpha + \gamma)},$$

$$t = \sqrt{r_b^2 - (r_a \sin \gamma)^2 - r_a \cos \gamma}.$$

Вказаний алгоритм розрахунку профілю різальної кромки, очевидно може бути неприйнятним на підприємствах, котрі не мають технологічних можливостей здійснювати підгострення різців по передній поверхні за запропонованою згідно формули (1) криволінійною траєкторією.

Постановка задачі. Завдання полягає в тому, щоб спрофілювати круглий радіальний фасонний різець у такий спосіб, щоб за допомогою нього можна здійснювати максимальне точне формоутворення конічних і водночас циліндричних поверхонь і при цьому забезпечити технологічність його переагострення завдяки плоскій передній поверхні.

Виклад матеріалу дослідження. На рис. 2 запропоновано вирішення вказаної задачі графічним методом. Відображена деталь типу зрізаного конуса з віссю O , формоутворення якої передбачається здійснювати за допомогою круглого радіального фасонного різця з віссю O_p . Згідно із загально прийнятою ме-

тодиною графічної побудови у цілому і вказаних інструментів зокрема задній кут α у такому разі забезпечують за рахунок установки осі різця відносно осі деталі на відстані висоти установка h (див.рис.2). Максимальний радіус інструмента, як і на рис. 1 позначений літерою Q . Через вісь різця O_p і точку a' проведено фронтально проектуючу площину J , яка задана відповідним слідом J_f . Паралельно до неї через вісь O' деталі проведена площина G , яку задано слідом g_f . Площина G у перерізі із поверхнею деталі дасть відрізок прямої KM . Площина G у перетині із конічною поверхнею дасть гіперболічну лінію ACB , що асимптотично наближається до твірної конуса KM . У статті [3] йдеться про те, що відхилення гіперболи від асимптоти (твірної конуса) можна розрахувати за формулами, що стосуються крайніх точок зрізаного конуса, а також відхилення у довільній точці, яка відповідає точці, що лежить на поверхні деталі і має довільний радіус r_i .

Отже маємо точки A і D , що належать верхній і нижній основам зрізаного конуса і лежать на його поверхні. Радіуси конічної деталі у цих точках відповідно є: r_a і r_d . Точка A належить і деталі і інструменту. Згідно з формулами, що представлені у [3] вона є найбільш віддаленою від асимптоти точкою гіперболи, тож її зміщення відносно відповідної точки K позначене Δ_{\max} . Найменш віддаленою від асимптоти є точка B і тому її зміщення відносно відповідної їй точки E позначене Δ_{\min} . Довільна ж точка конічної поверхні розміщена на колі n , радіус якого становить r_i . Їй відповідними точками є C на площині J і M на площині G . Зміщення точки C відносно точки M позначене Δ_i . Тож застосувавши формули із [3] після, заміни кута γ на кут α , оскільки саме він визначає положення площин G і J , отримаємо наступні вирази

$$\Delta_{\max} = \frac{r_a \sin^2 \alpha}{(1 + \cos \alpha)}, \quad (2)$$

$$\Delta_{\min} = \frac{r_a^2 \sin^2 \alpha}{r_d + \sqrt{r_d^2 - (r_a \sin \alpha)^2}}, \quad (3)$$

$$\Delta_i = \frac{r_a^2 \sin^2 \alpha}{r_i + \sqrt{r_i^2 - (r_a \sin \alpha)^2}}. \quad (4)$$

Як відомо, величина заднього кута при застосуванні круглих радіальних різців залежить від максимального радіуса і висоти установки різця:

$$\cos \alpha = \frac{h}{Q},$$

де h — висота установки різця;

Q — максимальний радіус різця.

Із графічної побудови отримаємо наступні залежності

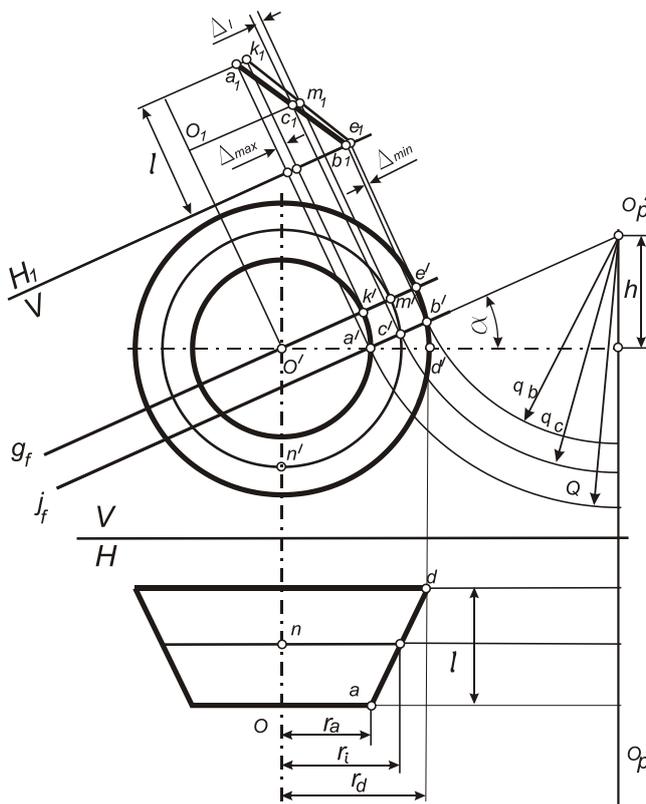


Рис. 2 – Круглий радіальний фасонний різець із гіперболічною задньою поверхнею.

$$|a'b'| = |k'e'| + \Delta_{\max} - \Delta_{\min},$$

$$|k'e'| = r_d - r_a.$$

Отже

$$|a'b'| = r_d - r_a + \Delta_{\max} - \Delta_{\min}.$$

Тоді знаходимо радіус різця, що відповідає точці В

$$q_b = Q - |a'b'| = Q - r_d + r_a - \Delta_{\max} + \Delta_{\min}. \quad (5)$$

Із аналогічних міркувань отримуємо залежності і щодо радіуса у точці С

$$|a'c'| = r_i - r_a + \Delta_{\max} - \Delta_i,$$

$$q_c = Q - |a'c'| = Q - r_i + r_a - \Delta_{\max} + \Delta_i. \quad (6)$$

Таким чином, за формулами (2)–(6) отримуємо усі необхідні точки гіперболічної кривої в осьовому перерізі інструмента, що відповідає профілю його

задньої поверхні. Передня площина може бути виконана під визначеним для конкретного завдання переднім кутом. Очевидно, що профіль різальної кромки у передній площині буде криволінійним.

Висновки. Отримані аналітичні залежності дають можливість спрофілювати круглий фасонний радіальний різець по його гіперболічній задній поверхні. Завдяки такому підходу формоутворення конічної поверхні деталі відбуватиметься теоретично точно, а при цьому:

— не потрібно застосовувати подвійний нахил передньої площини, що уможливило теоретично точно формувати одночасно тим самим різцем інші циліндричні і конічні поверхні;

— не потрібно застосовувати технологічно складне підгострення різця по криволінійній передній поверхні, а натомість здійснювати його по передній площині;

Розрахунок профілю задньої поверхні не вимагає наперед відомого значення переднього кута, що значно розширює простір у застосуванні інструмента, в умовах коли передбачаються зміни у режимах різання, а також у виборі матеріалів інструмента та заготовки.

Перелік літератури: 1. Родін П. Р. *Металлорежущие инструменты* [текст] : [учебник для студентов машиностроительных вузов] / П.Р. Родин. - К. : Вища школа, 1986. – 456с. 2. Родін П. Р. *Основы формообразования поверхностей резанием* [текст] : [учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов] / П.Р. Родин. - К. : Вища школа, 1977. – 192с. 3. Онисько О. Р. *Різьбові різці з відкоректованою за значенням переднього кута прямолінійною різальною кромкою* [текст] / О. Р. Онисько, В. Г. Панчук, В. В. Врюкало // Міжнародний збірник наукових праць «Прогресивні технології і системи машинобудування». – Донецьк.: ДНВЗ «Донецький національний технічний університет». – 2014. – No2(48). – С.10–14.

Bibliographi (transliterated) : 1. Rodin P. R. *Metallerezushchije instrumenty*. Kiev: Vyshcha shkola, 1986. – 456 p. Print. 2. Rodin P. R. *Osnovy formoobrazovaniya poverhnostiej rezaniem: uchebnoje posobije dlja mashynostroitelnyh vuzov*. Kiev: Vyshcha shkola, 1977. – 192 p. Print. 3. Onysko O. R. *Rizbovi riztsi z vidkorectovanoju za znachenniam perednioho kuta priamolinijnoju rizalnoju kromkoju*. Donetsk, 2014, No 2 p.10–14. Print.

Поступила (received) 12.03.2015

Віталій Георгійович Панчук — док. тех. наук, ІФНТУНГ, Івано-Франківськ; тел. 097 3306615, e-mail v_panch@ukr.net;

Шуфлін Васильович – студент, ІФНТУНГ, Івано-Франківськ; тел. 098 9545515.

Н.Р. Веселовська

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБГРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ВЕРСТАТНОГО КОМПЛЕКСУ З ЧПК В АЛЬТЕРНАТИВНИХ СИТУАЦІЯХ

Розроблені математичні моделі для обґрунтування алгоритмів прийняття рішення при діагностуванні верстатного комплексу з ЧПК в альтернативних ситуаціях та отриманні математичні описи інформаційних процесів при прийнятті рішення. Підкреслено, що проблема прийняття рішення складає суть будь-якої цілеспрямованої людської діяльності. Розроблена загальна структурна схема алгоритму прийняття рішення, а також алгоритму моделювання процесу діагностування, який повно відображає роботу всієї системи та включає в себе достатню кількість параметрів, забезпечує отримання статистичних даних про функціонування ОД (моделі), реагує на всі зміни в системі, відповідає всім вимогам простоти його використання при складанні програмного забезпечення. На основі якісного аналізу математичних моделей синтезовано та досліджено критерії, які алгоритмізують отримання оптимальних параметрів при застосуванні їх в промисловому виробництві.

Ключевые слова: математична модель, діагностування, верстатний комплекс з ЧПК, математичні описи, інформаційні процеси, алгоритм моделювання, програмне забезпечення, промислове виробництво.

Вступ. Комплексна автоматизація технологічних процесів вже давно є одним з найважливіших напрямків розвитку складних технологічних систем. Для останніх десятиріч характерний значний прогрес в автоматизації масового і багатосерійного виробництва машин, складальних одиниць і деталей в різноманітних галузях промисловості.

В галузі машинобудування за останні роки відбулися вагомні технічні і організаційні зміни, які пов'язані з появою нових засобів технологічного впливу, створенням нових видів гнучких виробничих систем (ГВС) з трудозберігаючою («безлюдною технологією»), широким і все більше наростаючим впровадженням в сферу виробництва обладнання з програмним керуванням і обчислювальної техніки. Це особливо актуальне для гнучких автоматизованих виробництв, функціонування яких неможливе без суттєвого підвищення надійності та ефективності складного прецизійного обладнання, а в першу чергу металорізальних верстатів. З одного боку – це високоєфективні машини, в яких впроваджено багато досягнень науки та техніки. З другого – це машини, які призначені для виготовлення та обробки деталей інших машин. Сам верстат перетворився на сучасному етапі в складний автоматизований агрегат з широкими можливостями для виконання різноманітних технологічних операцій, з використанням великої кількості різного інструменту та керуванням за допомогою електронно-обчислювальної машини (ЕОМ).

В сучасних умовах актуальною є задача проведення дослідних випробувань верстатів та вибору критерію оцінювання ефективності прийняття рішення про підвищення надійності технологічного облад-

нання при проведенні діагностування та якості деталей, які обробляються. При таких випробуваннях повинна бути перевірена результативність прийнятих рішень, вказані найбільш ефективні шляхи досягнення рівня якості та ефективності. В сучасному машинобудуванні основу гнучких виробничих систем складають верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), які забезпечують виконання різноманітних технологічних операцій металообробки.

Важливою є проблема розробки та використання засобів та методів технічного діагностування верстатного комплексу з ЧПК і математичних моделей для обґрунтування алгоритмів прийняття рішень при діагностуванні цього обладнання з метою підвищення ефективності і надійності роботи комплексу та якості деталей, які обробляються на ньому. Вирішення цієї актуальної проблеми пропонується автором.

Основна частина.

1. Алгоритм прийняття рішення як статистична задача перевірки гіпотез

Універсальність процедури прийняття рішень і математичного апарату, що застосовується при цьому, дозволяє в однакової мірі використати викладений нижче матеріал як при розробці структурної схеми взаємодії людини з технічними засобами, так і при виборі комплексу технічних засобів, кращого алгоритму рішення, критерію оцінки ефективності.

Проблема прийняття рішення складає суть будь-якої цілеспрямованої людської діяльності. При цьому для ситуацій, в яких відбувається вибір рішень, характерно:

1) Наявність цілі (цілей). Очевидно, що за відсутності цілі не виникає необхідності прийняття будь-якого рішення;

2) Наявність альтернативних ліній поведінки, тобто рішення приймаються в умовах, коли існує більше одного засобу досягнення поставленої мети;

3) Наявність обмежуючих факторів, які представляються трьома основними групами: економічні, технічні і соціальні фактори.

Отже, процес прийняття рішення – це перетворення вхідної інформації в вихідну. Загальну постановку задачі прийняття рішення можна сформулювати на основі: при заданих значеннях і характеристиках фіксованих неконтрольованих факторів $A_1, A_2, \dots, A_p, Y_1, Y_2, \dots, Y_q$ з урахуванням невизначених факторів Z_1, Z_2, \dots, Z_r знайти оптимальні значення

$X_{1opt}, X_{2opt}, \dots, X_{topr}$ з областей $\Omega_{X1}, \Omega_{X2}, \dots, \Omega_{Xl}$ їх допустимих значень, що подавали б максимуму (мінімуму) критерію оптимальності $F \rightarrow \max(\min)$.

Всю безліч проблем, що супроводжує будь-який процес прийняття рішень, умовно можна поділити на два класи: проблеми концептуального характеру, до яких відносяться складні логічні проблеми, і проблеми формально-математичного і обчислювального характеру, що грають допоміжну роль, як засіб полегшуючий і організуючий евристичну діяльність людей. Алгоритм прийняття рішень, в загальному випадку, є правилом, що ставить у відповідність кожному результату спостережень рішення, яке приймається. Структура простору можливих рішень може бути умовно визначена наступними ситуаціями: двоальтернативною, три альтернативною або багатоальтернативною, що вимагає прийняття одного з багатьох рішень. Функції витрат, що виникають при помилкових рішеннях, об'єктивно вибрати неможливо. При спробах виконання, відразу ж з'являються суб'єктивні елементи і потрібно припускати, що однозначного вибору немає. Однак відмітимо, що вказана трудність притаманна всім областям теорії, в якій модель узгоджується з реальною дійсністю, і тому всі неточності в визначенні функції витрат можна відносити до похибок побудови моделі. Проведемо дослідження алгоритмів прийняття рішень в альтернативних ситуаціях.

2. Математична модель алгоритму прийняття рішень в двоальтернативній ситуації

2.1. Оцінка статистичних характеристик (часу спостереження математичного сподівання, дисперсії)

Рішення при діагностуванні приймаються на основі аналізу поведінки вхідного параметра X_i за деякий проміжок часу $(0, T)$. Параметр X_i - це суміш повідомлень і адитивної випадкової стаціонарної завади. Практика показує, що тільки сингулярність вхідного процесу дозволяє миттєво приймати рішення про відповідність $m[x(t)]$ стану 0-1 з вірогідністю 1. (В подальшому будуть розглядатися регулярні проце-

си, поведінку яких передбачити з будь-якою заданою ймовірністю неможливо).

Обмежуючися розглядом адитивного і незалежного шуму, уявимо що приймаються дані СД у вигляді

$$x(t) = s(t) + \xi(x), \quad (1)$$

де $s(t)$ – функція повідомлення $\begin{cases} M_0[s(t)] = 0 \\ M_1[s(t)] = a \end{cases}$, $\xi(t)$ – функція завади $M[\xi(t)] = 0$.

Иходячи з того, що кінцевість часу спостереження $0 < T < \infty$ не дозволяє точно визначити $M[x(t)]$ в реальних випадках математичне сподівання оцінюватимемо величиною

$$M[x(t)] = M[\xi(t)] + \frac{1}{T} \int_0^T \xi(t) dt, \quad (2)$$

де $M[\xi(t)]$ - математичне сподівання завади; T - час спостереження.

Алгоритм визначення математичного сподівання (2) реалізується СД, при $T \rightarrow \infty, M_{cm}[\xi(t)] \rightarrow M[\xi(t)] \rightarrow 0$ і при $T \rightarrow \infty, M_{cm}[x(t)] \rightarrow M[s(t)] \rightarrow \begin{cases} 0 \\ a \end{cases}$.

Визначимо дисперсію математичного сподівання $\sigma_{c\xi}^2$: якщо існує в сенсі Римана інтеграл випадково-

го процесу $c = \int_a^\infty x(t) dt$ для кожної функції $x(t)$, то він

визначає деяке випадкове число c , якщо інтеграл не існує, то операцію інтегрування можна визначити у вигляді:

$$\lim M \left\{ \left[c - \sum_{i=1}^n x(t_i) \Delta t_i \right]^2 \right\}, \Delta t_i \rightarrow 0, \quad (3)$$

де c - визначається як межа суми або як інтеграл від $x(t)$ в середньоквадратичному сенсі.

Середнє значення c :

$$M(c) = \int_a^b M[x(t)] dt = \int_a^b \mu_x(t) dt, \quad (4)$$

$$c^2 = \int_a^b x(t_1) dt_1 \int_a^b x(t_2) dt_2 = \int_a^b \int_a^b x(t_1) x(t_2) dt_1 dt_2.$$

Тоді

$$M(c^2) = \int_a^b \int_a^b M[x(t_1) x(t_2)] dt_1 dt_2 = \int_a^b \int_a^b R_x(t_1, t_2) dt_1 dt_2. \quad (5)$$

Враховуючи, що

$$R_{ox}(t_1, t_2) = R_x(t_1, t_2) - \mu_x(t_1) \mu_x(t_2),$$

дисперсію можна визначити в вигляді

$$\sigma_c^2 = \int_a^b \int_a^b [R_x(t_1, t_2) - \mu_x(t_1) \mu_x(t_2)] dt_1 dt_2 = \int_a^b \int_a^b R_{ox}(t_1, t_2) dt_1 dt_2. \quad (6)$$

2.2. Формулювання двоальтернативної задачі прийняття рішення

Основний принцип двоальтернативної процедури зводиться до визначення стану параметра: «норма» - «немає норми». Умови задачі припускають апріорне знання: вигляду розподілу ОД; стаціонарності ОД і завад в процесі діагностування; апріорної ймовірності появи ситуації «немає норми»- P_0 , «норма»- P_1 ; платаної матриці функції витрат і вигравів при прийнятті помилкового і правильного рішення; функції витрат, які вносяться при прийнятті рішення і що визначаються неточністю процесу діагностування; аддитивності сигналу і завади; автокореляційної функції завади [36-37,46,53,60]. Результатом рішення задачі повинно передбачатися визначення оптимальних параметрів СД: часу прийняття рішення про віднесення

$x(t)$ до $\begin{cases} x_0(t) \\ x_1(t) \end{cases}$; грубості діагностування; еталонного

значення m_c параметра $x(t)$; ефективності процедури прийняття рішення. Оптимальність вказаних параметрів розглядається з позицій існування декількох можливих критеріїв, або відсутності апріорних відомостей, що визначаються наявністю векторів $\mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t)$. Визначення умовних ймовірностей помилок, що виникають в двоальтернативній ситуації, зводиться до обчислення інтегралів, наведених в третьому розділі, де помилка першого роду (умовна «неправдива тривога»), а помилка другого роду (умовний «пропуск сигналу»). Враховуючи, що з лінійності операції визначення математичного сподівання функцій $x_0(t), x_1(t)$ і диференціальні закони розподілу ймовірностей $W_0(x), W_1(x)$ - нормальні, вирази для визначення дисперсії математичного сподівання (6), послідовно запишемо:

$$\alpha = \int_{m_c}^{\infty} \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_0^2}(m - m_0)^2\right] dm \quad (7)$$

$$= \int_{m_c}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{m^2}{\frac{4T}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm,$$

$$\beta = \int_{-\infty}^{m_c} \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_0^2}(m - m_0)^2\right] dm \quad (8)$$

$$= \int_{-\infty}^{m_c} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m-a)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm.$$

Знання апріорних ймовірностей рішень «норма»- P_1 і «немає норми» - $P_0=1-P_1$, дозволяє визначити апостеріорні ймовірності помилкових рішень: P_{01} -

апостеріорну ймовірність помилки типу «пропуск сигналу», P_{10} - апостеріорну ймовірність помилки типу «неправдива тривога». Враховуючи елементи платаної матриці

$$L = \begin{pmatrix} L_{00} & L_{01} \\ L_{10} & L_{11} \end{pmatrix},$$

де L_{00} - плата при помилковому рішенні типу «пропуск мети»; L_{01} - плата при помилковому рішенні типу «неправдива тривога»; L_{10} - плата при правильному рішенні типу «ціль відсутня»; L_{11} - плата при правильному рішенні типу «ціль виявлена», ризик (витрати), що вносяться при прийнятті рішень, має вигляд:

$$r_0 = L_{01} \cdot P_1 \cdot \beta + L_{10} \cdot P_0 \cdot \alpha =$$

$$= L_{01} \cdot P_1 \cdot \int_{m_c}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{m^2}{\frac{4T}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm +$$

$$+ L_{10} \cdot (1 - P_1) \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{m_c} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m-a)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm.$$

Аналізуючи вираз (9) можна визначити можливі напрямки зниження ризику r : збільшення часу контролю T ; збільшення рівня сигналу «немає норми»; вибір еталонного, порогового значення m . Вартісні витрати, які вносяться старінням інформації, виражаються функціональною залежністю:

$$W_T(T) = Q_T T^{\mu_T}, \quad (10)$$

де $W_T(T)$ – витрати із-за старіння інформації; μ_T - коефіцієнт, що визначається виглядом діагностування; Q_T - коефіцієнт просторів час-вартість.

Вартісні витрати, що визначаються межею рівня сигналу $m=a$, в загальному випадку, представляються в вигляді

$$W_a(a) = Q_a a^{\mu_a}. \quad (11)$$

де $W_a(a)$ – витрати що визначаються неточністю при формуванні рівня сигналу, який діагностується a ; μ_a - коефіцієнт, що визначається виглядом діагностування; Q_a - коефіцієнт просторів рівнів діагностування-вартість.

Апріорні знання про означені витрати, що викликаються неточністю діагностування, можуть бути визначені тільки областю існування прийнятої неточності діагностування. При спільному розгляді виразів (9) - (11) з'являється ситуація, в якій повинні бути оптимально перерозподілені витрати в процесі діагностування: помилки, що виникають при діагностуванні, нешвидкодія і неточність СД. Враховуючи, що вимірності $r_0, W_T(T), W_a(a)$ однакові, природним критерієм оптимізації системи діагностування параметру можна вважати критерій

$$R = r_0 + W_T(T) + W_a(a), \quad (12)$$

де R - повний ризик при контролюванні параметра.

Критерій (12) являє собою різновид критерію Байеса, розповсюджений на систему діагностування з

урахуванням витрат, що викликаються старінням інформації і неточністю діагностування. Підставивши (9-11) в (12), одержимо критерій у вигляді:

$$R = L_{01} \cdot P_1 \times \int_{m_c}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{m^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm + L_{10} \cdot (1-P_1) \times \int_{-\infty}^{m_c} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m-a)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm + Q_T T^{\mu T} + Q_a a^{\mu a}, \quad (13)$$

де аргументами є технічні параметри системи діагностування: m_c - еталонне значення порогу параметра x , що діагностується; T - час діагностування; a - рівень стану параметра $S_1(t)$.

Відзначимо, що кількість аргументів може змінюватися в залежності від повноти апріорних знань (наприклад, може виявитися невідомою апріорна ймовірність появи сигналу «немає норми»- P). Мінімізуючи функціонал R , можна визначити оптимальні технічні параметри системи m_c , T , a , при яких витрати експлуатації системи будуть самими дешевими у вартісному відображенні. Доцільність застосування СД продиктована тим, що в процесі діагностування існує ймовірність прийняття правильного рішення про стан параметра $x_i(0-1)$. При цьому умовні ймовірності правильних рішень мають вигляд:

$$\gamma = \int_{-\infty}^{m_c} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{m_x^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm = 1 - \alpha = 1 - \int_{m_c}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{m^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm. \quad (14)$$

$$\delta = \int_{m_c}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m-a)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm = 1 - \beta = 1 - \int_{-\infty}^{m_c} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m-a)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm. \quad (15)$$

де γ - умовна ймовірність правильного рішення про стан «норма», δ - умовна ймовірність правильного рішення про стан «немає норми».

Повні надходження в вартісному відображенні з урахуванням апріорної ймовірності появи відмови (немає норми) P_0 і платіжної матриці мають вигляд

$$W_p = L_{00}(1-P_1)\gamma + L_{11}P_1\delta, \quad (16)$$

де L_{00} - надходження при прийнятті правильного рішення про стан «норма», L_{11} - надходження при прийнятті правильного рішення про стан «немає норми».

З урахуванням (16), (9) - (11) можна розрахувати чистий виграш при діагностуванні деякого параметра

$$W_b = W_p - R = L_{00}(1-P_1)\gamma + L_{11}P_1\delta - L_{01}P_1\beta - L_{10}(1-P_1)\alpha - Q_T T^{\mu T} - Q_a a^{\mu a}. \quad (17)$$

Припустивши, що діагностування параметру x є грою «проти природи» з початковою нульовою сумою, можемо вважати, не втрачаючи загальності, що

$$|L_{00}| = |L_{10}|; |L_{11}| = |L_{01}|. \quad (18)$$

При цьому

$$W_b = L_{01}(1-P_1)(1-\alpha) + L_{10}P_1(1-\beta) - L_{10}P_1\beta - L_{01}(1-P_1)\alpha - Q_T T^{\mu T} - Q_a a^{\mu a} = L_{01}(1-P_1) + L_{10}P_1 - 2L_{01}(1-P_1)\alpha - 2L_{10}P_1\beta - Q_T T^{\mu T} - Q_a a^{\mu a}. \quad (19)$$

2.3. Алгоритм оцінювання ефективності прийняття рішень при двоальтернативному діагностуванні

ОД оцінюється співвідношенням ефективність-вартість в вигляді

$$\Theta(t, \tau) = \frac{I_{\max}(t, \tau) \cdot C_{\min}(t, \tau)}{C_p(t, \tau)}. \quad (20)$$

Кількість інформації, отримана в процесі діагностування, визначається параметрами системи і апріорними відомостями про параметр x_i , що діагностується. При цьому початкова ентропія параметра

$$H_0 = -P_0 \log_2 P_0 - (1-P_0) \log_2 (1-P_0). \quad (21)$$

В результаті діагностування, ентропія H зменшується до рівня що визначається співвідношенням

$$H_1 = -P_0 \log_2 P_0 - P_b \log_2 P_b = -[P_0 \alpha + (1-P_0)\beta] \log_2 [P_0 \alpha + (1-P_0)\beta] - \{1 - [P_0 \alpha + (1-P_0)\beta]\} \log_2 \{1 - [P_0 \alpha + (1-P_0)\beta]\}. \quad (22)$$

α, β - визначаються за формулами (7) - (8) відповідно.

Тоді повна інформація, одержана в результаті діагностування, буде мати вигляд (23)

$$\begin{aligned}
I &= H_0 - H_1 = -P_0 \cdot \log_2 P_0 - (1-P_0) \cdot \log_2 (1-P_0) + \\
&+ \left\{ P_0 \int_{m_c}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}}} \exp \left[-\frac{m^2}{\frac{4}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}} \right] dm + \right. \\
&+ \left. (1-P_0) \int_{-\infty}^{m_c} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}}} \exp \left[-\frac{(m-a)^2}{\frac{4}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}} \right] dm \right\} \times \\
&\times \log_2 \left\{ P_0 \int_{m_c}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}}} \exp \left[-\frac{m^2}{\frac{4}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}} \right] dm + \right. \\
&+ \left. (1-P_0) \int_{-\infty}^{m_c} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}}} \exp \left[-\frac{(m-a)^2}{\frac{4}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}} \right] dm \right\} + \\
&+ \left\{ (1-P_0) \int_{m_c}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}}} \exp \left[-\frac{m^2}{\frac{4}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}} \right] dm + \right. \\
&+ \left. (1-P_0) \int_{-\infty}^{m_c} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}}} \exp \left[-\frac{(m-a)^2}{\frac{4}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}} \right] dm \right\} \times \\
&\times \log_2 \left\{ (1-P_0) \int_{m_c}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}}} \exp \left[-\frac{m^2}{\frac{4}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}} \right] dm + \right. \\
&+ \left. (1-P_0) \int_{-\infty}^{m_c} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}}} \exp \left[-\frac{(m-a)^2}{\frac{4}{T} \int_0^{\left(1-\frac{\tau}{T}\right) R_{0\zeta}(\tau) d\tau}} \right] dm \right\}. \quad (23)
\end{aligned}$$

де аргументами будуть виступати: P - апіорна ймовірність появи стану «норма»; m - еталонне значення порогу «норма»-«немає норми»; T - час діагностування; m_c - поточне значення $M[x(t)]$.

Наведені критерії і алгоритми прийняття рішення про віднесення стану деякого параметра x об'єкта діагностування до категорії «норма» і «немає норми». Ефективність використання відомостей про стан параметрів вектора об'єкта X визначається двома основними факторами: якістю програми перевірки діагностування і якістю засобів, що реалізують програму. Тому для визначення ефективності найбільш придатним є (2.14). Програма перевірки - складний логічний експеримент для перетворення інформації, яка виділяється в результаті вимірювань (прийняття рішень) станів параметрів $x_i (0 \leq i \leq m)$, $u_i (0 \leq i \leq s)$.

Результатом перевірки є визначення ймовірності виконання задачі об'єктом. Подібні логічні задачі відносяться до класу задач, які розглядаються в спеціальних розділах технічної діагностики і в даній роботі не розглядатимуться.

3. Математична модель алгоритму прийняття рішення в три альтернативній (багатоальтернативній) ситуації

3.1. Тriaльтернативна ситуація прийняття рішення як статистична задача

Кількість видів повідомлень в триальтернативній ситуації $n=3$, тобто при прийнятті рішення в вигляді: «норма»-«більше»-«менше». Сигнал на вході СД спостерігається деякий час T у вигляді корисного повідомлення і завади. Так як і в попередньому розділі припустимо, що завада стаціонарний процес, впливає на систему діагностування незалежно від повідомлення і змішується з повідомленням адитивно.

Відомо, що виділення корисних повідомлень в триальтернативній ситуації представляється в вигляді статистичної задачі, яка відповідає перевірці елементарної складної гіпотези.

Далі припускатимемо, що на вхід СД надходить сигнал вигляду

$$x_i(t) = s_i(t) + \xi_i(t), \quad (24)$$

де $s_i(t)$ - функція повідомлення; $\xi_i(t)$ - випадкова функція завади з нормальним законом розподілу.

Математичне сподівання сигналу $x_i(t)$ може набувати значень

$$\begin{aligned}
M_0[x_i(t)] &= 0, S_i(t) = 0, \\
M_a[x_i(t)] &= a, S_i(t) = a, \\
M_b[x_i(t)] &= -b, S_i(t) = -b
\end{aligned} \quad (25)$$

$$M_{ct}[x_i(t)] = M_{ct}[\xi_i(t)] + \begin{vmatrix} 0 \\ a, -b \end{vmatrix} = \frac{1}{T} \int_0^T \xi_i(t) dt + \begin{vmatrix} 0 \\ a, -b \end{vmatrix} \quad (26)$$

де $M_{ct}[\xi_i(t)]$ - математичне сподівання завади, визначене за вибіркою з обсягом T . Дисперсію завади можна визначити за формулою (6).

При прийнятті рішення про віднесення класу сигналу до однієї гіпотези типу «норма», «більше», «менше» можливі наступні помилки: 1) прийнята гіпотеза «норма» при передачі повідомлення «більше»; 2) прийнята гіпотеза «норма» при передачі повідомлення «менше»; 3) прийнята гіпотеза «менше» при передачі повідомлення «норма»; 4) прийнята гіпотеза «менше» при передачі повідомлення «більше»; 5) прийнята гіпотеза «більше» при передачі повідомлення «норма»; 6) прийнята гіпотеза «більше» при передачі повідомлення «менше».

Відповідно до означених помилок, визначають відповідні безумовні ймовірності помилок $P_{0+}, P_{0-}, P_{-0}, P_{-+}, P_{+0}, P_{+-}$. Безумовні ймовірності правильних рішень при цьому природно позначити: P_{00} - вірне прийняття повідомлення «норма», P_{++} - вірне прийняття повідомлення «більше», P_{--} - вірне прийняття повідомлення «менше». Апіорні ймовірності позначатимемо: P_0 - апіорна ймовірність повідомлення «норма»; P_+ - апіорна ймовірність повідомлення «більше»; P_- - апіорна ймовірність повідомлення «менше». Окрім цього, до апіорних

відомостей потрібно віднести знання платіжної матриці

$$L = \begin{pmatrix} L_{00}L_{0+}L_{0-} \\ L_{++}L_{+0}L_{+-} \\ L_{--}L_{-0}L_{-+} \end{pmatrix}, \quad (27)$$

де L_{00} - позитивна плата при правильному прийнятті повідомлення «норма», L_{++} - позитивна плата при правильному прийнятті повідомлення «більше», L_{--} - позитивна плата при правильному прийнятті повідомлення «менше», L_{0+} - негативна плата при помилковому прийнятті гіпотези «норма» замість гіпотези «більше», L_{0-} - негативна плата при помилковому прийнятті гіпотези «норма» замість гіпотези «менше», L_{+0} - негативна плата при помилковому прийнятті гіпотези «більше» замість гіпотези «норма», L_{+-} - негативна плата при помилковому прийнятті гіпотези «більше» замість гіпотези «менше», L_{-0} - негативна плата при помилковому прийнятті гіпотези «менше» замість гіпотези «норма», L_{-+} - негативна плата при помилковому прийнятті гіпотези «менше» замість гіпотези «більше».

Як апіорні відомості слід оцінювати задання функцій витрат, (аналогічно (10) - (11)), які вносяться:

1) старінням інформації $W_T(T) = Q_T \cdot T^{\mu T}$;

2) витратами, пов'язаними з неточністю вимірювань станів «менше», «більше»: $W_a(a) = Q_a \cdot a^{\mu a}$,
 $W_b(b) = Q_b \cdot b^{\mu b}$

3.2. Оцінка умовних імовірностей, ризику і виграшу при прийнятті рішення при триальтернативному діагностуванні

Визначаючи аналогічно платаній матриці, умовні імовірності помилок, можливих при прийнятті рішення про відповідність вхідного сигналу гіпотезі «норма», «більше», «менше» отримаємо:

1) $q_{0+} = \int_{m_-}^{m_+} W_+(m) dm$ - умовна ймовірність прийняття гіпотези «норма» при передачі повідомлення «більше»;

2) $q_{+-} = \int_{m_-}^{m_+} W_-(m) dm$ - умовна ймовірність прийняття гіпотези «норма» при передачі повідомлення «менше»;

3) $q_{-0} = \int_{-\infty}^{m_-} W_0(m) dm$ - умовна ймовірність прийняття гіпотези «менше» при передачі повідомлення «норма»;

4) $q_{+0} = \int_{m_+}^{\infty} W_0(m) dm$ - умовна ймовірність прийняття гіпотези «більше» при передачі повідомлення «норма»;

5) $q_{-+} = \int_{-\infty}^{m_-} W_+(m) dm$ - умовна ймовірність прийняття гіпотези «менше» при передачі повідомлення «більше»;

6) $q_{+-} = \int_{m_+}^{\infty} W_-(m) dm$ - умовна ймовірність прийняття гіпотези «більше» при передачі повідомлення «менше»;

7) $q_{00} = \int_{m_-}^{m_+} W_0(m) dm$ - умовна ймовірність правильного прийняття гіпотези «норма»;

8) $q_{++} = \int_{m_+}^{\infty} W_+(m) dm$ - умовна ймовірність правильного прийняття гіпотези «більше»;

9) $q_{--} = \int_{-\infty}^{m_-} W_-(m) dm$ - умовна ймовірність правильного прийняття гіпотези «менше».

Вважаючи відомими апіорні імовірності повідомлень «норма», «більше», «менше» (P_0, P_+, P_-) і знаючи, що закон щільності розподілу статистичного математичного сподівання має вигляд [13-17]

$$W(m) = \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{m^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right], \quad (28)$$

визначаємо апостеріорні імовірності помилок (29-35):

$$P_{0+} = P_+ q_{0+} = P_+ \int_{m_-}^{m_+} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m+a)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm ;$$

$$P_{0-} = P_- q_{0-} = P_- \int_{m_-}^{m_+} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m-b)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm ;$$

$$P_{-0} = P_0 q_{-0} = P_0 \int_{-\infty}^{m_-} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{m^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm ;$$

$$P_{+0} = P_0 q_{+0} = P_0 \int_{m_+}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{m^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm ;$$

$$P = P q = P \int \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m+a)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm ;$$

$$P_{+-} = P_- q_{+-} = P_- \int_{m_+}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m-b)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm ;$$

$$P_{-+} = P_{+q_{-+}} = P_{+} \int_{-\infty}^{m_{-}} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m+a)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm;$$

і апостеріорні ймовірності правильних рішень (35-37):

$$P_{00} = P_{0q_{00}} = P_{0} \int_{-\infty}^{m_{-}} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{m^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm;$$

$$P_{++} = P_{+q_{++}} = P_{+} \int_{m_{+}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m+a)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm;$$

$$P_{--} = P_{-q_{--}} = P_{-} \int_{-\infty}^{m_{-}} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}} \exp\left[-\frac{(m-b)^2}{\frac{4T}{T} \int_0^{1-\frac{\tau}{T}} R_{0\xi}(\tau) d\tau}\right] dm;$$

Враховуючи елементи платаної матриці (27), що визначають витрати і надходження, які вносяться тим або іншим типом помилкових і правильних рішень, визначаємо повний ризик і повні надходження при експлуатації триальтернативної СТД з корекцією діагностування

$$r = L_{0+} P_{0+} + L_{0-} P_{0-} + L_{-0} P_{-0} + L_{+0} P_{+0} + L_{+-} P_{+-} + L_{-+} P_{-+} \quad (38)$$

де r - ризик, який вноситься помилковими рішеннями, а $\Pi = L_{00} P_{00} + L_{--} P_{--} + L_{++} P_{++}$ - надходження при прийнятті правильних рішень.

Аналіз (38) дозволяє визначити можливі напрями зниження ризику: збільшення часу спостереження (обсягу вибірки) T ; збільшення неточності діагностування («відстані» m_{+} і m_{-}); вибір оптимальних еталонних значень m_{+} , m_{-} . Повний ризик при прийнятті рішення і повні надходження при діагностуванні відповідно мають вигляд:

$$R = r + W_T(T) + W_a(a) + W_b(b), \quad (39)$$

$$\Pi = L_{00} P_{00} \int_{m_{-}}^{m_{+}} W_0(m) dm + L_{++} P_{++} \int_{m_{+}}^{\infty} W_{+}(m) dm + L_{--} P_{--} \int_{-\infty}^{m_{-}} W_{-}(m) dm. \quad (40)$$

Вигідність застосування СД визначається як різниця між надходженнями та ризиком

$$W_B = \Pi - R = L_{00} P_{00} \int_{m_{-}}^{m_{+}} W_0(m) dm + L_{++} P_{++} \int_{m_{+}}^{\infty} W_{+}(m) dm + L_{--} P_{--} \int_{-\infty}^{m_{-}} W_{-}(m) dm - L_{0+} P_{+} \int_{m_{-}}^{m_{+}} W_{+}(m) dm - L_{-0} P_{-} \int_{m_{-}}^{m_{+}} W_{-}(m) dm - L_{+0} P_{0} \int_{-\infty}^{m_{-}} W_0(m) dm - L_{+-} P_{+} \int_{m_{+}}^{\infty} W_{+}(m) dm - L_{-+} P_{-} \int_{-\infty}^{m_{-}} W_{-}(m) dm - W_T(T) - W_a(a) - W_b(b). \quad (41)$$

3.3. Оцінка ентропії і інформації при прийнятті рішення в триальтернативній ситуації

В процесі діагностування в момент, що передуює прийняттю рішення, відомості про стан об'єкта характеризуються невизначенністю, початковою ентропією (інформацією). При цьому початкова ентропія визначається тільки апіорними ймовірнісними характеристиками об'єкта діагностування і цілком не залежить від засобу діагностування. Наприклад, якщо відомі апіорні ймовірності станів «норма», «більше», «менше», то початкова ентропія має вигляд

$$H_0 = -P_0 \log_2 P_0 - P_{+} \log_2 P_{+} - P_{-} \log_2 P_{-}. \quad (42)$$

Максимум початкової ентропії досягається при $P_0 = P_{+} = P_{-} = \frac{1}{3}$ в силу простору подій $P_0 + P_{+} + P_{-} = 1$. В результаті виконання триальтернативного діагностування ентропія стану параметра об'єкта, що діагностується зменшується і досягає деякого нового значення H . Значення кінцевої ентропії H визначаються, в свою чергу, ймовірностями помилкових і правильних рішень при прийнятті гіпотез

$$H_1 = -P_0 \log_2 P_0 - P_V \log_2 P_V. \quad (43)$$

Ймовірність виникнення помилки при виконанні діагностування дорівнює сумі апостеріорних ймовірностей помилок, а ймовірність правильних рішень визначається:

$$P_{vem} = P_0 \int_{m_{-}}^{m_{+}} W_0(m) dm + P_{+} \int_{m_{+}}^{\infty} W_{+}(m) dm + P_{-} \int_{-\infty}^{m_{-}} W_{-}(m) dm. \quad (44)$$

3.4. Дослідження алгоритму прийняття рішення при триальтернативному діагностуванні

В основу побудови алгоритму покладені найбільш узагальнюючі характеристики діагностування: інформація і вартість. Ефективність прийнятого рішення при вимірюванні з інформаційної точки зору можна обчислити так:

$$E_i = \frac{I}{I_{\max}} = \frac{I}{\sup H_0} = \frac{\sup H_0 - H_1}{\sup H_0}. \quad (45)$$

При цьому: 1) $E_i = 1$ - для ідеальної процедури прийняття рішення; 2) $0 < E_i < 1$ - для реальної процедури прийняття рішення; 3) E_i - для процедури, що не дасть рішення або внесе дезінформацію.

Пропускна спроможність (швидкодія) СД оцінюється інформаційним критерієм, перевагою якого є його спроможність оцінки динамічної ефективності і можливість порівняння декількох СД за їх пропускну спроможністю. Однак критерій має істотний недолік - неможливість вибору оптимальних параметрів СД, що є наслідком відсутності екстремуму (45). Екстремум можна відшукати тільки при накладенні на (45) обмежень. При цьому, у випадку лінійних обмежень, маємо задачу лінійного програ-

мування [116], а у випадку нелінійних - задачу нелінійного програмування.

Висновки. Відмічено, що в залежності від вигляду прийнятого рішення в істотній мірі залежить ефективність роботи всього комплексу: «об'єкт-система діагностування». Зроблено висновок, що синтез алгоритмів прийняття рішень СД базується на математичній теорії перевірки гіпотез і теорії інформації, а критерії формуються як конкретно поставлені оптимізаційні задачі.

Розроблені математичні моделі для обґрунтування алгоритмів прийняття рішення при діагностуванні верстатного комплексу з ЧПК в альтернативних ситуаціях та отримані математичні описи інформаційних процесів при прийнятті рішення. Підкреслено, що проблема прийняття рішення складає суть будь-якої цілеспрямованої людської діяльності. Розроблена загальна структурна схема алгоритму прийняття рішення, а також алгоритму моделювання процесу діагностування, який повно відображає роботу всієї системи та включає в себе достатню кількість параметрів, забезпечує отримання статистичних даних про функціонування ОД (моделі), реагує на всі зміни в системі, відповідає всім вимогам простоти його використання при складанні програмного забезпечення. Досліджено, що алгоритм прийняття рішення в статистичній задачі залежить від трьох елементів: класу щільності розподілу $W(x)$, якому за припущенням належить спостереження X ; структури простору можливих рішень Y ; форми функції витрат L_{01} , L_{10} і вирашів L_{11} , L_{00} , а структура простору можливих рішень може бути умовно визначена наступними ситуаціями: двоальтернативною, триальтернативною і (або) багатоальтернативною, що вимагає прийняття одного з багатьох рішень. На основі якісного аналізу математичних моделей синтезовано та досліджено критерії, які алгоритмізують отримання оптимальних параметрів при застосуванні їх в промисловому виробництві.

Список літератури: 1. Franksen O.I Structural Aspects of Control-lability and Observability-. Tensorial Aggregation, Franklin Institute, journal, 1979, vol 308 No2, P. 79 - 104. 2. Красовский А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами/ А.А.Красовский, В.Н.Буков, В.С. Шендрик // - М.: Наука, 1977, - 272с. 3. Кафаров В.В. Иерархическая модель и квазидинамический алгоритм оптимизации качества продукции дискретно-непрерывных химико-технологических систем / В.В.Кафаров, В.П.Мешалкин, А.М.Федосеев, А.И.Черепанов // Док. Академии наук СССР, 1983, том 270, No 3. - С. 145 - 160. 4. Пузырев В.А. Управление технологическими процессами производства микроэлектронных приборов / В.А.Пузырев // - М.: Радио и связь, 1984, - 160с. 5. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров // - М.: Химия, 1971, - 496 с. 6. Кунцевич В.М. О решении дискретных матричных уравнений Ляпунова, Риккати и их обобщений / В.М.Кунцевич, М.М.Лычак // Кибернетика No 3, 1980, - с. 13-18. 7. Лысогор В.Н. Опыт разработки и внедрения АСУ ТП производства электродного кокса в аппаратах периодического действия / В.Н.Лысогор // - М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1979, - 60с. 8. Веселовська Н.Р. Математична модель системи "Об'єкт діагностування-система діагностування" для автоматизованої системи технологічного обладнання / Н.Р. Веселовська // Вісник ВДСГП. - Випуск No2.-1998.- С.147-151. 9. Кузьмін І.Б. О

создании АСУ периодическими технологическими процессами / И.Б.Кузьмин, В.Н.Лысогор // Тезисы докладов: IX Всесоюзное совещание по проблемам управления. Ереван, 1983, - С. 349-350. 10. Кузьмин И.В. Модель стресса в человеко-машинных системах / И.В. Кузьмин // В кн. Информационные и моделирующие системы в электронике и электроэнергетике, Киев.: Наукова думка, 1980. - С. 190 - 202. 11. И.В.Кузьмин. Оценка эффективности и оптимизация автоматизированных систем контроля и управления / Кузьмин И.В. // - М.: Советское радио, 1971, - 294с. 12. Райевд К.А. Декомпозиция линейной модели объекта управления / К.А. Райевд // Труды Таллинского политехнического института. В кн. Расчет и проектирование систем технической кибернетики. Таллин, 1983, - с. 41-54. 13. Габелко К.Н. Последовательное улучшение многоэтапных процессов/ К.Н.Габелко // Автоматика и телемеханика No 12, 1974,- С.72 - 80. 14. Кузьмін І.В. Синтез алгоритму прийняття рішення в багатоальтернативній ситуації / І.В. Кузьмін, Н.Р. Веселовська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.- No3. -1998.- С. 107-110. 15. Основы моделирования сложных систем. Под ред. И.Б.Кузьмина, Киев.: Вища школа, 1981. - 360 с. 16. Управляющие вычислительные машины в АСУ технологическими процессами. Под ред. Т.Харрисона, I том.- М.: Мир, 1975. - 530 с. 17. Сейдж Э.П. Оптимальное управление системами / Э.П. Сейдж, Ч.С. Уайт // - М.: Радио и связь, 1982. - 392с. 18. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука / Р. Шеннон // - М.: «Мир», 1978.- 418 с.

Bibliography (transliterated): 1. Franksen O. I *Structural Aspects of Control-lability and Observability*. Tensorial Aggregation, Franklin Institute, journal, 1979, vol 308, No. 2, P. 79-104. 2. A. Krasovskiy, V. N. Beeches, V. S. Shendrik. *Universal algorithms of optimal control of continuous processes* - Moscow: Nauka, 1977, - 272 p. 3. The AK. V. V. Kafarov, V. P. Meshalkin, A. M. Fedoseev, A. I. Cherepanov. *The hierarchical model and quotidianamente algorithm optimization of product quality discrete-continuous chemical-technological systems*. Doc. Acad. of Sciences of the USSR, 1983, vol 270, No. 3. P.145 - 160. 4. V. Puzyrev. *Management of technological processes in the production of microelectronic devices*. - Moscow: Radio and communication, 1984, - 160 p. 5. V. V. Kafarov. *Methods of Cybernetics in chemistry and chemical technology*. - Moscow: Chemistry, 1971, - 496 p. 6. 24. V. M. Kuntsevich, M. M. Lychak. *The solution of the discrete Lyapunov matrix equations, Riccati and their generalizations*. Cybernetics, No. 3, 1980, P. 13-18. 7. V. N. Lisogor. *Experience in the development and implementation of automated process control system for production of electrode coke in the apparatus of periodic action*. - Moscow: Tsniitneftehim, 1979, - 60 p. 8. Veselovska N. P. *Mathematical model of the system "Ob CT Dagestana system Dagestana" for automatizovano systems technologiczne namely*. - the Bulletin VDSG. - Issue No. 2.-1998.- P. 147-151. 9. I. B. Kuzmin, V. N. Lisogor. *About ACS periodic technological processes. Abstracts: IX all-Union conference on problems of management*. Yerevan, 1983, P. 349-350. 10. I. V. Kuzmin. *A model of stress in human-machine systems* - In proc. Information and modeling systems in electronics and power engineering, Kiev.: Naukova Dumka, 1980, P. 190 - 202. 11. I. V. Kuzmin. *Performance evaluation and optimization of automated systems of control and management*. - Moscow: Soviet radio, 1971, - 294 p. 12. K. A. Rigaud. *Decomposition of the linear model of the control object*. *Proceedings of the Tallinn Polytechnic Institute*. In proc. Calculation and design systems engineering Cybernetics. Tallinn, 1983, P. 41-54. 13. K. N. Gabelko. *Gradual improvement of multi-stage processes*. *Automation and remote control*. No. 12, 1974, P. 72-80. 14. Cousin I. In. Veselovska N. P. *The synthesis algorithm pinatta Committee in bagatellisation situat Vimruntime obsoletely machinery in technologiczny behaviors*. - No. 3. -1998.-P. 107-110. 15. *Basic modeling of complex systems*. Edited by I. B. Kuzmin, Kiev.: High school, 1981. - 360 p. 16. *Control computers in automated control systems of technological processes*. Edited by T. Harrison, I volume.- Moscow: Mir, 1975, - 530 p. 17. E. P. Sage And C. S. White. *Optimal control systems*.- Moscow: Radio and communication, 1982, - 392 p. 18. Shannon R. *System simulation - the art and science*.- Moscow: Mir, 1978.- 418 p.

Поступила (received) 14.03.2015

Веселовська Наталія Ростиславівна – док. техн. наук, проф. ВНТУ, Вінниця

СТРАТЕГИЧЕСКАЯ И ОПЕРАТИВНАЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Решение задачи разработки проекта автоматизации деятельности производственных служб машиностроительного предприятия направлено на оптимизацию и автоматизацию и имеет стратегическое важное влияние на перспективность деятельности самого предприятия.

В статье рассмотрена задача разработки проекта автоматизации деятельности планово-экономического отдела машиностроительного предприятия. Задача решается в рамках условия сокращения времени на выполнение документооборота отдела. Предложено изменение в функционировании подразделения. Рассмотрены возможные пути решения поставленной задачи на основе использования рекомендуемой технологии управления предприятием с применением системы «Галактика». Ввод в эксплуатацию системы "Галактика" обеспечивает автоматизацию технико-экономического планирования и статистики, перспективных и текущих планов производства по предприятию по установленному перечню технико-экономических показателей, разработке годовых, квартальных и месячных планов цехов машиностроительного предприятия.

по установленному перечню технико-экономических показателей.

Ключевые слова: автоматизация, производственные службы, машиностроительное предприятия, оптимизация, технология управления, технико-экономическое планирование.

Введение. Новая экономическая и деловая среда характеризуется частыми технологическими прорывами, быстро меняющимися правилами игры на рынке, и формированием нового покупателя, который приспособился к этим быстрым переменам и приоритеты которого стали меняться со скоростью показа телевизионных реклам.

Отличительными особенностями успешных компаний являются гибкость, специализация, новаторство, глубокое понимание потребительских предпочтений, а также активное использование информационных технологий, которые играют определяющую роль в использовании передовых бизнес-моделей и в реализации стратегических целей. Они позволяют снизить операционные издержки и повысить рентабельность бизнеса.

Решение задачи разработки проекта автоматизации деятельности планово-экономического отдела является актуальным не только для машиностроительного предприятия, но и для любого современного предприятия. Т.к. оптимизация и автоматизация деятельности планово-экономического отдела имеет стратегически важное влияние на перспективность деятельности самого предприятия.

В статье эта актуальная задача решается на примере планово-экономического отдела машиностроительного предприятия на основе использования технологии управления предприятием с применением системы «Галактика».

Качественная постановка задачи.

Таким образом, существует актуальная задача разработки проекта автоматизации документооборота планово-экономического отдела (ПЭО) машиностроительного предприятия для сокращения

времени выполнения бизнес-процессов. Тогда постановка задачи формулируется следующим образом: разработать проект автоматизации деятельности планово-экономического отдела на примере планово-экономического отдела машиностроительного предприятия.

Цель разработки проекта автоматизации заключается в создании инструмента, который помогает персоналу и руководству подразделения и предприятия в целом в стратегическом и оперативном управлении бизнес-процессами.

Следует отметить, что документооборот предприятия основан на использовании форм и первичных и отчетных документов, общепринятых на Украине для делопроизводства, сферы управления и учета. Используемые нестандартные формы документов – это формы документов для внутреннего использования, которые предназначены для первичного обобщения данных с целью подготовки стандартных результатов документов.

ПЭО машиностроительного предприятия является самостоятельным структурным подразделением, создается приказом директора и подчиняется заместителю директора по экономике и финансам. Отдел возглавляет начальник, который назначается и освобождается от занимаемой должности директором предприятия по представлению заместителя директора по экономике и финансам.

На рис. 1 представлена структура планово-экономического отдела предприятия.

В рамках решения данной задачи были изучены все бизнес-процессы бюро технико-экономического планирования и статистики, бизнес-процессы бюро ценообразования и анализа цен на закупаемые



Рис. 1 – Структура планово-экономического отдела предприятия

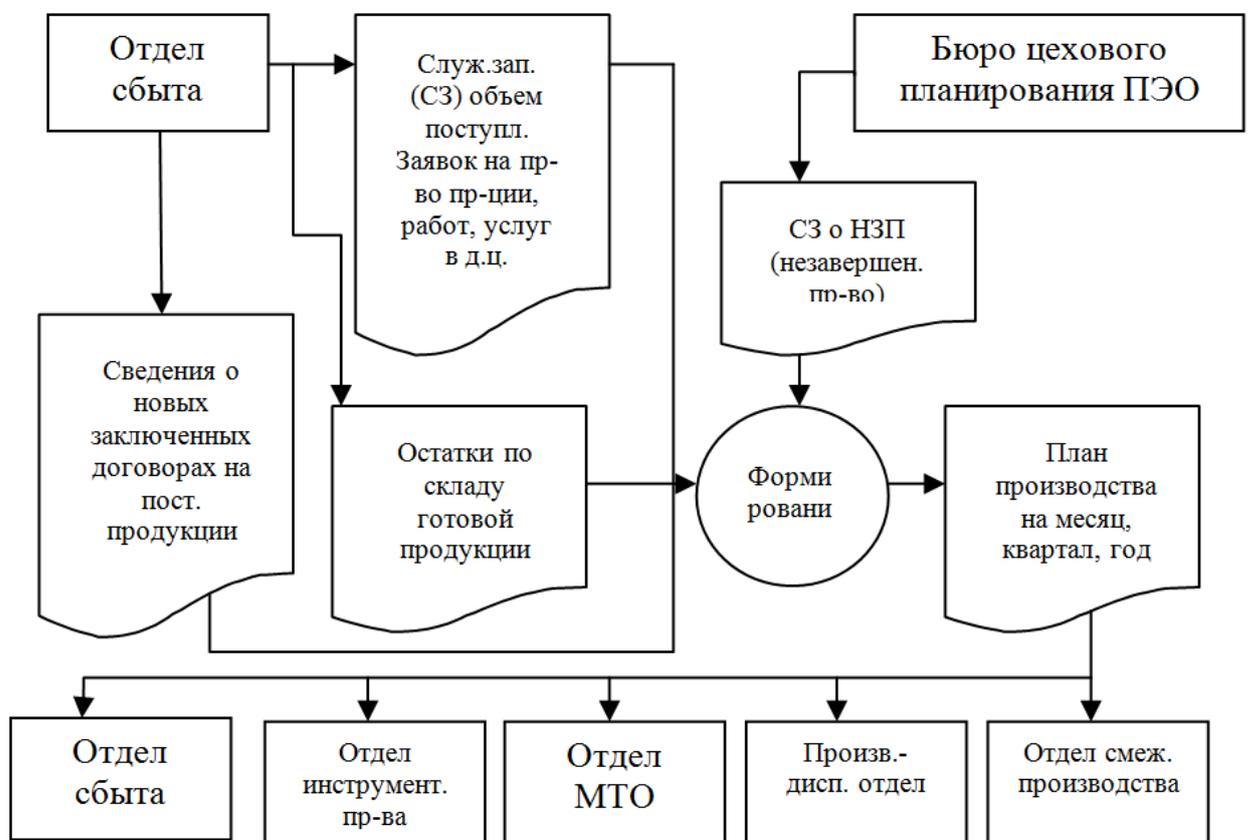


Рис. 2 – Бизнес-процесс разработки перспективных и текущих планов производства предприятия по установленному перечню технико-экономических показателей

материалы, а также бизнес-процессы бюро цехового планирования.

На рис. 2 представлен анализ деятельности планово-экономического отдела на примере одного из бизнес-процессов бюро технико-экономического планирования.

Был изучен, проанализирован и детализирован документооборот ПЭО по подразделениям. В табл. 3 приведен фрагмент сводной таблицы, отображающей документооборот технико-экономического планирования и статистики планово-экономического отдела.

Вся информация, полученная в ходе исследования деятельности ПЭО машиностроительного предприятия, была проанализирована с точки зрения концепции классического цикла управления предприятием, представленного на рис. 4.

Ввод в эксплуатацию КИС "Галактика" обеспечит автоматизацию следующих функций бюро технико-экономического планирования и статистики ПЭО:

1. Разработка перспективных и текущих планов производства по предприятию по установленному перечню технико-экономических показателей.

Таблица 1 – Документооборот технико-экономического планирования и статистики планово-экономического отдела

№ п/п	Наименование документа	Документы, которые формируются на основании этого документа	Подразделения из которых поступает документ	Периодичность
	согласованной заявки			
4	Сведения о новых заключенных договорах на поставку продукции	План производства на год, квартал, месяц	Отдел сбыта	Ноябрь, декабрь, январь, февраль и 2р. в мес.
5	Остатки готовой продукции (по складам и цехам)	План производства на год, квартал, месяц	Отдел сбыта, Сборочный цех	1 раз в месяц
6	Данные по оплате труда по шифрам видов оплат (в разрезе подразделений Предприятия и категориям рабочих) ФОТ по типографии	Ф 1-ПВ и ТЭП отчет для Министерства промышленности политики Украины	Отдел АСУП	Ежемесячно
7	ФОТ по трудовым соглашениям, сумма фондовых путевок ФОТ редакции, з/у по видам оплат, сумма премий по профкому, ФОТ по профкому	Ф 1-ПВ и ТЭП	Бухгалтерия	Ежемесячно
8	Накладные по сдаче готовой продукции на склад	Ф 1-П и ТЭП	Сборочный цех, Механосборочный цех	Ежедневно
9	Служебная записка по позициям, указанным для отчета в Областное управление статистики (металлургический отчет)	Ф 1П	Цех литья, горячей обработки, Цех резинотехнических изделий	Ежемесячно
10	Служебная записка по объему поступления заявок на производство продукции, работ, услуг. в д.ц.	Ф 1П	Отдел сбыта	До 1 числа мес.

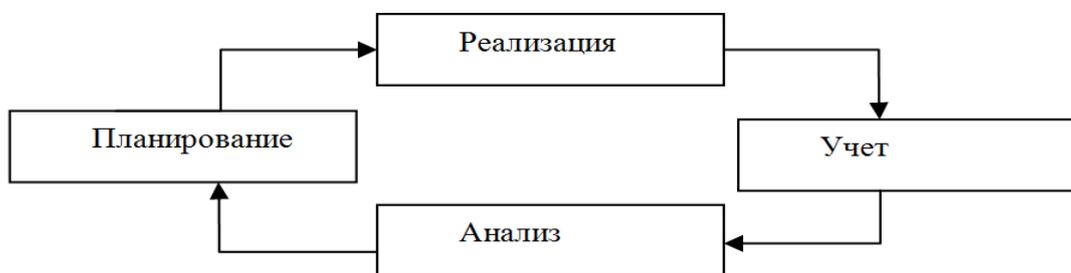


Рис. 3 – Последовательность автоматизации участков учета

2. Разработка годовых, квартальных и месячных планов цехов по установленному перечню технико-экономических показателей.

3. Анализ договоров составленных отделом сбыта, на соответствие поставок требованиям по количеству, срокам и ценам изделий и комплектов.

4. Подготовка материалов за отчетный период для подведения итогов на заседании хозрасчетной комиссии.

5. Формирование отчетности для предоставления в Министерство промышленной политики Украины, Областное статистическое управление, Районное статистическое управление.

6. Расчет плановой себестоимости товарной продукции по номенклатуре изделий в разрезе статей калькуляции на единицу продукции и на планируе-

мый объем товарной продукции. Расчет плановой себестоимости в разрезе смет затрат.

7. Техничко-экономическое обоснование (расчет плановой рентабельности) освоения новых видов продукции, получения инвестиций в развитие и совершенствование производства (определение сроков окупаемости инвестиций).

8. Формирование отчетов для анализа основных технико-экономических показателей деятельности предприятия.

9. Формирование отчетов для анализа фактической себестоимости товарной продукции в разрезах статей калькуляции и смет затрат.

10. Расчет ФОТ по предприятию в целом и по категориям рабочих промышленно производственного персонала (ППП).

11. Формирование отчетов для анализа НЗП в разрезе производственных подразделений и по принадлежности в целом.

12. Формирование цен на ТП.

Бюро технико-экономического планирования и статистики является центром обработки информации, который выполняет вышеуказанные функции. Выполнение этих функций связано с формированием отчетов и выполнением расчетов без ввода первичной информации, которая вносится в систему в других подразделениях. Автоматизация работы бюро достигается применением модуля «ТЭП». В ходе выполнения своих функций, бюро должно осуществить выпуск и расчет приблизительно 25 исходящих документов. Так как процесс планирования является итерационным процессом, то для выпуска одного документа необходимо произвести порядка 5-6 промежуточных или вариационных расчета. Среднее время такого расчета порядка 1 часа. Соответственно загрузка составит $(25 \text{ документов} / 22 \text{ рабочих дня}) * 5 \text{ итераций} * 1 \text{ час/итерацию} = 6 \text{ часов}$. При продолжительности рабочего дня 8 часов такую загрузку позволяет реализовать 1 лицензия (доступ к базе данных) модуля «ТЭП». Выполнение функции данных модуля «ТЭП». Выполнение функции «Анализ договоров составленных отделом сбыта, на соответствие поставок требованиям по количеству, срокам и ценам изделий и комплектов» требует наличие 1 лицензии модуля «Управление договорами» для получения доступа к информации о заключенных договорах.

Автоматизацию функций бюро, связанных с разработкой и анализом выполнения комплексных перспективных и текущих (месячных, квартальных, годовых) планов развития предприятия, обеспечивает модуль «ТЭП» контура управления производством КИС «Галактика».

Следует отметить, что выполнение функций бюро во многом зависит от первичной информации, формируемой в других подразделениях предприятия (УМТС, отдел сбыта, отдел маркетинга, отдел главного конструктора, отдела главного технолога, бухгалтерия, ОТЗ), исходя из этого, рекомендуется внедрение системы в бюро на четвертом этапе автоматизации предприятия.

Для выполнения своих функций бюро использует документы, форма которых регламентирована требованиями законодательства Украины, отраслевыми и заводскими стандартами. Для приведения печатных форм документов к виду требуемому заводскими и отраслевыми стандартами необходимо их согласование на этапе разработки технических заданий (ТЗ).

В тоже время бюро выполняет некоторые функции не свойственные ему, что приводит к снижению его производительности труда или же к ухудшению

качества выполняемых им текущих функций. К таким функциям можно отнести:

1. Прием отчетов по труду (по отделам и цехам) и формирование показателей численности и отработанного времени.

Выполнение данной функции следует поручить Отделу труда и заработной.

2. Учет выпуска металлорежущих инструментов и оснастки. Выполнение данной функции следует поручить Отделу инструментального производства.

Информация полученная в результате выполнения своих функций ОТЗ и отделом инструментального производства будет вноситься в единую базу данных, где она будет доступна ПЭО для ее дальнейшей обработки.

Результаты. Результатом решения данной задачи является разработанный проект автоматизации деятельности плано-экономического отдела машиностроительного предприятия. Задача решена в рамках условий сокращения времени на выполнение документооборота отдела. Разработаны возможные пути решения поставленной задачи на основе использования рекомендуемой технологии управления предприятием с применением системы «Галактика».

Список литературы: 1. Сараев А.Д. Системный анализ и современные информационные технологии. / А.Д. Сараев, О.А. Щербина. – Симферополь: СОНАТ. – 2006. – 184 с. 2. Никифоров В.В. Логистика. Транспорт и склад в цепи поставок. / В.В. Никифоров. – М.: ГроссМедиа, 2008. – 256 с. 3. Ларичев О.И. Системы поддержки принятия решений / О.И. Ларичев, А.В. Петровский // Современное состояние и перспективы их развития: Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ, 1987. – 125 с. 4. Thierauf R.J. Decision Support Systems for Effective Planing and Control.-N.J: Prentice Hall, 1982. – 198 с. 5. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем.-М.: Высш.шк., 2001. – 292 с. 6. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ.– К.:МАУП, 2003. – 180 с. 7. Оре. О. Графы и их применение.–М.: «Мир», 1965. – 240 с. 8. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера.–К.: «Техніка», 1975. – 142 с. 9. Кузнецов Ю.Н., Кузубов В.И., Волощенко А.Б. Математическое программирование: учебное пособие.–М.: Высшая школа, 1980. – 260 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sheds A.D., Shcherbina O.A. *System analysis and modern information technologies*. - Simferopol: SONATAS. - 2006. – 184 p. 2. Nikiforov V.V. *Logistics. Transport and warehouse in the supply chain*. - Moscow: Crossmedia, 2008. – 256 p. 3. Larichev O. I., Petrovsky A. C. *System decision support. The current state and prospects: Results of science and technology*. - Moscow: VINITI, 1987. – 125 p. 4. Thierauf, R. J. *Decision Support Systems for Effective Planing and Control*.- New-York: Prentice Hall, 1982. – 198p. 5. Tips B. I., Yakovlev S. A. *Modeling systems*.-Moscow: The High.HQ., 2001. – 292 p. 6. Armin Y. P. *Systems theory and analysis system view*.-Kiev:the interregional Academy of personnel management, 2003. – 180 p. 7. Ore O. *Graphs and their applications*.-Mocow: Mir, 1965. – 240 p. 8. Sikorski B. N. *Mathematical engineer*. - Kiev: "Technics", 1975. – 142 p. 9. Kuznetsov, Y. N., Kuzubov C. I., Fomin A. B. *Mathematical programming: a tutorial*. - Moscow: Vysshaya SHKOLA, 1980. – 260 p.

Поступила (received) 15.03.2015

Набока Елена Владимировна – канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25.

Колесник Мария Эдуардовна – канд. техн. наук, старш. препод. НТУ «ХПИ».

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Приведены особенности обработки отверстий комбинированным осевым инструментом. Предложен алгоритм выбора структуры комбинированного осевого инструмента для реализации технологического процесса обработки совокупности отверстий, основанный на анализе их конструктивно-технологических характеристик и увеличении концентрации технологических переходов. Предложена математическая модель, позволяющая описать структуру комбинированного осевого инструмента и принцип работы его ступеней.

Ключевые слова: обработка отверстий, комбинированный осевой инструмент, технологический процесс, концентрация операций

Введение. Маршрут обработки отверстия, применение определенных операций обработки и их последовательность зависят от геометрических параметров (диаметра, длины, формы) отверстия, а также предъявляемых технических требований: точности и шероховатости поверхности. По данным [1] для получения отверстия диаметром более 30 мм в сплошном металле выполняют как минимум за два перехода, сначала сверлят отверстие сверлом меньшего диаметра, затем – требуемого диаметра. В некоторых работах предлагают рассверливать отверстия уже с диаметра 18 мм. При составлении маршрута обработки следует учитывать рекомендации по области применения той или иной технологической операции.

Концентрацию технологических операций можно осуществить, применяя комбинированный осевой инструмент (КОИ), например, при последовательной обработке одного сквозного отверстия или параллельной обработке ступенчатых соосных поверхностей [2, 3, 4]. Наибольшее развитие применения КОИ получило в 70-80-е гг. XX ст. в массовом производстве для повышения производительности при работе на агрегатных станках и автоматических линиях. Причем, считается, что с уменьшением серийности производства экономическая эффективность применения КОИ уменьшается.

Анализ последних исследований и литературы. На область применения методов обработки, осуществляемых КОИ, могут влиять: форма и размеры отверстия, параметры точности, шероховатости и поверхностного слоя, материал обрабатываемой детали.

При составлении конкурирующих вариантов схем обработки отверстий с применением КОИ, на практике множество возможных вариантов объединения элементарных режущих инструментов в единый КОИ ограничено. Так, не следует применять КОИ с числом ступеней более пяти или шести. Нежелательно сочетание ступеней инструментов, при которых неизбежно неравномерное изнашивание режущих кромок из-за различия в подачах и скоростях резания. Ограничивают объединение в одном инструменте предварительной и

окончательной обработки, т.к. возникающие при этом вибрации могут привести к потере точности. Автор работы [1] считает, что соотношение диаметров двух соседних ступеней не должно превышать 1,5–2 раза; значения максимальной и минимальной точности поверхностей, обрабатываемых данным КОИ, не должна отличаться более, чем на два качества; подача КОИ, ступени которого работают по параллельной схеме резания, не должна быть меньше минимально допустимой для элементарных режущих инструментов, формирующих его. В случае последовательной или последовательно-параллельной работы ступеней КОИ необходимо обеспечить условие «открытости» поверхностей, т.е. необходимо предусмотреть наличие пространства для выхода инструмента из обработанного отверстия.

Исследования [5] показали, что при последовательной или последовательно-параллельной работе КОИ типа «ступенчатое сверло» с точки зрения уменьшения силовых нагрузок (осевой силы и крутящего момента) на технологическую систему целесообразно ограничиться тремя ступенями. Т.к. в этом случае суммарная сила резания меньше, даже чем при обработке стандартным осевым инструментом, за счет постепенного распределения припуска.

Постановка проблемы. Ни один из вариантов технологического процесса (ТП), в состав которого входят операции обработки отверстий с применением осевого инструмента не может быть абсолютно эффективным, так как всегда имеется возможность его улучшения. Одной из таких возможностей является применение КОИ.

Однако, производственный опыт применения КОИ и наши исследования показывают, что не всегда экономически целесообразно изготавливать КОИ только лишь для одного конкретного отверстия: цилиндрического гладкого или ступенчатого. В условиях многономенклатурного производства есть смысл сформировать комплексный ТП, для всей совокупности отверстий (рис. 1). Исходные данные при формировании

такого ТП и структуры КОИ для его осуществления получают в результате соответствующего анализа конструктивно-технологических параметров всей совокупности отверстий, подлежащей обработке. Иными словами, следует предусмотреть разработку ТП для групп деталей, имеющих сходство конструктивных форм и размеров отверстий, используемых материалов.

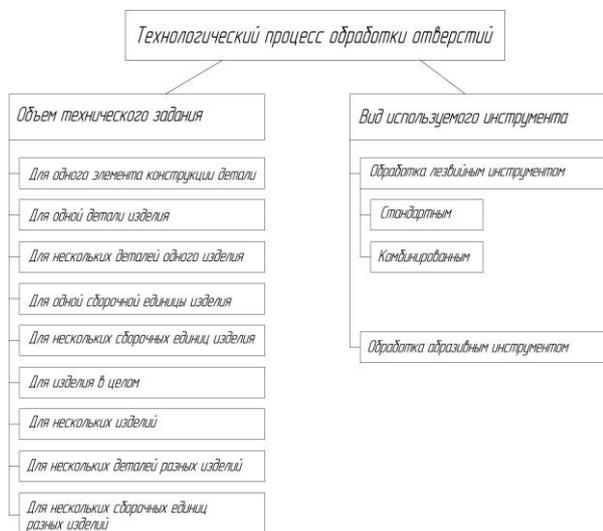


Рис. 1 – Некоторые начальные условия для разработки вариантов структуры технологического процесса обработки отверстий с применением КОИ

Для этого необходимо провести поиск наилучшего технологического решения получения каждого отверстия. Это решение должно обеспечивать заданные размеры (диаметр и длину) и качественные параметры (точность размеров и шероховатость поверхности) отверстия. Для этого при анализе следует учитывать форму: цилиндрическое, коническое, фасонное, сквозное, глухое, ступенчатое отверстие и т.д. Важное значение имеют длины отверстий с одинаковыми диаметрами, исходя из которых выбираются длины ступеней КОИ.

Кроме того, при выборе технологического решения при разработке ТП получения отверстия с заданными конструктивно-технологическими характеристиками необходимо знать области применения каждой ступени КОИ и факторы, ограничивающие эту область.

Алгоритм принятия решения следующий:

- 1) выбор метода (операции) с помощью которой можно получить отверстие, заданной формы;
- 2) выбор метода (операции), обеспечивающего получения заданного диаметра, а затем и длины отверстия;
- 3) выбор метода (операции), обеспечивающего достижения заданной точности и шероховатости поверхности.

Целью данной статьи является обоснование, выбор и математическое описание рациональной структуры ТП обработки отверстий, осуществляемого КОИ.

Основная часть. Расширение функциональных возможностей КОИ можно достичь путем его использования для группы изделий с общими конструктивными признаками, например, с большим количеством разнообразных отверстий. Это позволит увеличить максимальное число выполняемых операций обработки отверстий одним инструментом с минимальным количеством переналадок.

Кроме того, несмотря на все наложенные ограничения, один и тот же КОИ может применяться для обработки большого количества различных вариантов отверстий (рис. 2), что значительно расширяет его технологические возможности. В этом случае с целью автоматизации выбора структуры ТП обработки отверстий с помощью КОИ целесообразно сформировать математическую модель его работы.

Обычно технологический маршрут обработки детали имеет вид построчной записи, отображающей последовательность выполняемых операций и переходов (рис. 3) с указанием различных параметров, в том числе размеров обрабатываемых поверхностей и инструмента, необходимого для выполнения того или иного перехода

№ ступени	Схема обрабатываемого отверстия	Характеристика обрабатываемого отверстия	№ ступени	Схема обрабатываемого отверстия	Характеристика обрабатываемого отверстия
1		Обработка сквозного отверстия диаметром $D=d_1$ и длиной L_0 , изменяющейся в пределах $0 < L_0 < L_1$	1 и 2 или 2 и 3		Обработка сквозного двухступенчатого отверстия диаметрами ступеней $D_1=d_1$, $D_2=d_2$ и длинами изменяющимися в пределах $0 < L_{01} < L_1$, $0 < L_{02} < L_2$ или $D_2=d_2$, $D_1=d_1$ и длинами изменяющимися в пределах $0 < L_{01} < L_2$, $0 < L_{02} < L_3$
1		Обработка глухого отверстия диаметром $D=d_1$ и длиной L_0 , изменяющейся в пределах $0 < L_0 < L_1$	1 и 2		Обработка глухого двухступенчатого отверстия диаметрами ступеней $D_1=d_1$, $D_2=d_2$ и длинами изменяющимися в пределах $L_{01}=L_1$, $0 < L_{02} < L_2$
2 или 1 и 2		Обработка сквозного отверстия диаметром $D=d_2$ и длиной L_0 , изменяющейся в пределах $0 < L_0 < L_2$	1 и 2 и 3		Обработка сквозного трехступенчатого отверстия диаметрами ступеней $D_1=d_1$, $D_2=d_2$, $D_3=d_3$ и длинами изменяющимися в пределах $0 < L_{01} < L_1$, $L_{02}=L_2$, $0 < L_{03} < L_3$
3 или 2 и 3 или 1 и 2 и 3		Обработка сквозного отверстия диаметром $D=d_3$ и длиной L_0 , изменяющейся в пределах $0 < L_0 < L_3$	1 и 2 и 3		Обработка глухого трехступенчатого отверстия диаметрами ступеней $D_1=d_1$, $D_2=d_2$, $D_3=d_3$ и длинами изменяющимися в пределах $L_{01}=L_1$, $L_{02}=L_2$, $0 < L_{03} < L_3$

Рис. 2 – Варианты отверстий, которые можно обработать трехступенчатым КОИ

035 Сверлильная

1. Сверлить отверстие диаметром D_1 на длину L_1 ;
2. Сверлить отверстие диаметром D_2 на длину L_1 ;
3. Сверлить отверстие диаметром D_3 на длину L_2 ;
4. Сверлить 2 отверстия диаметром D_4 на длину L_2 ;
5. Зенкеровать два отверстия диаметром D_5 и D_6 на длину L_1 одновременно;
6. Зенкеровать отверстие диаметром D_7 на длину L_2 ;
7. Развернуть отверстие диаметром D_8 на длину L_2 ;
8. Зенковать фаску $C_1 \times 45^\circ$ на диаметре D_5 ;
9. Зенковать 2 фаски $C_2 \times 45^\circ$ на диаметре D_4 ;

Рис. 3 – Фрагмент маршрута обработки отверстий в детали

Технологический маршрут обработки может быть представлен в виде блок-схемы, состоящей из блоков, отображающих содержание технологической операции, и расположенных в порядке их выполнения (рис. 4).

Операция 035 Сверлильная

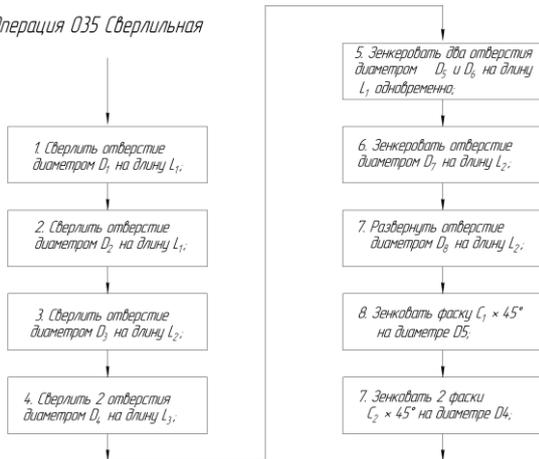


Рис. 4 – Блок-схема фрагмента маршрута обработки отверстий в детали «Корпус»

Такое представление ТП целесообразно при обработке стандартными инструментами, но не отображает порядок получения отверстия при обработке с помощью КОИ, ступени которого, в зависимости вида концентрации операций могут работать последовательно, параллельно или последовательно-параллельно. Поэтому для наглядности при формировании блок-схемы маршрута обработки с применением КОИ целесообразно отображать работу каждой его ступени в зависимости от вида концентрации операций, которую они осуществляют (рис. 5).

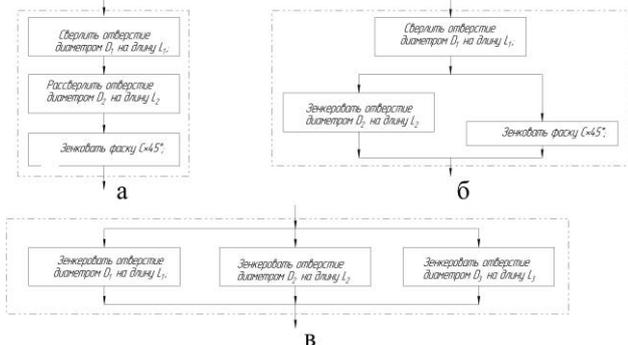


Рис. 5 – Блок-схема последовательности выполнения операций КОИ в зависимости от принципа работы ступеней: а – последовательно; б – последовательно-параллельно; в – параллельно

Тогда блок-схема фрагмента маршрута обработки отверстий с применением КОИ принимает другой

вид (рис. 6). Блоки, объединенные штрихпунктирной линией, указывают на применение КОИ с последовательной (сверло-зенкер-развертка), параллельной (двухступенчатый зенкер) или последовательно-параллельной (двухступенчатое сверло, сверло-зенковка) схемой резания. Остальные переходы выполняются стандартными осевыми инструментами (зенковка) или, если есть такая возможность, отдельными ступенями КОИ, указанными выше.

Операция 035 Сверлильная

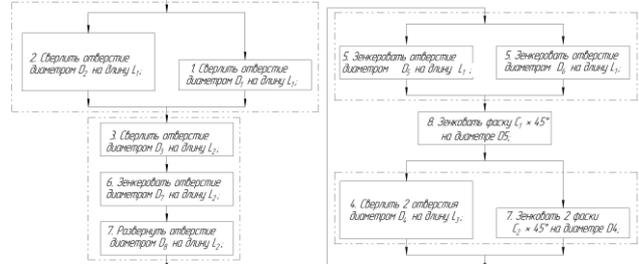


Рис. 6 – Блок-схема фрагмента маршрута обработки отверстий с применением КОИ

Кроме того, формально любой n -ступенчатый КОИ, состоящий из элементарных осевых инструментов, можно представить:

$$Q = A_i \wedge A_j \wedge A_k \wedge \dots \wedge A_n, \quad (1)$$

где A_i, A_j, A_k, A_n – символьное обозначение 1-й, 2-й, 3-й, n -ой ступени инструмента в общем виде; i, j, k, n – индексы, диаметрального размера в порядке возрастания, $i < j < k < n$.

В общем случае КОИ может состоять из ступеней, выполняющих различное технологическое назначение (сверление, зенкерование, зенкование, цекование, развертывание) и расположенных в практически произвольном порядке в зависимости от технического задания. Порядок компоновки стандартных инструментов ограничивается следующими условиями: диаметры ступеней КОИ должны возрастать в сторону хвостовика; следует выполнять сначала черновые затем чистовые переходы. Учитывая вышеизложенное:

$$Q = \begin{cases} A_i = C_i \vee 3e_i \vee Ce_i \vee 3_i \vee P_i \\ A_j = C_j \vee 3e_j \vee Ce_j \vee 3_j \vee P_j \\ A_k = C_k \vee 3e_k \vee Ce_k \vee 3_k \vee P_k, \\ \dots \\ A_n = C_n \vee 3e_n \vee Ce_n \vee 3_n \vee P_n \end{cases} \quad (2)$$

где C_i, C_j, C_k, C_n – ступень, выполненная сверлом, диаметром i, j, k, n ; $3e_i, 3e_j, 3e_k, 3e_n$ – ступень, выполненная зенковкой, диаметром i, j, k, n ; Ce_i, Ce_j, Ce_k, Ce_n – ступень, выполненная цековкой, диаметром i, j, k, n ; $3_i, 3_j, 3_k, 3_n$ – ступень, выполненная зенкером, диаметром i, j, k, n ; P_i, P_j, P_k, P_n – ступень, выполненная разверткой, диаметром i, j, k, n .

Т.к. ступени одного и того же КОИ могут работать по последовательной, параллельной или последовательно-параллельной схеме, то математическое

описание ТП в зависимости от принципа работы ступеней (1) и (2) можно развернуть.

Так, при описании последовательной работы ступеней n -ступенчатого КОИ запись (1) принимает вид

$$Q = (A_i \wedge \overline{A_j} \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge \overline{A_n}) \wedge (\overline{A_i} \wedge A_j \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge \overline{A_n}) \wedge \dots \\ \dots \wedge (\overline{A_i} \wedge \overline{A_j} \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge A_n) \\ \text{при} \begin{cases} A_i = C_i \vee 3e_i \vee Ce_i \vee 3i \vee P_i \\ A_j = C_j \vee 3e_j \vee Ce_j \vee 3j \vee P_j \\ A_k = C_k \vee 3e_k \vee Ce_k \vee 3k \vee P_k \\ \dots \\ A_n = C_n \vee 3e_n \vee Ce_n \vee 3n \vee P_n \end{cases}$$

Например, сверло-зенкер-развертка (см. рис. 6) с последовательной схемой резания:

$$Q'' = (C_3 \wedge \overline{3_7} \wedge \overline{P_8}) \wedge (\overline{C_3} \wedge 3_7 \wedge \overline{P_8}) \wedge (\overline{C_3} \wedge \overline{3_7} \wedge P_8),$$

где C_3 – ступень, выполненная в виде сверла, с диаметрами D_3 ; 3_7 – ступень, выполненная в виде зенкера, с диаметром D_7 ; P_8 – ступень, выполненная в виде развертки, с диаметром D_8 , при $D_3 < D_7 < D_8$.

При параллельной работе ступеней КОИ запись (1) принимает вид:

$$Q = (A_i \wedge \overline{A_j} \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge \overline{A_n}) \vee (\overline{A_i} \wedge A_j \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge \overline{A_n}) \vee \dots \\ \dots \vee (\overline{A_i} \wedge \overline{A_j} \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge A_n) = A_i \vee A_j \vee A_k \vee \dots \vee A_n \\ \text{при} \begin{cases} A_i = C_i \vee 3e_i \vee Ce_i \vee 3i \vee P_i \\ A_j = C_j \vee 3e_j \vee Ce_j \vee 3j \vee P_j \\ A_k = C_k \vee 3e_k \vee Ce_k \vee 3k \vee P_k \\ \dots \\ A_n = C_n \vee 3e_n \vee Ce_n \vee 3n \vee P_n \end{cases}$$

Например, двухступенчатый зенкер (см. рис. 6) с параллельной схемой резания:

$$Q''' = 3_5 \vee 3_6,$$

где $3_5, 3_6$ – ступени, выполненные в виде зенкера, с диаметрами D_5, D_6 соответственно, при $D_5 < D_6$.

Кроме того, зачастую ступени КОИ работают по последовательно-параллельной схеме резания, когда количество одновременно работающих ступеней инструмента меняется с течением времени и может составлять одну, две или более ступеней, что регламентируется длинами обрабатываемых отверстий и ступеней самого инструмента. Поэтому запись КОИ, работающего по последовательно-параллельной схеме резания имеет вид совокупности записей (1–4). Причем, ступень, которая не участвует в обработке записывается с чертой над ее обозначающим символом, например $\overline{3_3}$.

Так, двухступенчатое сверло (см. рис. 6) с последовательно-параллельной схемой резания

$$Q^I = (C_2 \vee \overline{C_1}) \wedge (C_2 \vee C_1),$$

где C_1, C_2 – ступени, выполненные в виде сверл, с диаметрами D_1, D_2 соответственно, при $D_2 < D_1$.

Сверло-зенковка (см. рис. 6) с последовательно-параллельной схемой резания:

$$Q^{IV} = (C_4 \vee \overline{3e_4}) \wedge (C_4 \vee 3e_4),$$

где C_4 – ступень, выполненная в виде сверла, с диаметрами D_4 ; $3e_4$ – ступень, выполненная в виде зенковки для обработки фаски на диаметре D_4 .

Таким же образом можно описать ТП обработки отверстий, осуществляемый с помощью КОИ, более сложной структуры. Теоретически существует «идеальный» КОИ, с помощью которого можно выполнить обработку всей совокупности отверстий детали, узла, сборочной единицы. Структуру этого КОИ также можно описать данным способом.

Выводы. Сформулирован новый подход формирования ТП обработки отверстий и структуры КОИ для его осуществления, который предусматривает анализ всей совокупности отверстий и выбор рационального маршрута обработки с целью увеличения концентрации технологических переходов. На базе предложенной математической модели описания структуры КОИ и принципа работы его ступеней, созданы предпосылки для автоматизированной компоновки КОИ, в зависимости от технического задания.

Список литературы: 1. Яковенко И.Э. Оптимизация структуры и параметров инструментальных наладок при проектировании технологических компоновок агрегатных станков малого и среднего размеров: дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Яковенко Игорь Эдуардович. – Харьков, 1992 – 282 с. 2. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов: учебн. пособие для вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» / Г.Г. Иноземцев. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с. 3. Кожевников Д.В. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Кожевников Д.В, Гречишников В.А., Кирсанов С.В. и др. Под ред. С.В. Кирсанова. – 2-е изд. доп. М.: Машиностроение, 2005. – 528 с. 4. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. / Родин П.Р. – К.: «Вища школа», 1974. –399 с. 5. Степанов М.С. Дослідження силових характеристик при послідовно-паралельній обробці отворів комбінованим осьовим інструментом [Текст] / М.С. Степанов, М.С. Іванова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2014. – No 42 (1085). – С. 19–25.

Bibliography (transliterated): 1. Yakovenko I.E. *Optimizatsiya struktury i parametrov instrumentalnykh naladok pri proektirovanii tehnologicheskikh komponovok agregatnykh stankov malogo i srednego razmerov: dis. kand. tehn. nauk : 05.02.08 / Yakovenko Igor Eduardovich.* – KHarkov, 1992 – 282. 2. Inozemcev G.G. *Proektirovanie metallorazhushhih instrumentov: uchebn. posobie dlya vtuzov po special'nosti «Tehnologija mashinostroenija, metallorazhushhie stanki i instrumenty» / G.G. Inozemcev.* – Moscow: Mashinostroenie, 1984. – 272 p. 3. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.A., Kirsanov S.V. *Rezhushhij instrument: Uchebnik dlja vtuzov – 2-e izd. dop.* Moscow: Mashinostroenie, 2005. – 528 p. 4. Rodin P.R. *Metallorazhushhie instrumenty.* – Kyiv: «Vishha shkola», 1974. –399 p. 5. Stepanov M.S., Ivanova M.S. *Doslidzhennja silovih charakteristik pri poslidojno-paralel'nij obrobci otvoriv kombinovanim os'ovim instrumentom.* Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «KhPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: Tehnologii v mashinobuduvanni. – Kharkov. : NTU «KhPI». 2014. – Vol 42 (1085). – P. 19–25.

Поступила (received) 20.03.2015

Иванова Марина Сергеевна – ассистент НТУ «ХПИ», тел.: (057)-707-66-25, e-mail: ivanova_maryna@i.ua.

Ю.А. Ключко, Е.В. Камчатная-Степанова, Н.Г. Сикетина

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-СБЫТОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В статье рассматриваются принципы и необходимость использования системно-синергетического подхода в сфере анализа производственно-сбытовой деятельности производственного предприятия. Дана характеристика системного подхода в нелинейной среде и синергетического подхода. Выработаны теоретические и методологические основы анализа механизмов реализации производственно-сбытовой деятельности отечественного промышленного предприятия. Рассмотрены особенности отечественного рынка сырья. На основе результатов анализа фактически сложившейся в Украине системы сбыта материалов выделены особенности механизма формирования структуры сбыта и каналов товародвижения на рынке продукции промышленности.

Ключевые слова: нелинейная среда, сбыт, каналы сбыта, продукция, материалы, система, синергетика.

Введение. Современный этап развития как мировой экономики в целом и экономики Украины в частности характеризуется нелинейным развитием процессов, в связи с чем экономическая среда меняется очень быстро и долгосрочные прогнозы становятся неактуальными. Нелинейность системы является собой фундаментальную характеристику реальности, синергетически сопряженную со сверхбыстрыми процессами в режиме обострения, которые разумно использовать как для построения кластеров, так и повышения эффективности их функционирования. Под нелинейностью понимается необычная реакция на внешние воздействия, когда «правильное» воздействие оказывает большее влияние на эволюцию систем [1, 2]. Для адаптации производственно-экономических систем к быстро меняющимся условиям конкурентной среды необходимо использовать системно-синергетический подход.

Системный подход представляет собой комплексное изучение явления или процесса как единого целого с позиций системного анализа. Главная задача сводится к установлению заданного состояния функционирования системы, предусмотренного планированием как упреждающим управлением. Однако в нелинейной среде актуальным является также исследование системы и с точки зрения синергетики, т.е. применение системно-синергетического подхода к ее изучению. Конструктивные постулаты теории синергетики: принцип продуктивности хаоса, признание наличия точек ветвления (бифуркации), принцип резонансного воздействия и др.

С позиций системно-синергетического подхода механизмы реализации стратегии предприятий машиностроительной отрасли должны предусматривать развитие адекватных координированных институциональных и организационных форм, методов, и инструментов осуществления инновационно-синергетических проектов или программ.

Анализ последних исследований и публикаций. Основные принципы системно-синергетического

подхода и анализа деятельности предприятия рассматриваются в ряде работ зарубежных и отечественных ученых: В.-Б. Занга, С.П. Капицы, Г.Г. Малинецкого, Л. фон Бергаланфи, Г. Хакена, А.Градова, Д. Лысенко, Д. Ендовицкого и других [3-9]. Общая теория систем, созданная А. А. Богдановым и продолженная австрийским ученым Л. фон Бергаланфи, выделяет основные аспекты, признаки и принципы системного подхода, которые позволяют охарактеризовать объект как системное явление.

Выделение нерешенной проблемы. Следует отметить, что вопросы, посвященные анализу и разработке механизмов реализации производственно-сбытовой деятельности отечественных промышленных предприятий, рассмотрены не в том объеме, в каком требуют реалии сегодняшнего состояния экономики. В связи с этим **целью данной статьи** является, используя системно-синергетический подход, выработать теоретические и методологические основы анализа механизмов реализации производственно-сбытовой деятельности отечественного промышленного предприятия. Все исходные теоретические положения синергетики рассматриваются относительно производственно-экономических систем как гипотезы, которые требуют теоретического и практического исследования и проверки.

Результаты исследования. Новые синергетические качества производственно-экономических систем (ПЭС) формируются в процессе взаимодействия системы с социумом и государственной системой в целом. Эффективное управление со стороны государства должно обеспечивать поддержку процессов самоорганизации ПЭС при решении прикладных проблем. В свою очередь, эффективное управление ПЭС предопределяет качественные изменения в управлении социумом региона – усиление информатизации и гуманизации. Следовательно, результаты преобразований в машиностроении следует рассматривать на фоне макроэкономических и макросоциальных показателей развития терри-

торий и государства в целом. Механизм стабилизации рынка сырья, предусматривающий совершенствование процессов реализации продукции, формировался под влиянием ряда управленческих решений, определивших трансформацию условий внешней и внутренней среды промышленных предприятий. В Украине до начала 90-х гг. действовала система централизованных поставок промышленной продукции потребителям с оплатой по оптовым ценам, утверждаемым гос. органами [10].

С развитием рыночных отношений в экономике машиностроительным предприятиям было предоставлено право самостоятельно реализовывать продукцию сначала сверх государственного заказа, а с его отменой оно было распространено на всю продукцию. Децентрализованная система сбыта промышленной продукции получила дальнейшее развитие с созданием в 1996 году холдинговых компаний, которые могут сбывать сырье своих предприятий, а также передавать им права собственности на сырье, получаемые на предприятиях отрасли. На рынке промышленной продукции кроме государственных предприятий по сбыту сырья появилось множество посредников с негосударственной формой собственности. При этом большинство из них не поставляют продукцию непосредственно потребителям, а перепродают ее более крупным и платежеспособным посредникам [11]. Рынок промышленной продукции, таким образом, разделился на первичный и вторичный. В последние 10 лет сложилась парадоксальная ситуация, когда производственные мощности предприятий используются на 65-70% в основном из-за недостатка средств на воспроизводство отечественного сырья и материалов, а средства потребителей промышленной продукции идут на закупку материалов и комплектующих за границей. Трансформация механизмов ценообразования путем установления возможностей перехода на договорные цены имела целью повышение устойчивости рынка сырья в Украине. Вместе с тем договорные цены должны были обеспечить рентабельную работу машиностроительных предприятий. При неопределенности условий установления договорных цен и кризиса платежей за сырье крупные посреднические предприятия стали покупать у предприятий и холдинговых компаний сырье с частичной оплатой денежными средствами и поставкой материально-технических ресурсов по ценам, превышающим цены производителей этих ресурсов. Рынок промышленной продукции не удовлетворяет и требованию отсутствия привилегий, характерных для рынков с чистой конкуренцией. Отдельные предприятия имеют преимущества в силу лучших горно-геологических условий использования и природных качественных характеристик сырья, а также выгодного географического расположения. Сырьевой рынок нельзя назвать полностью обозримым из-за неопределенности ценовой информации, объемов предложения и спроса отдельных видов промышленной продукции и др.

Изложенные обстоятельства свидетельствуют о том, что рынку промышленной продукции в большей степени присуща не чистая, а олигополистическая конкуренция, которая допускает ограниченный взаимной зависимостью контроль над ценами и позволяет вести политику цен как oferентам, так и потребителям.

Анализ показывает, что на рынке производители недостаточно используют свои возможности в разработ-

ке и реализации ценовой политики. Это проявляется в поставке дешевой и низкокачественной продукции, в снижении цен предложения, в заключении невыгодных бартерных операций и т.п. Достижение сбалансированности рынка сырья во многом определяется особенностями механизма государственного регулирования. Спецификой рынка сырья Украины является слабость его государственного регулирования. Без подкрепления экономическими рычагами эти задания во многих случаях не выполнялись или выполнялись за счет поставки материалов и комплектующих низкого качества.

В последнее время, однако, государство начало использовать такой рычаг, как выдача заданий для обновления государственного резерва сырья с оплатой из средств госбюджета. Усиление государственного регулирования рынка материалов и комплектующих диктуется также наличием большого числа убыточных предприятий, которые не могут конкурировать на рынке даже при государственной поддержке [12]. Важным моментом является осуществление действенного контроля над использованием выделяемых сырьедобывающим предприятиям отраслей средств господдержки, которая не должна «уходить в песок», а наглядно отражаться в результатах работы предприятий. Здесь основным является создание таких структур управления, чтобы государство или любой другой кредитор имели возможность взыскивать долги, изымая в свою пользу часть реализации товарной продукции. В свою очередь предприятие при несвоевременной оплате за уголь со стороны потребителя имеет право на присвоение части его реализованной продукции в размере долга. Наилучшим образом системе «государственного» заказа соответствует структура управления, создаваемая в рамках объединения ограниченного числа предприятий по принципу экономической целесообразности. Специалисты [10, 12] считают, что их должно быть не более 25-30 и это не приведет к кардинальному изменению сложившейся структуры управления отраслью, что способствует стабилизации рынка материалов и комплектующих в Украине.

При любом варианте формирования и реализации ресурсов развития отрасли главная роль отводится государству с его административно-экономическими возможностями.

Механизм возникновения дефицита промышленных материалов и комплектующих может быть проанализирован на примере регионального рынка сырья Харьковского региона. Такие особенности рынка сырья, как олигополия и качественная неоднородность, предполагают постоянную необходимость в новой, объективной информации о состоянии рынка: спроса на материалы по объему и марочной структуре, предложения предприятий, качественные характеристики используемых материалов. Так как последние значительно колеблются от вида к виду, то обновлять информацию необходимо каждые два-три месяца.

Регулярные маркетинговые исследования определяют наличие значительного банка необходимых данных, обобщим вторичную маркетинговую информацию для их построения. Для этого дадим характеристику запасов сырья, предприятий-поставщиков, объема и структуры потребления материалов, каналов товародвижения, внешних и внутренних факторов маркетинговой среды. В сложившихся условиях на рынке промыш-

ленной продукции в Украине нет оснований для снижения цен. Этим подтверждаются расчеты паритета цен на альтернативные виды топлива, используемого на электростанциях. В перспективе цены на машиностроительное сырье будут только повышаться, так как не созданы соответствующие экономические условия: интенсивная реструктуризация отрасли, преодоление кризиса платежей, увеличение средств господдержки предприятий - при соответствующем снижении цен и тарифов на материально-технические ресурсы, электроэнергию и услуги. Необходимо учитывать и неизбежный рост затрат на добычу в связи с углублением машиностроительных работ на действующих предприятиях.

Рассмотренные механизмы, направленные на стабилизацию состояния промышленной отрасли во многом предопределили формирование особенной структуры сбыта сырья на рынке Украины. Особенности механизма формирования структуры сбыта и каналов товародвижения на рынке продукции промышленности были выделены на основе результатов анализа фактически сложившейся в Украине системы сбыта материалов. Для этого на 40 предприятиях Харьковской области (входящих в группу, как с традиционной структурой управления, так и в группу предприятий с маркетинговой ориентацией) была проведена грация покупателей материалов и выделено три их группы.

1. Постоянные покупатели. Как правило, в группу постоянных покупателей входят фабрики, заводы, машиностроительные предприятия и др.

2. Разовые покупатели (приобретают материалы 1-4 раза в год) также за «живые» деньги.

3. Бартерные закупки [10].

В рамках представленных приоритетов реализации материалов важно показать актуальность информационной поддержки механизмов реализации производственно-сбытовой деятельности субъектов промышленной отрасли. Акцентируя внимание на каналах товародвижения материалов, которые подразделим на прямые и опосредованные. Прямой канал имеет место в случае прямой поставки материалов ценных видов на заводы или материалов 3 сорта частным потребителям. Одноуровневый канал имеет место в трех случаях: 1) поставка материалов на предприятие. Рекомендуется при поставке материала 1 сорта как продукта подготовительных работ; 2) использование крупного коммерческого посредника при наличии значительной партии поставки и отсутствии денежных средств у потребителя; 3) поставка промышленной продукции подрядчику в качестве оплаты за поставленные материальные ресурсы, выполненные работы и оказанные услуги.

Таким образом, количественные параметры в структуре каналов товародвижения на рынке материалов Украины нельзя признать удовлетворительными из-за чрезмерно высокой доли коммерческих посредников в процессе реализации продукции. А на большинстве предприятий участие посредников в системе товародвижения составляет от 80 до 94%. Это ведет к серьез-

ным финансовым потерям в производственно-коммерческой деятельности предприятий.

Выводы. Сказанное выше позволяет сделать вывод о том, что достижение финансовой устойчивости производственно-коммерческих систем предприятий требует серьезной корректировки товарной политики промышленных предприятий в области сбыта, а также формирования структуры каналов движения сырья на основе современных маркетинговых и логистических информационно-аналитических подходов.

Список литературы: 1. Князева Е.Н. Основы синергетики. Синергетическое мировидение / Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов. – М.: КомКнига – 2005 – 240 с. 2. Белафин В.А. Режимы с обострением и законы коэволюции сложных систем [электронный ресурс] / В.А. Белафин, С.П. Курдюмов, Е.Н. Князева // – режим доступа // spkurdyumov.ru/. 3. Занг В.-Б. Синергетическая экономика: Время и перемены в нелинейной экономической теории / В.-Б. ЗАНГ. – М.: Мир, 1999. – 335 с. 4. Капица С.П. Синергетика и прогнозы будущего / С.П. Капица – М.: Эдиториал, 2001. – 228 с. 5. Малинецкий Г.Г. Синергетическая парадигма: Многообразие поисков и подходов / Г.Г. Малинецкий – М.: Юнити, 2000. – 536 с. 6. Bertalanffy L. von. General System Theory – A Critical Review // General Systems. Vol. VII. 1962. P. 1–20. Перевод Н. С. Юдиной. 7. Хакен Г. Синергетика. Пер. с англ. В.И. Емельянова / Г. Хакен – М.: Мир, 1980. – 404 с. 8. Градов А.П. Стратегия и тактика управления предприятия / А. П. Градов, Б. И. Кузин. – СПб.: Спец. Лит., 1996. – 510 с. 9. Гиляровская Л.Т. Комплексный экономический анализ хозяйственной деятельности: учебник / Л. Т. Гиляровская, Д. В. Лысенко, Д. А. Ендовицкий. – Москва: Проспект Велби, 2008. – 360 с. 10. Амоша А.И. Украинская металлургия: современные вызовы и перспективы развития / А.И. Амоша, В.И. Большаков, А.А. Минаев, Ю.С. Залознова, Л.А. Збаразская, Ю.В. Макогон и др. Донецк: Ин-т экономики пром-сти, 2013. – 114 с. 11. Бобоев М. Возможности мобилизации средств для развития машиностроительного комплекса / М. Бобоев, В. Кашин – 2002. – №5. – С. 19-26. 12. Кабанов А.И. Финансирование и экономическое стимулирование научно-технического развития промышленной промышленности Украины: теория и практика: Монография / А.И. Кабанов – Донецк: ИЭП НАН Украины, 2002. – 244 с.

Bibliography (transliterated): 1. Knjazeva E.N., Kurdjumov S.P. *Osnovy sinergetiki. Sinergeticheskoe mirovidenie*. Moscow: KomKniga, 2005. – 240 p. Print. 2. Belavin V.A., Kurdjumov S.P., Knjazeva E.N. *Belavin V.A. Rezhimy s obostreniem i zakony kojevoljucii slozhnyh sistem [jelektronnyj resurs]*. spkurdyumov.ru. 3. Zang V.-B. *Sinergeticheskaja jekonomika: Vremja i peremeny v nelinejnoj jekonomicheskoi teorii*. Moscow: Mir, 1999. – 335 p. Print. 4. Kapica S.P. *Sinergetika i prognozy budushhogo*. Moscow: Jeditorial, 2001. – 228 p. Print. 5. Malineckij G.G. *Sinergeticheskaja paradigma: Mnogoobrazie poiskov i podhodov*. Moscow: Juniti, 2000. – 536 p. Print. 6. Bertalanffy L. von. *General System Theory*. Moscow: Mir, 1980. Print. 7. Haken G. *Sinergetika*. Moscow: Mir, 1980. – 404 p. Print. 8. Gradov A.P., Kuzin B.I. *Strategija i taktika upravlenija predprijatija*. St. Petersburg: Spec. Lit, 1996. – 510 p. Print. 9. Giljarovskaja L.T., Lysenko D.V., Endovickij D.A. *Kompleksnyj jekonomicheskij analiz hozjajstvennoj dejatel'nosti*. Moscow: Prospekt Velbi, 2008. – 360 p. Print. 10. Giljarovskaja L.T., Lysenko D.V., Endovickij D.A. *Ukrainian metallurgy: modern challenges and prospects of development*. Doneck: In-t jekonomiki promsti, 2013. – 114 p. Print. 11. Boboev M., Kashin V. *Vozmozhnosti mobilizacii sredstv dlja razvitija mashinostroitel'nogo kompleksa*. Doneck, 2002. – No 5 – PP. 19-26. Print. 12. Kabanov A.I. *Finansirovanie i jekonomicheskoe stimulirovanie nauchno-tehnicheskogo razvitija promyshlennoj promyshlennosti Ukrainy: teorija i praktika: Monografi-ja*. Doneck: IEP NAN Ukrainy, 2002. – 244 p. Print.

Поступила (received) 25.02.2015

Клочко Юрий Александрович – канд. эконом. наук, зав. кафедрой менеджмента ДИТМ МНТУ, Краматорск, тел.: (099)-914-94-00, e-mail: asimba@ukr.net;

Камчатная-Степанова Екатерина Валерьевна – аспирант, НТУ «ХПИ», тел.: (067)-733-40-00, e-mail: bell_ka7@mail.ru;

Сикетина Наталья Геннадиевна – ассистент, НТУ «ХПИ», тел.: (068)-343-27-63, e-mail: wel2001@ukr.net.

ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКІ ОСНОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ШАРОШОК ІЗ ВСТАВНИМ ТВЕРДОСПЛАВНИМ ПОРОДОРУЙНІВНИМ ОСНАЩЕННЯМ ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ

У даній статті розглядаються типові конструкції кріплення твердосплавних зубців до корпусу шарошки у трьохшарошкових долотах. Досліджено конструкція посадки породоруйнуючого елемента у шарошку, яка покращує якість закріплення зубка при менших напруженнях у з'єднанні. Запропоновані конструкторські рішення щодо вдосконалення технології виготовлення шарошок із вставним твердосплавним породоруйнівним оснащенням тришарошкових бурових доліт, які дозволяють суттєво підвищити експлуатаційні показники вітчизняних бурових доліт. Проаналізовано напружно-деформівний стан запресованого зубка та шарошки у типовій конструкції та модернізованій за допомогою CAD/CAE системи.

Ключові слова: тришарошкові бурові долота, площини вибою, моделювання, метод кінцевих елементів, цементації вінців шарошки, породоруйнівне оснащення, контактні тиски, твердосплавні зубки.

Введення. Сьогодні при спорудженні свердловин особливо міцних породах широко застосовуються тришарошкові бурові долота. Шарошки таких доліт виконуються з вставним твердосплавним породоруйнівним оснащенням. Відомо, що рівень досконалості конструкції шарошок з породоруйнівним оснащенням та технологія їх виготовлення визначає експлуатаційні показники бурових доліт. Тому пошук резервів у вдосконаленні конструкції шарошок та підвищення якості складання з'єднання „зубок-шарошка” є одним із пріоритетних науково-прикладних напрямків досліджень у долотобудуванні.

У світовій практиці долотобудування для підвищення ефективності впливу на породу вибою застосовують два основні види розташування твердосплавних вставок на вінцях шарошок бурових доліт. Перший, найбільш поширений – дотримання рівної відстані між твердосплавними зубками. Другий – коли твердосплавні зубки розташовують парами, на досить близькій відстані один від одного. Зокрема, провідні виробники тришарошкових бурових доліт, як „Hughes Christensen Co.”, „Smith International Inc.”, „Reed Tool Co.”, „Security DBS Dresser Industries Inc.”, „Varel Manufacturing Co.” та ін. створюють такі конструкції породоруйнівного оснащення шарошок які забезпечують повне перекривання зони впливу на вибій. Зауважимо, що ефективність руйнування породи на вибої визначається якістю реалізації долотом ефекту подрібнення та сколювання. Для створення такого ефекту широко застосовують твердотільне 3-D моделювання при проектуванні нових конструкцій доліт.

Постановка задачі. Особливий інтерес для розробки нових конструкцій породоруйнівного оснащення шарошок з твердосплавними породоруйнівними

вставками посідає дослідження напруженого стану в з'єднанні „зубок-шарошка”.

Аналіз існуючих методологічних підходів до вирішення даної задачі. За останні роки моделюванню напруженого стану в з'єднанні „зубок-шарошка” присвячено роботи [1, 2]. Зокрема, встановлено залежність напружено-деформованого стану шарошок від взаємовпливу величини натягу при запресовуванні зубків, їх числа та діаметру. Однак в дослідженнях замість цілої шарошки моделювали її кутовий сектор і половину отворів під вставні зубки на другому і третьому вінцях. Крім цього, при моделюванні обмежилися розгляданням натягу в з'єднанні „зубок-шарошка” рівним 0,1 мм, а також враховували тільки переміщення точок моделі у радіальному напрямку. Відтак існує проблема об'єктивної оцінки характеру розподілу напружень, які виникають у вінцях конструкцій при запресовуванні твердосплавних зубків з реальним натягом, а також при дії експлуатаційних навантажень при взаємодії з пороодою вибою ще достатньо не вивчені. Відсутність точних даних про вплив конструкторських параметрів з'єднання „зубок-шарошка” суттєво утруднює освоєння виробництвом передових конструкцій породоруйнівного оснащення бурових доліт. Позаяк неоптимальний натяг у з'єднанні „зубок-шарошка” веде до випадання або розкришування твердосплавних зубків на вибій, що катастрофічно знижує працездатність тришарошкових бурових доліт і прогресуючого руйнування не тільки породоруйнівного оснащення, а й тіла шарошки [3].

Відомо, що твердосплавний зубок зазнає при бурінні циклічних навантажень P і при цьому виникає згинальний момент M_H (рис. 2), під дією якого в

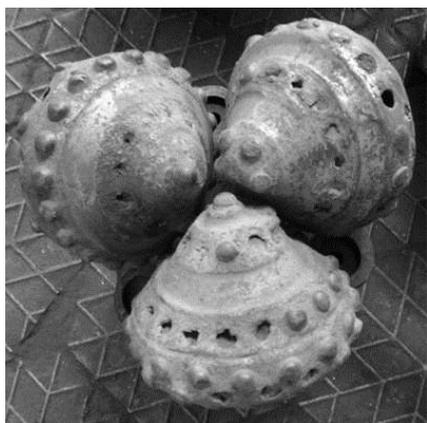


Рис. 1 – Загальний вигляд зруйнованого вставного породоруйнівного оснащення тришарошкового бурового долота 269,9 ОК

спряжених ділянках „хвостовик зубка – отвір шарошки” виникають напруження, що орієнтовані у тому самому напрямку що і контактні напруження пружної деформації [4]. Тим не менше, достеменно невідомо який саме характер розподілу напружень виникатиме у розглядуваних спряжених ділянках за умов різних параметрів конструкції породоруйнівного оснащення вінців шарошки при складальних операціях та при експлуатації тришарошкового бурового долота.

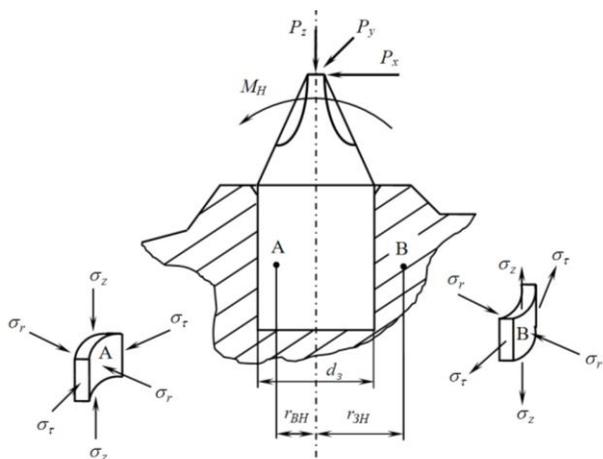


Рис. 2 – Напружений стан у спряжених деталях з’єднання „хвостовик зубка – отвір шарошки”

В області контактної зони як в тілі шарошки, так і в тілі зубка виникають радіально-стискаючі σ_r , тангенціальні σ_τ і поздовжньо-осьові напруження σ_z . Використовуючи отримані при конструюванні з’єднання „зубок-шарошка” натяги (рис. 3), а також викладки в [4] можна твердити, що циліндрична частина хвостовика твердосплавної вставки (довжиною h) під дією пружної деформації стінок отвору у вінці шарошки зазнає контактні напруження стиску, а спряжена ділянка вінця шарошки – напруження розтягу. Ці напруження є неоднакові по лінії спряження „хвостовик зубка – отвір шарошки”. Зауважимо, що напруження можуть суттєво збільшувати свою вели-

чину залежно від відстані між вставними твердосплавними зубками.

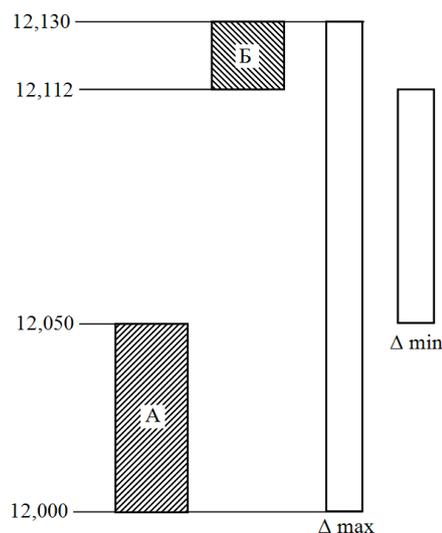


Рис. 3 – Поле допуску з’єднання „зубок-шарошка” при номінальному отворі у вінцях шарошки рівному 12 мм

Дослідна частина. З метою отримання адекватних даних про характер розподілу напружень у найбільш навантажених вінцях шарошок здійснювали моделювання в середовищі Solid Works. Для цього поставлено завдання встановити: характер впливу величини натягу при запресовуванні твердосплавних зубків на розподіл деформації у тілі вінця шарошки, а також параметри мінімальної відстані між отворами у вінцях шарошки під твердосплавні зубки, які розташовуються по парах. Для вирішення поставленої задачі скористувалися методом скінчених елементів. Згідно рекомендацій поданих в [5] вибрано сітку з трикутними елементами (рис. 4).

Дослідження напруженого стану в спряжених ділянках з’єднання „хвостовик зубка – отвір шарошки” здійснювали відповідно до умов сумісності переміщень

$$u_2(c) - u_1(c) + \delta_K(c) = \delta_P(c),$$

де $u_i(c)$ – радіальне переміщення точок хвостовика твердосплавного зубка ($i = 1$) та вінця шарошки, у якому є отвір ($i = 2$) у перерізі $z = c$, під дією деформації,

δ_K – переміщення спричинене місцевими деформаціями,

δ_P – радіальний розрахунковий натяг у перерізі місцевих деформацій.

Згідно здійснених досліджень зведена сила яку прикладали до основного твердосплавного зубка моделі була рівна 28кН. На п’ять зубків розміщених коло основного зубка – прикладали по 14кН на кожен. Моделювали також ділянку контактного напруження з трьома малими зубками які припадають на досліджувану ділянку впливу зубки – вибій, на кожен зі згаданих зубків припадало 7кН.

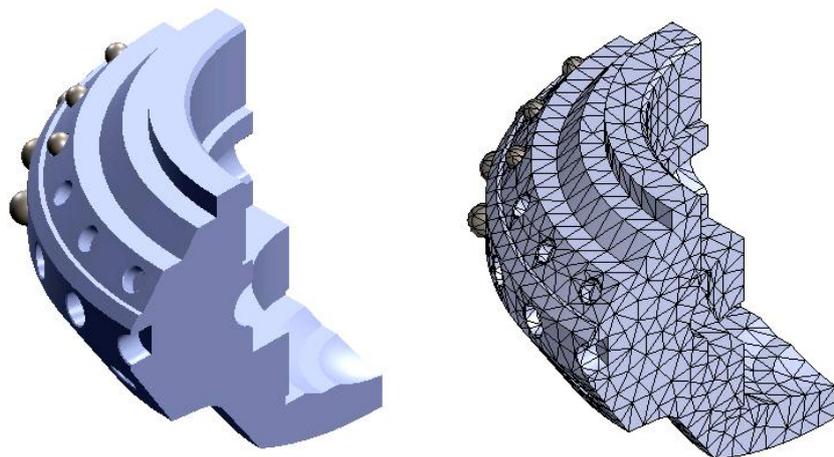


Рис. 4 – Фрагмент (1/4 частини) моделі шарошки у якому будується сітка скінчених елементів

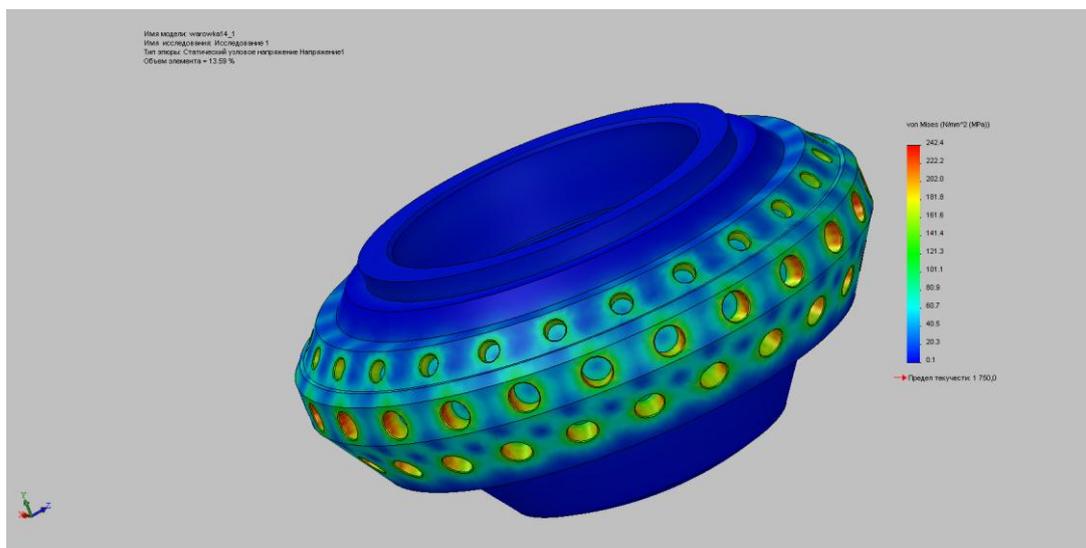


Рис. 5 – Моделювання напруженого стану у ділянках спряження „хвостик зубка – отвір шарошки” на калібруючому і основних вінцях шарошки No 3 бурового долота без навантаження

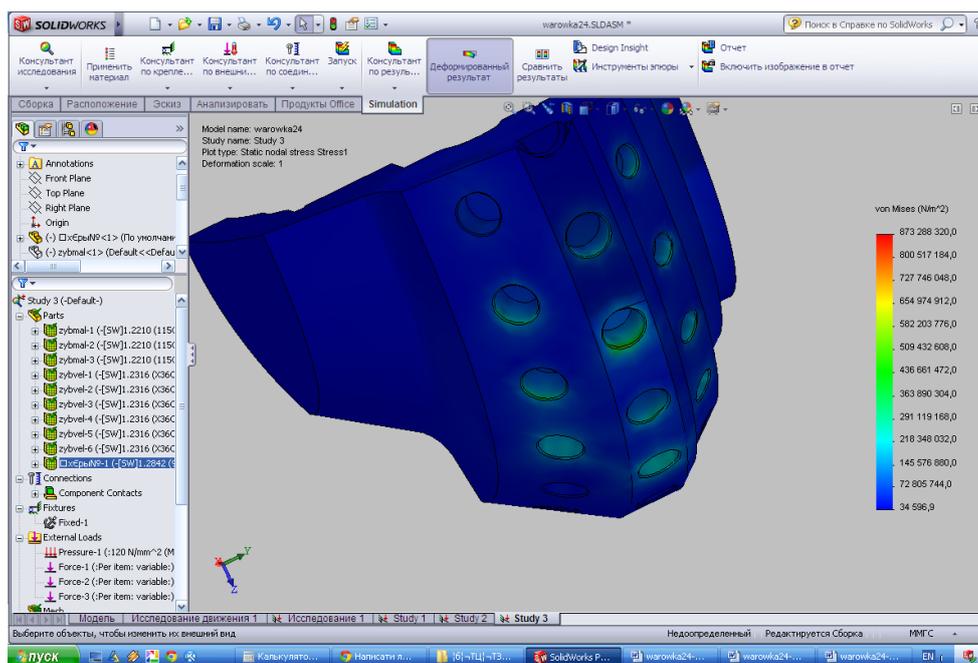


Рис. 6 – Моделювання напруженого стану у ділянках спряження „хвостик зубка – отвір шарошки” на калібруючому і основних вінцях шарошки No 3 бурового долота за навантаження на шарошку 120 кН

Загалом у контактній зоні зубки знаходилися під навантаженням до 120 кН. Крім того враховано тиск від натягу посадки „хвостовик зубка – отвір шарошки” – 120 МПа. Результати здійснених досліджень напруженого стану у вінцях шарошки подано на рис. 6.

Висновки. Здійснені дослідження дозволили встановити характер розподілу контактних напружень у спряжених ділянках „хвостовик зубка – отвір шарошки” (рис. 7). Для створення сприятливого розподілу напруженого стану у ділянці поверхні отвору у вінці шарошки ефективним є попередження виникнення тріщин. Для цього слід ретельно здійснювати захист від цементації вінців шарошки. У випадку конструкцій з багаторядним розташуванням твердосплавних зубків на вінцях, ефективним є виконання вифрезерованих площадок на глибину цементованого шару, що попереджає викришування фрагментів вінців шарошки.

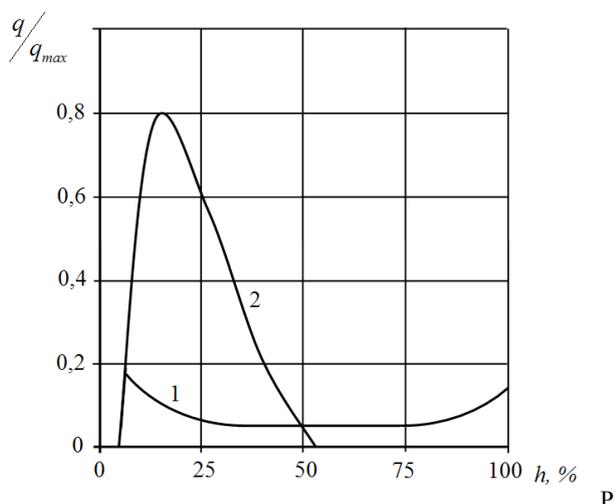


Рис. 7 – Криві розподілу контактних напружень у спряжених ділянках „хвостовик зубка – отвір шарошки”:

1 – напруження створені пресуванням вставки у тіло шарошки; 2 – варіант напружень від силового впливу взаємодії „порода вибою-твердосплавний зубок”

Дослідження показали, що збільшення у двічі кількості зубків на вінцях шарошки суттєво не змінює напружений стан між вставними зубками. Це дозволяє різко підвищити ефективність агресивного впливу породоруйнівного оснащення на вибій та забезпечувати вищі швидкості буріння.

Випробовування шарошок вдосконаленої конструкції у стендових умовах, при застосуванні металевго вибою, підтвердили ефективність отриманих параметрів вставного породоруйнівного оснащення шарошок. Зокрема, ефективно забезпечується перекриття площини вибою, при цьому відсутній знос вінців шарошки та відсутні явища оголення тіла хвостовика. Також, при неперервній роботі долота на стенді

протягом 6 годин не зафіксовано руйнування твердосплавних зубків навіть на основних, найбільш навантажених вінцях шарошки. Аналіз шарошок на предмет утворення тріщин у відповідальних ділянках як зі сторони породоруйнівного оснащення, так зі сторони порожнини не виявив пошкоджень які б спричинили до крихкого руйнування тіла шарошки на вибої.

Отже, запропоновані конструкторські рішення щодо вдосконалення технології виготовлення шарошок із вставним твердосплавним породоруйнівним оснащенням тришарошкових бурових доліт дозволяють суттєво підвищити експлуатаційні показники вітчизняних бурових доліт. Впровадження у виробництво запропонованих рішень не вимагає докорінної зміни технології виготовлення доліт.

У подальшому практичний інтерес є у необхідності моделювання варіантів розподілу напружень (контактних тисків) при різних показниках шорсткості спряжених деталей, а також варіантів розподілу напружень (контактних тисків) у вінці шарошки при різних відстанях один від одного твердосплавних зубків.

Список літератури: 1. Неупокоев В. Г. Вопросы теории и практики проектирования, производства и эксплуатации буровых шарошечных долот / Неупокоев В. Г. – Самара: Издательство Самарского научного центра Российской академии наук, 2000. – 376 с. 2. Морозов Л.В. Повышение долговечности буровых долот на основе компьютерного анализа элементов конструкций и их сборки: дис. ... кандидата техн. наук: спец. 05.02.08 / Морозов Леонид Владимирович. – Самара, 2003. – 180 с. 3. Яким Р. С. Науково-прикладні засади підвищення довговічності тришарошкових бурових доліт: дис. ... доктора техн. наук: 05.05.12 / Яким Роман Степанович. – Івано-Франківськ, 2012. – 293 с. 4. Яким Р. С. Підвищення якісних показників вставного породоруйнівного оснащення шарошок тришарошкових бурових доліт / Р. С. Яким, Ю. Д. Петрина, І. С. Яким // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 3 (48). – С. 127 – 138. 5. Каплун А. Б. ANSYS в руках інженера: Практическое руководство. – [2-е изд. испр.] / Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 272 с.

Bibliography (transliterated): 1. Neupokoev V.G. *Theory and practice of design, manufacture and operation of drilling cone bits* Neupokoev V.G. - Samara: Publishing Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2000. –376 p. Print. 2. Morozov L.V. *Improving the durability of drill bits based on computer analysis of structural elements and their assembly*: dis. ... Ph. D. Sciences: spec. 05.02.08 Morozov Leonid Vladimirovich. - Samara, 2003. - 180 p. Print. 3. Jakym R.S. *Scientific-applied principles to increase durability three rolling cutter drill*: dissertation Dr. Sc. Sciences: 05.05.12 Jakym Roman Stepanovich. - Ivano-Frankivsk, 2012. – 293 p. Print. 4. Jakym R.S. *Increase the quality of the embedded rock cutting equipment three rolling cutter drill bits/* Jakym R.S., Petrina Y.D., I.S. Jakym How exploration and development of oil and gas fields. - 2013. - No 3 (48). - P. 127 - 138. Print. 5. Kaplun A.B. *ANSYS in the hands of the engineer: A Practical Guide*. - [2-nd ed. Corr.] Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfereva M.A. - Moscow: Editorial URSS, 2004. –272 p. Print.

Поступила (received) 19.03.2015

Яким Роман Степанович – док. техн. наук, проф. Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І.Франка, Дрогобич, тел.: 0679070484, e-mail: Jakym.r@online.ua;

Сліпчук Андрій Миколайович – канд. техн. наук, доц. НУ «ЛП», Львів, тел.: (032)-258-25-01, e-mail: andsl@ukr.net;

А.Н. Шелковой, М.С. Степанов, М.С. Семченко

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предлагается метод исследования продуктивности и надежности обработки детали «Корпус редуктора» в гибкой производственной системе крупносерийного производства на базе станка 6Н12ПБ и гибкого производственного модуля МА2765МЗФ4 с использованием специальных инженерных программ. Проведенное исследование позволило сократить время для расчетов, более точно представить сам процесс обработки, получить более точные результаты исследований, разработать технологическую документацию, подобрать необходимую оснастку и инструмент, основное и дополнительное оборудование.

Ключевые слова: гибкое автоматизированное производство (ГАП), электронно-вычислительная техника (ЭВМ), числовое программное управление (ЧПУ), роботизированный технологический комплекс (РТК), гибкий производственный модуль (ГПМ), производственный модуль (ПМ), производственная система (ПС), технологический процесс (ТП), управляющая программа.

Введение. На сегодняшний день направление технического перевооружения производства является наиболее приоритетным в машиностроении.

Современное развитие ГАП на основе ЭВМ и ЧПУ ставит инженерные задачи, которые упираются на новые базовые технологии, обеспечивающие выпуск конкурентоспособной продукции и ориентированные на высокие технологии. А именно комплексно-автоматизированное производство создает условия для одновременного достижения высокой производительности, сопоставимой с возможностями автоматических поточных линий и технологической гибкости, обеспечиваемой в основном участием человека в производственном процессе. Это является особенно важным фактором в крупносерийном производстве.

Использование обрабатывающих центров, ГПМ, РТК предполагает новые возможности ГАП, является неотъемлемой частью комплексно-автоматизированного производства.

Анализ основных достижений и литературы. Автоматизация развивается в направлении автоматизации производства и автоматизации управления. Автоматизация производства осуществляется путем создания автоматизированных и автоматических систем машин, а автоматизация управления – путем создания автоматизированных и автоматических систем управления.

В машиностроении процесс автоматизации развивается ускоренными темпами и охватывает целые производственные комплексы, участки цехи и заводы. На сегодняшний день различают автоматизацию производства трех уровней: частичную, при которой автоматизация ограничивается автоматизацией отдельных операций технологического процесса, комплексную - автоматизацию производственных процессов изготовления деталей и сборки с использованием ав-

томатических систем машин, а также полную – высшую ступень автоматизации, при которой все функции контроля и управления производством выполняются автоматами. Наиболее развитой пока является частичная автоматизация, продолжает развиваться комплексная, но, конечно, главной целью будущего преследуется цель полной автоматизации, без вмешательства человека в производственный процесс.

Полная автоматизация открывает ряд преимуществ, к которым можно отнести значительные повышения производительности труда; работу в тяжелых условиях, вредных и опасных для здоровья человека; более экономическое использование ресурсов; более высокое и стабильное качество продукции; сокращение периода времени от начала проектирования до получения изделия; возможность расширения производства без увеличения трудовых ресурсов. Все это заставляет серьезно задуматься над повышением эффективности и автоматизации машиностроения, так как от этого зависит прогресс всех отраслей промышленности.

Цель исследования и постановка задачи. Основной целью исследования является повышение производительности участка механической обработки резанием детали «Корпус редуктора» на основе применения групповых методов обработки в условиях серийного производства на ГПМ МА2765МЗФ4.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ литературных данных по данной тематике;
- разработать технологическую документацию для обработки детали «Корпус редуктора» в условиях крупносерийного автоматизированного производства;
- подобрать технологическую оснастку для базирования и транспортирования объекта обработки;

© А.Н. Шелковой, М.С. Степанов, М.С. Семченко, 2015

- выбрать основное и вспомогательное технологическое оборудование [1];
- выполнить моделирование системы изготовления детали «Корпус редуктора»;
- выполнить нормирования процесса обработки изделия «Корпус редуктора» на ГПМ МА2765МЗФ4.

При разработке технологической документации необходимо составить маршрут обработки детали, далее на его основании разработать технологические операции. Для составления полного технологического процесса необходимо определить припуски на операциях и режимы резания для обработки детали «Корпус редуктора».

Необходимо учитывать особенности конструкции, габариты обрабатываемых деталей для подбора основного и вспомогательного оборудования, устройства, а также для выбора способа транспортировки и работа, которая будет выполнять перенос деталей и заготовок [5].

С помощью имитационного моделирования необходимо определить взаимное расположение всех элементов технологического процесса, а также время, которое тратится на вспомогательные действия.

Материалы исследований. В качестве материалов исследования используются деталь «Корпус редуктора» (см. рис.1), универсальный вертикально-фрезерный станок модели 6Н12ПБ (см. рис.2), а также ГПМ МА2765МЗФ4 (см. рис.3).

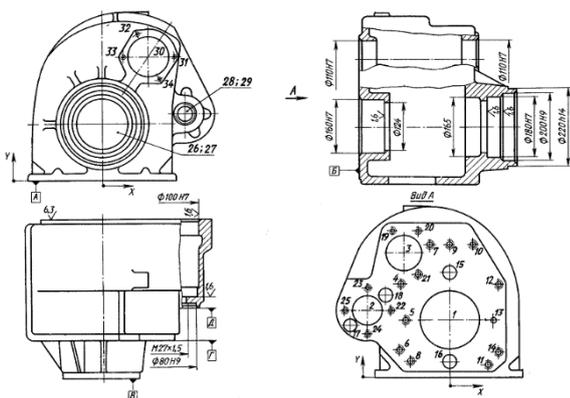


Рис. 1 - Деталь «Корпус редуктора»

Деталь «Корпус редуктора» изготовлена из чугуна марки СЧ 15-32 [7], имеет габаритные размеры 400*430*450 мм, квалитеты точности обрабатываемых поверхностей находятся в пределах от IT14 до IT7, шероховатость поверхностей находится в пределах от Ra 6,3 до Ra 1,6, большинство обрабатываемых поверхностей диаметральные и крепежные.

Универсальный вертикально-фрезерный станок модели 6Н12ПБ предназначен для обработки базовых поверхностей детали. Он имеет 18 скоростей вращения шпинделя, мощность главного двигателя 10кВт, а также пределы чисел оборотов шпинделя 63 – 3150 об/мин. ГПМ модели МА2765МЗФ4 - это современный многоцелевой комплекс с ЧПУ типа 2Р32, который состоит из обрабатываемого оборудования, транспортной системы и накопительной системы. Он предназначен для комплексной обработки детали и

имеет мощность главного двигателя 20кВт, пределы рабочих подач стола 10-4000 мм/мин, наибольшую выходную мощность на главном валу 14,8 кВт [6].

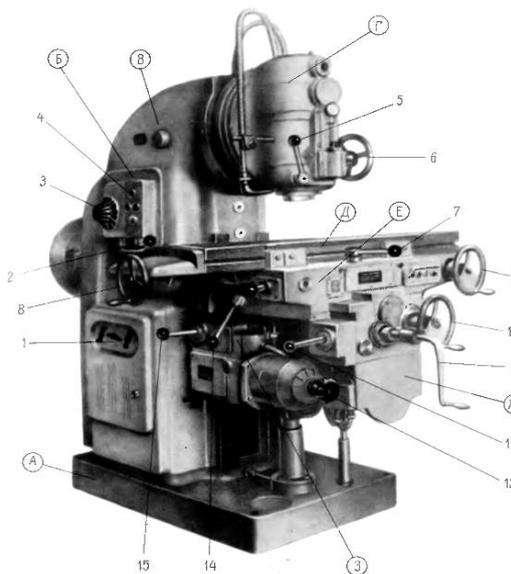


Рис. 2 – Вертикально-фрезерный станок модели 6Н12ПБ

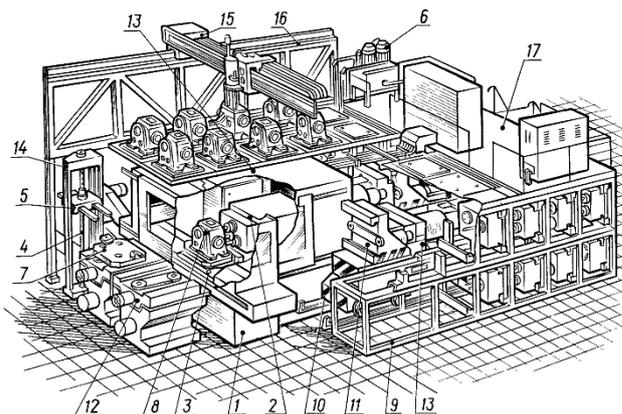


Рис. 3 – ГПМ модели МА2765МЗФ4

Результаты исследований. В результате исследований был проведен размерный анализ обрабатываемых поверхностей. Для выявления технологических размерных цепей необходимо предварительно разработать технологический процесс обработки заготовки детали «Корпус редуктора» и на его основе составить размерную схему процесса, в данном случае на примере обработки внутренних ступенчатых отверстий (см. рис.4). Для предварительного, анализа варианта ТП необходимо вручную построить граф размерных изменений заготовки (см. рис.5).

Для расчетов размерной цепи используем диалоговую программу «KON7». Программа «KON7» автоматизирует выявление взаимосвязанных контуров цепей, а после проверки их рациональности и допустимости - решает уравнения, исходя из заданной точности конструкторских размеров. Для расчета производим следующие действия:

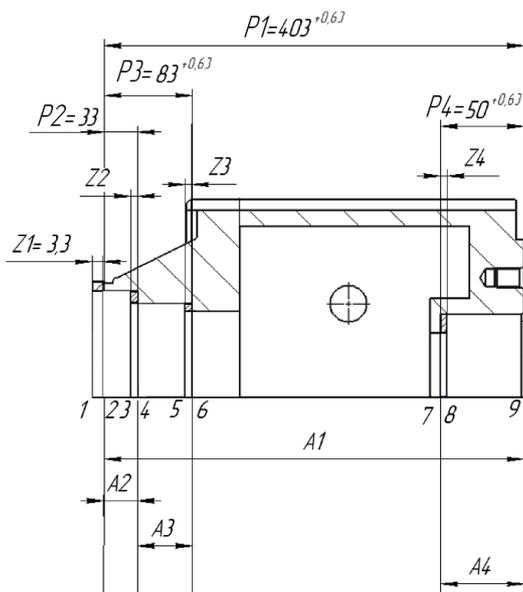


Рис.4 – Размерная схема технологической обработки

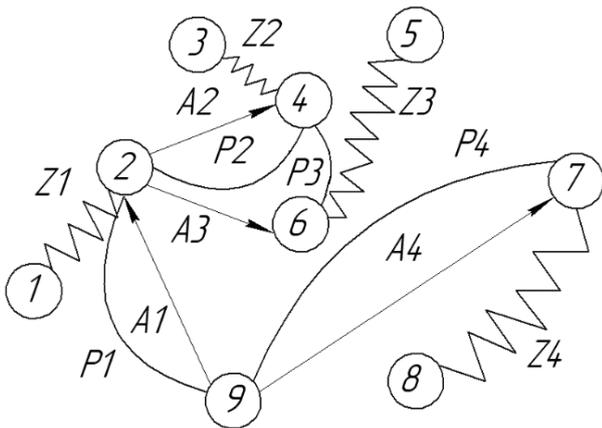


Рис.5 - Граф технологической размерной цепи

- Вводим общую информацию для данного варианта технологического процесса, которая помимо прочего определяет избранные системой допуски для всех размеров заготовки;
- Вводим конструкторские размеры (P1-P4);
- Вводим припуски на обработку (Z1-Z4) [3];
- Вводим размеры заготовки (A1-A4);
- Вводим размеры механообработки (A5-A8);
- Получаем данные расчета (табл.1):

Следующим этапом исследований являлся выбор инструмента и расчет режимов резания. При обработке детали «Корпус редуктора» на ГПМ МА2765М3Ф4 выполняются: фрезерование, сверление, расточка и нарезание резьбы. Для обработки детали выбираем режущие инструменты компании «Sandvik Coromant».

Выбор всего инструмента проводится по схеме, показанной по примеру выбора фрезы (см. рис.6) – определяется вид обработки, тип инструмента и параметры инструмента.

Размер пластины	D ₁ , мм	Код		Размеры, мм		Max. D ₂	Max. L			
		Круглый вал	Нормальный вал	Ø	l					
18	100	-	R260 7-100-30	6	3,6	32,0	135	63	12,0	5000
200	-	R260 7-200-40	R260 7-200-30	14	14,0	60,0	231,1	63	12,0	3500
250	-	R260 7-250-40	-	10	14,0	60,0	231,1	63	12,0	3500
315	-	R260 7-315-40	-	12	20,0	60,0	293,2	63	12,0	3000
400	-	R260 7-400-40	-	16	34,0	60,0	344,4	80	12,0	2800

Рис.6 – Этапы выбора инструмента: а – выбор вида обработки, б – выбор типа инструмента, в – выбор параметров инструмента

В конечном итоге получаем полный набор инструмента для обработки детали «Корпус редуктора» (см. рис.7).

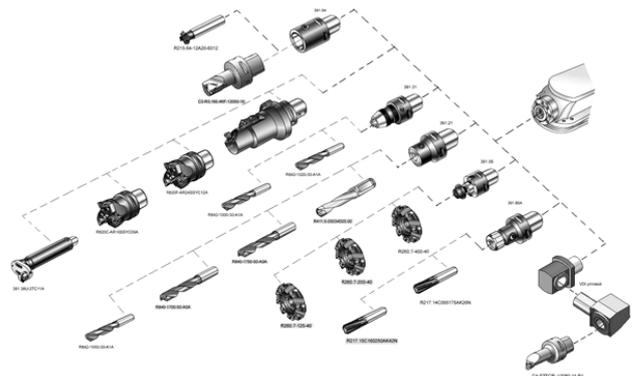


Рис.7 – Виды инструментальной оснастки для обработки детали «Корпус редуктора»

Расчет режимов резания проводим в программе «Coro Guide» сформированной специально для инструмента «Sandvik Coromant». Последовательность расчета такова (см. рис.8):

- Выбирается вид операции (фрезерование, точение, сверление и т.д.);
- Выбор типа операции (фрезерование торцевое, круговая интерполяция, фрезерование лыски);
- Ввод данных инструмента (подача на зуб, главный угол в плане, режущий диаметр) и расчет режимов (скорость резания, обороты шпинделя, скорость подачи и т.д.).

Далее на основе базового технологического процесса (ТП) был сформирован конкретный ТП в программе «Техно Pro 5+», в котором были указаны операции, переходы, коды обрабатываемых поверхностей и режимные характеристики (см. рис.9). На выходе этой программы мы получаем всю технологическую документацию (маршрутная карта, операционная карта, карта эскизов).

Таблица 1 – Результаты расчета технологических размерных цепей

Результаты расчета технологических РЦ ЯГТУ, С Калачев О.Н., 2000 ** KON7 **

Замыкающие звенья				Составляющие звенья				kon7			
Р-черт.размер, Z-припуск								Отклонения			
Ин-декс звена	Гра-ницы звена	Предел.значения		Ин-декс звена	Гра-ницы звена	Метод обработки	Номинал	Верхнее	Нижнее		
		max	min								
P1	2	9	406.300	403.000	A1	1	9	литьё чугуна и стали в земл.фор	411.100	1.500	-1.500
P2	2	4	33.400	32.600	A2	3	2	литьё чугуна и стали в земл.фор	31.260	0.800	-0.800
P3	4	6	50.630	50.000	A3	5	4	литьё чугуна и стали в земл.фор	48.430	0.800	-0.800
P4	7	9	50.630	50.000	A4	8	9	литьё чугуна и стали в земл.фор	48.430	0.800	-0.800
Z1	2	1	---	3.300	A5	9	2	фрезер-еоднократ	406.300	0.000	-0.760
Z2	4	3	---	1.000	A6	2	4	точение однократ	33.400	0.000	-0.340
Z3	6	5	---	1.000	A7	4	6	точение однократ	50.630	0.000	-0.400
Z4	7	8	---	1.000	A8	9	7	точение однократ	50.630	0.000	-0.400

Завершающим этапом исследования является имитационное моделирование 2D и 3D, а также написание управляющей программы для оборудования с ЧПУ.

С помощью программы SolidWorks была смоделирована имитационная 3D модель системы изготовления детали «Корпус редуктора», в которую вошли составные части и элементы гибкого производственного модуля (рис.10). Это дало возможность объемно-го представления ГПМ и расположения его частей друг относительно друга [2].

Для написания управляющей программы в системе SolidCAM была смоделирована обработка детали «Корпус редуктора». Это позволило получить рабочую программу для станка с ЧПУ (рис.12), а также определить основное время обработки для каждого

перехода, после чего мы можем вывести основное нормативное время обработки используя формулу (1) [4]:

$$N_{\text{час.заг}} = \sum T_{\text{шт}} = \sum T_0 + \sum T_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{час.заг}}$ - общая норма времени на обработку детали;

$\sum T_{\text{шт}}$ - суммарное штучное время;

$\sum T_0$ - суммарное основное время обработки детали;

$\sum T_{\text{доп}}$ - суммарное вспомогательное время.

В имитационном моделировании на основании трехмерных моделей задается последовательность обработки детали. С помощью «ГПМ 3D редактор», был смоделирован алгоритм обработки детали типа «Корпус редуктора» на ГПМ МА2765МЗФ4 (рис.11).

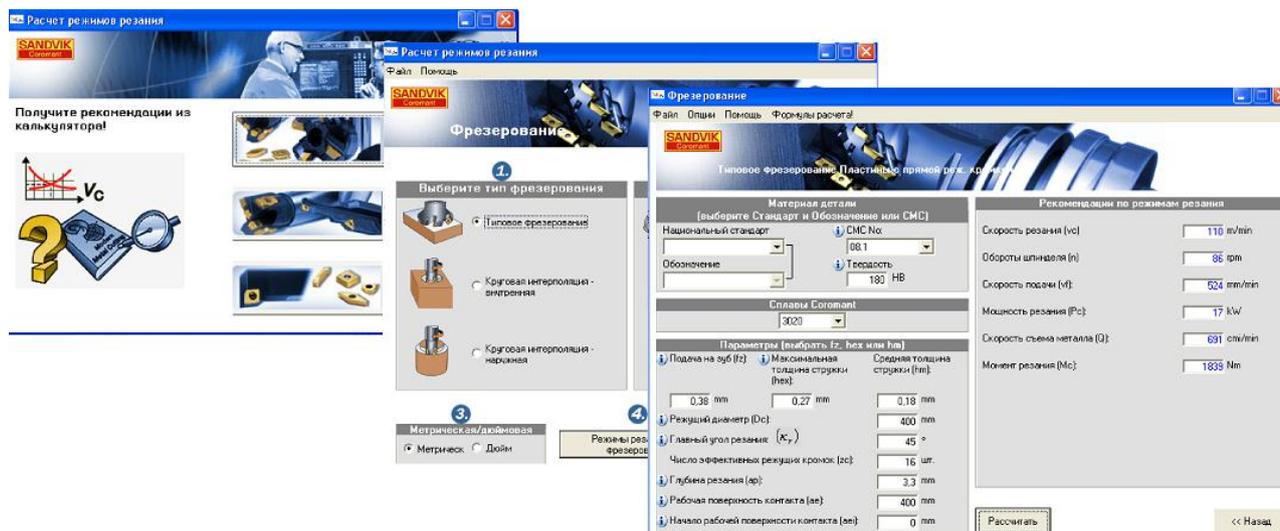


Рис.8 – Расчет режимов резания в программе «Coro Guide»

- Конкретные ТП
 - дет 001 Корпус редуктора
 - дет Деталь
 - оп 005 Вертикально-Фрезерная
 - пер 001 Установить и закрепить деталь на станке
 - пер 002 Фрезеровать поверхность прилегания 400401 предварительно и окончательно на глубину 3,3 мм
 - пер 003 Центровать 2 отверстия 630401 диаметром 10 мм
 - пер 004 Сверлить отв. 2 отв. 630401 диаметром 15,5 мм
 - пер 005 Расточить 2 отверстия 630401 до диаметра 30 мм
 - пер 006 Расточить 2 отверстия 630401 до диаметра 35 мм
 - пер 007 Контролировать обработанные поверхности
 - пер 008 Снять обработанную деталь со станка
 - оп 010 Комплексная
 - пер 001 Установить и закрепить деталь на станке
 - пер 002 Фрезеровать поверхность прилегания 400601 предварительно и окончательно на глубину 3,3 мм
 - пер 003 Центрировать 12 отверстий 650601 диаметром 10 мм
 - пер 004 Сверлить 6 отверстий 650601 диаметром 10,2 мм на глубину 32 мм
 - пер 005 Сверлить 6 отверстий 650601 диаметром 17,5 мм на глубину 37 мм
 - пер 006 Сверлить 4 отверстия 650602 диаметром 15,5 мм на глубину 32 мм
 - пер 007 Сверлить отверстие 650603 диаметром 10,2 мм на глубину 32 мм
 - пер 008 Центровать 5 отверстий 650604 диаметром 17 мм
 - пер 009 Зенковать 4 отверстия 590601 диаметром 18 мм под углом 60 градусов
 - пер 010 Сверлить отверстие 650603 диаметром 10,2 мм на глубину 32 мм
 - пер 011 Сверлить 5 отверстий 650604 диаметром 17,5 мм
 - пер 012 Нарезать резьбу 680601 M12 на 6 отв. на глубину 22 мм
 - пер 013 Нарезать резьбу 680602 M20 на 6 отв. на глубину 27 мм
 - пер 014 Нарезать резьбу 680603 M12 на отв. на глубину 22 мм
 - пер 015 Нарезать резьбу 680604 M20 на 5 отв. на глубину 27 мм
 - пер 016 Повернуть заготовку на 180 градусов
 - пер 017 Фрезеровать поверхность прилегания 400501 предварительно и окончательно на глубину 2,2 мм
 - пер 018 Фрезеровать поверхность прилегания 400502 предварительно и окончательно на глубину 2,2 мм
 - пер 019 Фрезеровать поверхность прилегания 400503 предварительно и окончательно на глубину 2,2 мм

- пер 020 Центровать 4 отверстия 650501 диаметром 10 мм
- пер 021 Центрировать отверстие 650502 диаметром 25 мм
- пер 022 Сверлить 4 отверстия 650501 диаметром 10,2 мм на глубину 30 мм
- пер 023 Сверлить отверстие 650502 диаметром 25,5 мм на глубину 22 мм
- пер 024 Нарезать резьбу 680501 M12 на 4 отв. на глубину 20 мм
- пер 025 Нарезать резьбу 680502 M27 на отв. на глубину 22 мм
- пер 026 Обточить диаметр 030501 на размер 220 мм предварительно на глубину 2,2 мм
- пер 027 Расточить отверстие 500501 до диаметра 199,5 мм предварительно на глубину 2,2 мм
- пер 028 Расточить отверстие 500502 до диаметра 179,5 мм предварительно на глубину 2,2 мм
- пер 029 Расточить отверстие 500503 до диаметра 164,6 мм предварительно на глубину 2,2 мм
- пер 030 Расточить отверстие 500501 до диаметра 200 мм
- пер 031 Расточить отверстие 500502 до диаметра 180 мм
- пер 032 Расточить отверстие 500503 до диаметра 165 мм
- пер 033 Точить фаску 590501 в размер 3 x 30 град.
- пер 034 Точить фаску 590502 в размер 3 x 30 град.
- пер 035 Расточить отверстие 500504 до диаметра 109,6 мм предварительно на глубину 2,2 мм
- пер 036 Расточить отверстие 500505 до диаметра 110 мм окончательно на глубину 0,4 мм
- пер 037 Точить фаску 590503 в размер 3 x 30 град.
- пер 038 Расточить отверстие 500505 до диаметра 60 мм предварительно на глубину 1,9 мм
- пер 039 Точить фаску 590504 в размер 2 x 30 град.
- пер 040 Расточить отверстие 500601 до диаметра 160 мм окончательно на глубину 0,4 мм
- пер 041 Расточить отверстие 500602 до диаметра 110 мм окончательно на глубину 0,4 мм
- пер 042 Расточить отверстие 500603 до диаметра 100 мм окончательно на глубину 0,4 мм
- пер 043 Точить фаску 590602 в размер 3 x 30 град.
- пер 044 Точить фаску 590603 в размер 3 x 30 град.
- пер 045 Точить фаску 590604 в размер 3 x 30 град.
- пер 046 Расточить 4 отверстия 650602 до диаметра 32 мм на глубину 32 мм
- пер 047 Контролировать обработанные поверхности
- пер 048 Снять обработанную деталь со станка
- оп 015 Моющая
- оп 020 Технический контроль

Рис.9 – Конкретный технологический процесс для обработки детали «Корпус редуктора»

Благодаря этому мы имеем возможность воочию проследить за трехмерным процессом обработки, увидеть взаимодействие составных частей ГПМ а также максимально сократить вспомогательное время при обработке.

На базе подготовленных исходных данных в системе «Pro edit» были разработаны имитационные модели гибких обрабатывающих модулей. В результате в системе «GPS» была разработана имитационная 2D модель гибкой производственной системы, которая состоит из моделей обрабатывающих модулей и транспортно-накопительной системы (рис.13). Это дало возможность провести анализ эффективности обработки ГПС - оценить уровень загрузки технологического оборудования, оценить энергетические затраты ГПС и эффективность использования ГПС по коэффициенту полезного действия, провести анализ процесса синтеза маршрута обработки детали «Корпус редуктора» (рис.14-17 соответственно).

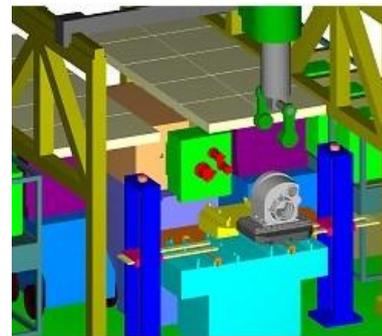


Рис.11 – Имитационная модель ГПМ MA2765M3Ф4

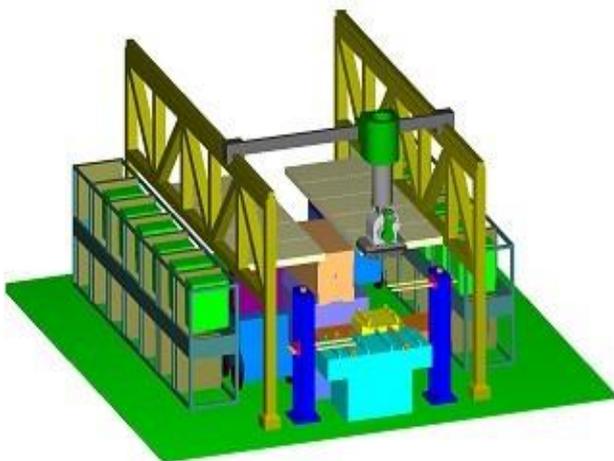


Рис.10 – Модель 3D ГПМ MA2765M3Ф4

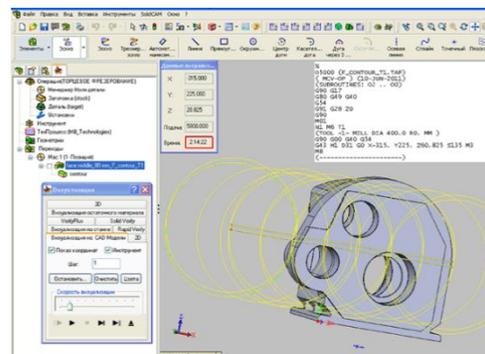


Рис.12 – Управляющая программа обработки детали

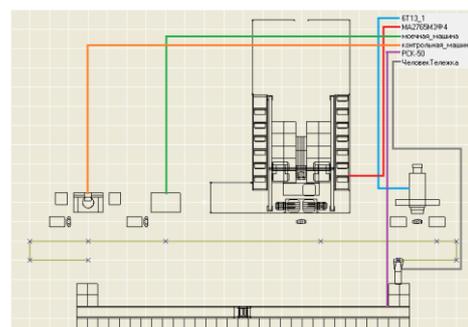


Рис.13 – Имитационная модель ГПС 2D

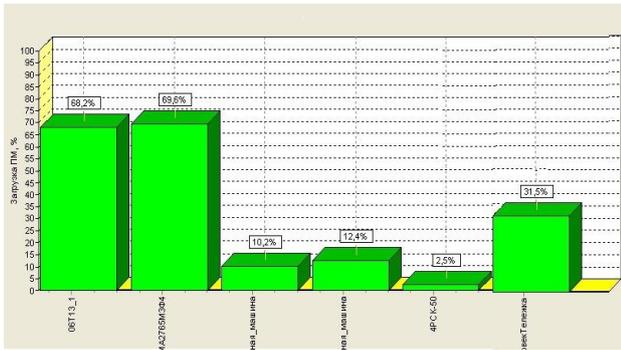


Рис. 14 – Гистограмма загрузки ПМ

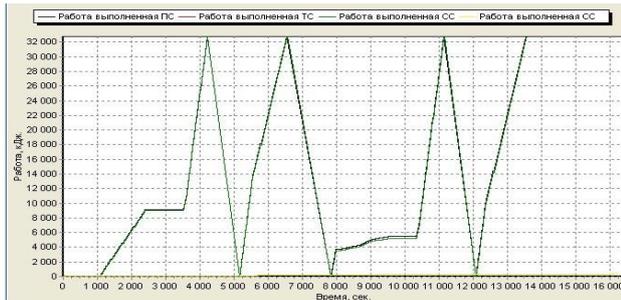


Рис. 15 – График затрат энергии в ПС

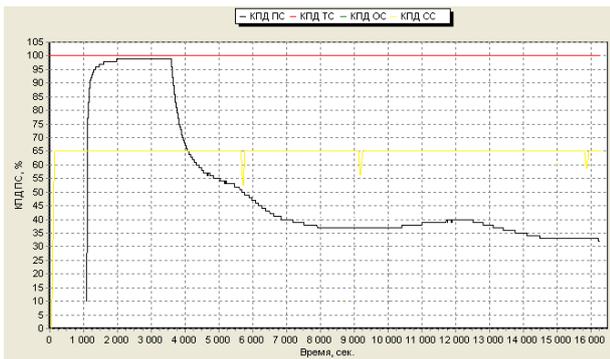


Рис. 16 – График КПД ПС

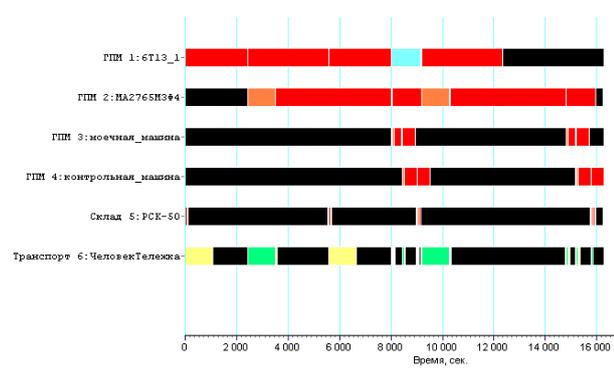


Рис. 17 – Диаграмма Ганта

Выводы. В результате исследований был проведен выбор основного и вспомогательного инструмента для обработки детали «Корпус редуктора» на ГПМ МА276МЗФ4, рассчитаны режимные характеристики для выбранного инструмента, разработана размерная цепь обработки детали, получена технологическая документация процесса обработки, создана управляющая программа обработки детали, создано трехмерное имитационное моделирование процесса обработки детали «Корпус редуктора», проведен анализ эффективности работы ГПС. Все это было выполнено при помощи специальных инженерных программ, что позволило сократить время для расчетов, более точно представить сам процесс обработки, получить более точные результаты исследований, и эти факторы являются серьезным стимулом для дальнейшего развития полной автоматизации машиностроения.

Список литературы: 1. Промышленные роботы в машиностроении. Альбом схем и чертежей : учеб. пособие для технич. ВУЗов / под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. — М. : Машиностроение, 1986. — С. 76. 2. Основы автоматизации машиностроительного производства: учебн. для машиностроит. спец. ВУЗов / Е.Р. Ковальчук, М.Г. Косов, В.Г. Митрофанов [и др.] ; под ред. Ю.М. Соломенцева. - 2-е изд., испр. — М. : Высш. шк., 1999. — С. 295. 3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1985. - С. 322. : ил. 4. Балабанов А.Н. Краткий справочник технолога-машиностроителя / А.Н. Балабанов. — М. : Издательство стандартов, 1992. - С. 291-295. 5. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм [и др.] ; под общ. ред. А.А. Панова. — М. : Машиностроение, 1988. - С. 180. 6. Кучер А.М. Металлорежущие станки (альбом общих видов, кинематических схем и узлов) / А.М. Кучер, М.М. Киватицкий. — М. : Машиностроение, 1972. - С. 164. 7. Общетехнический справочник / под ред. Е.А. Скороходова - 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1982. - С. 15.

Bibliography (transliterated): 1. Solomenceva, Ju.M., eds. *Proyshlennye roboty v mashinostroenii. Al'бом shem i chertezhej: ucheb. posobie dlja tehnic. VUZov.* Moscow : Mashinostroenie, 1986. —76 p. Print. 2. Koval'chuk, E.R., et al. *Osnovy avtomatizacii mashinostroitel'nogo proizvodstva : uchebn. dlja mashinostroit. spec. VUZov.* 2nd ed. Moscow : Vyssh. shk., 1999. — 295 p. Print. 3. Kosilovoj, A.G., and R.K. Meshherjakov, eds. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja.* 2Vols. Vol.1. 4th ed. Moscow : Mashinostroenie, 1985. — 322 p. Print. 4. Balabanov, A.N. *Kratkij spravochnik tehnologa-mashinostroitelja.* Moscow : Izdatel'stvo standartov, 1992. — PP.291-295. Print. 5. Panov, A.A., et al. *Obrabotka metallov rezaniem: Spravochnik tehnologa* Moscow : Mashinostroenie, 1988. — 180 p. Print. 6. Kucher, A.M., and M.M. Kivaticij. *Metallorézhušhie stanki (al'бом obshhих видов, kinematičeskikh shem i uzlov)* Moscow : Mashinostroenie, 1972. —164 p. Print. 7. Skorohodova, Ju.M., eds. *Obshhetehničeskij spravočnik* 2nd ed. Moscow : Mashinostroenie, 1982. — P. 15. Print.

Поступила (received) 19.03.2015

Шелково Александр Николаевич – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (096)-923-49-80, e-mail: shan-56@mail.ru;

Степанов Михаил Сергеевич – док. техн. наук, проф., декан машиностроительного факультета НТУ «ХПИ», тел.: 057)-720-66-25;

Семченко Мария Сергеевна – аспирант, НТУ «ХПИ», тел.: (096)-475-11-99, e-mail: maho-4an@mail.ru.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ БЛОКАМИ

Предлагается методика расчета режимов резания отдельных инструментов при многоинструментной обработке для различных вариантов замены инструмента в процессе эксплуатации и с учетом вероятностного характера стойкости инструмента при заданной наработке на отказ, которая позволяет обеспечить заданный такт выпуска детали с минимальными затратами, связанными с эксплуатацией режущего инструмента, а также минимизировать другие составляющие технологической себестоимости обработки.

Ключевые слова: инструментальная наладка, стойкость инструмента, скорость резания, частота вращения, наработка на отказ.

Введение. Снижению технологической себестоимости выпускаемой продукции уделяется достаточно пристальное внимание в современном машиностроении. Одним из важных факторов влияющих на технологическую себестоимость являются эксплуатационные затраты на режущий инструмент, которые в современном серийном и крупносерийном машиностроительном производстве составляют от 12% до 25%. Особенно актуально решение данной проблемы при использовании инструментальных наладок, когда обработка различных по размерам и конфигурации поверхностей осуществляется различными группами инструментов, объединенных в один инструментальный блок.

Анализ исследований и литературы. Вопросам параметрической оптимизации инструментальных наладок при многоинструментной обработке уделялось большое внимание. Так в [1] детально рассматривались вопросы оптимизации режимов резания при обработке многолезцовыми инструментальными блоками, а в [2,3] вопросы оптимизации скорости резания, связанные с вероятностным проявлением стойкости инструмента при обеспечении заданной наработке на отказ режущего инструмента. Однако, вопросы, связанные с расчетом оптимальных параметров режимов резания при обработке инструментальными блоками, состоящими из концевых режущих инструментов, изучены не до конца. Особенно это относится к учету факторов, которые определяются структурной компоновкой инструментального блока (длины резания инструмента и длины рабочих ходов инструментального блока, требуемый такт выпуска и др.), при назначении параметров резания для каждого инструмента.

Целью данной статьи является исследование факторов, влияющих на назначение оптимальных режимов обработки с точки зрения снижения эксплуатационных затрат на инструмент и разработка основ математической модели структурно-параметрической оптимизации процесса резания.

Общая структура эксплуатационных затрат на режущий инструмент. В общем случае эксплуатационные затраты на режущий инструмент C_{ii} связаны в основном с его переточкой, наладкой и простоями оборудования во время замены инструмента [4].

Анализ факторов влияющих на эксплуатационные затраты показал, что они зависят как от структуры инструментальной наладки (параметры связанные с длиной рабочего хода инструментального блока, длиной резания, сложностью настройки инструмента, временем наладки и замены инструмента и др.), так и от параметров обработки (скорость резания или частота вращения и скорость перемещения инструментального блока). Скорость перемещения инструментального блока определяется необходимостью синхронизации операций и обеспечением необходимого такта выпуска – τ , а с другой стороны влияет на параметры режимов резания и, соответственно, стойкость T_i каждого инструмента блока. Поэтому, если мы не можем варьировать тактом выпуска, так как это обеспечивает требуемую производственную программу выпуска, то, варьируя стойкостью конкретного инструмента, мы можем минимизировать эксплуатационные затраты за счет оптимизации параметров режимов обработки.

В настоящее время существуют несколько основных методов замены инструмента: замена по отказам, замена по жесткому графику, смешенная замена. Наиболее прогрессивной является плановая замена инструмента по жесткому графику, которая, однако, применяется лишь в 15% случаев обслуживания многоинструментных наладок. При таком подходе обычно настройка инструмента производится вне станка, а его замена осуществляется наладчиком, обслуживающим несколько станков. Причем замена производится во время технологического или обеденного перерыва. Тогда из расходов по эксплуатации инструмента исключается статья, связанная с простоем оборудования из-за замены инструмента, так как об-

работка в это время не производится в соответствии с производственным графиком работы. Иными словами, возможна замена инструмента наладчиком без участия основного рабочего по графику, соответствующему времени плановой остановки оборудования в течение производственного цикла (технологический или обеденный перерыв, начало новой смены и др.).

Анализ зависимости затрат на эксплуатацию инструмента от его стойкости для конкретных инструментов и вариантов инструментальных наладок показал, что функция является монотонно убывающей и в случае замены инструмента по отказам носит непрерывный, а для варианта плановой замены инструмента по жесткому графику - кусочно-непрерывный характер (рис. 1).

При возможности организовать замену инструментов по жесткому графику в моменты времени $\{T_{01}, T_{02}, \dots, T_{0m}\}$ для каждого инструмента наладки существует множество граничных значений стойкости $T_{ci} = \{t_{zim} \mid m=1 \dots M\}$, образующих интервалы $[T_{0m}, t_{zim}]$, для которых характерна возможность назначения более рациональной стойкости инструмента по сравнению с расчетной. Если для рассматриваемого инструмента со стойкостью T_i существует интервал такой, что

$$T_{0m} \leq T_i < t_{zim}, \quad (1)$$

то целесообразно производить замену инструмента по жесткому графику, так как в этом случае стоимость эксплуатационных затрат инструмента соответствует стойкости плановой замены инструмента, или

$$C_{ui} = C_{[T_{0m}]} = const \quad \text{при } T_i \rightarrow T_{0m}, \quad (2)$$

и поэтому есть возможность оптимизировать режимы обработки до значений, когда $T_i \approx T_{0m}$ (например, увеличить скорость резания до обеспечения стойкости T_{0m} с одновременным снижением оборотной подачи инструмента), что позволяет сократить некоторые статьи эксплуатационных расходов потребителя, которые зависят в большей степени от подачи инструмента, при постоянстве затрат, связанных с его эксплуатацией.

График технологической остановки оборудования может отличаться от значений, приведенных на рис. 1 и может быть установлен в соответствии с принятой схемой работы на конкретном предприятии. При большом количестве групп инструментов в инструментальном блоке целесообразно использовать разные графики для каждой группы, однако, разработка таких должна осуществляться при проведении технологической подготовки производства с учетом графика работы остальных участков производства.

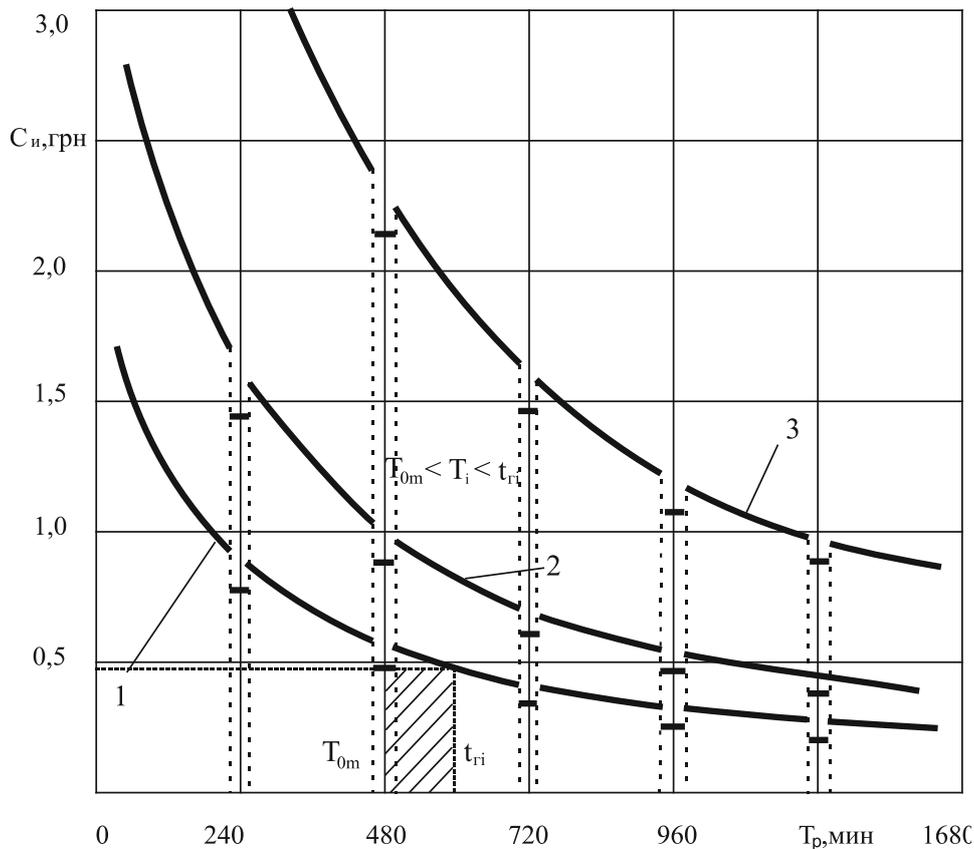


Рис. 1. – Затраты на эксплуатацию инструмента в зависимости от его стойкости при многоинструментной обработке на агрегатном станке: 1 – сверло; 2 – зенкер; 3 – развертка.

В тех случаях, когда условие (1) не выполняется ни для одного интервала, а также, когда нет возможности организовать плановую замену инструмента, более экономично использовать весь ресурс работы инструмента и осуществлять его замену по отказам. Тогда режимы резания целесообразно назначать минимально допустимые исходя из технологических, организационно-технических ограничений и заданной производительности.

Значение t_{zim} и, следовательно, величина интервала $[T_{om}, t_{rim}]$ определяются долей затрат, связанных с простоем оборудования при замене инструмента, и зависит в первую очередь от стоимости оборудования и факторов, влияющих на длительность непосредственно замены инструмента, таких, как конструкция патронов, доступность в зону установки патрона, необходимость дополнительного времени для обеспечения вывода инструмента из зоны обработки при наличии кондукторной втулки и др.

Такой подход позволяет не только разработать наиболее рациональный вариант обработки с использованием инструментальных блоков для существующей на предприятии организации замены инструмента, но и предложить наиболее эффективный способ замены инструмента для конкретного варианта обработки, что позволит в дальнейшем сократить эксплуатационные расходы.

Параметрическая оптимизация работы инструментального блока.

Такт выпуска изделия определяется необходимой производственной программой выпуска, и поэтому принимается в качестве исходной константы при выполнении параметрических расчетов инструментальных наладок, которые безусловно должны обеспечивать требуемые технические характеристики объекта обработки и заданное время.

Установлено, что скорость резания оказывает на стойкость инструмента значительно большее влияние, чем подача, поэтому оптимизацию стойкости инструмента и, следовательно, эксплуатационных затрат целесообразно проводить за счет варьирования именно скорости резания (частоты вращения) инструмента при максимально допустимом значении его подачи [1,2]. Однако, зависимости скорость резания – стойкость носят «горбообразный» характер, поэтому в массовом и крупносерийном производстве при обработке на агрегатных станках и автоматических линиях необходимо проверять возможность обработки на низких режимах резания без ухудшения показателя стойкости инструмента [2]. Иными словами, для каждого варианта обработки существует минимальное допустимое значение скорости резания (частоты вращения), при котором изменение стойкости от скорости резания соответствует классической зависимости.

Это позволяет рассчитать минимальную минутную подачу инструментального блока и частоту вращения каждого инструмента, обеспечивающую заданный такт выпуска. Календарную стойкость инструмента в этом случае можно описать зависимостью

$$T_i = \frac{T_{pi} * T_{bi} * n_{bi}^{\mu_i}}{(T_{pi} - T_{bi}) * \tilde{n}_{mini}^{\mu_i} + T_{bi} * n_{bi}^{\mu_i}} * \frac{\tau}{t_{pi}} * K_{st}$$

где T_i -календарная стойкость i -го инструмента, мин;

T_{pi} - предельно допустимое значение стойкости i -го инструмента для рассматриваемых условий обработки, мин;

T_{bi} - базовое значение стойкости i -го инструмента, для которого определялись нормативные режимы обработки, мин;

t_{pi} - время резания i -го инструмента, мин;

K_{st} - коэффициент, учитывающий вероятность выхода из строя инструмента до наступления расчетного времени наработки на отказ по стойкости инструмента, мин;

n_{bi} - частота вращения i -го инструмента, соответствующая базовой стойкости, об/мин;

\tilde{n}_{mini} - расчетная частота вращения i -го инструмента, обеспечивающая заданный такт выпуска, об/мин;

τ – такт выпуска детали, мин;

μ_i – показатель степени в зависимости скорость резания – стойкость для базовых значений режимов резания для конкретного вида обработки.

Вероятностное распределение стойкости инструментов в подавляющем большинстве случаев подчиняется закону нормального распределения, а коэффициент вариации стойкости при нормальных условиях не превышает 35%. При работе в нормативных диапазонах скорости резания и заданной вероятностью безотказной работы $\gamma=95\%$ коэффициент $K_{st}=0,85\dots 0,8$ при обработке стали и $K_{st}=0,93\dots 0,88$ при обработке чугуна [2].

В случае планово-предупредительной смены инструмента по жесткому графику необходимо подбирать ближайшее меньшее значение из предпочтительного ряда T_{om} . С учетом доли времени резания i -го инструмента в общем времени работы инструментального блока, можно определить частоту вращения каждого i -го инструмента исходя из уравнения:

$$\tilde{n}_i^{\mu_i} - \frac{T_{pi} * T_{bi} * n_{bi}^{\mu_i} * \tau * S_i}{T_{om} * L_i * (T_{pi} - T_{bi})} * \tilde{n}_i + \frac{T_{bi} * n_{bi}^{\mu_i}}{(T_{pi} - T_{bi})} = 0$$

где

\tilde{n}_i - расчетное значение частоты вращения i -го инструмента, обеспечивающее заданную безотказность работы инструмента, об/мин;

S_i - подача i -го инструмента, мм/об;

L_i - длина резания для i -го инструмента, мм.

Для инструментов, которые не лимитируют обработку, необходимо сравнивать полученное значение частоты вращения инструмента с минимально допустимой для данных условий обработки. Минимально допустимое значение скорости резания (частоты вращения) определяется для конкретных условий обработки при которых зависимость стойкость – скорость резания носит нисходящий характер (или допустимая

минимальная скорость резания условно соответствует «горбу» функции). В том случае, если полученное значение меньше граничного $[n]_{min}$, для инструмента назначается граничное значение частоты вращения и корректируется значение подачи для данного инструмента.

Если $\tilde{n}_i < [n]_{min}$,

то $\tilde{S}_i = S_i * \frac{\tilde{n}_i}{[n]_{min}}$; $\tilde{n}_i = [n]_{min}$,

где

$[n]_{min}$ – минимально допустимая частота вращения i -го инструмента, об/мин;

\tilde{S}_i – подача i -го инструмента, скорректированная по принятой частоте вращения, мм/об.

Полученные, с точки зрения эксплуатационных затрат, значения оптимальных частот вращения позволяют определить окончательные значения подачи \tilde{S}_i i -го инструмента. Уточненные значения подачи во многих случаях меньше значений, полученных на этапах предварительных расчетов при условии попадания их в заданные границы, когда возможен съем металла, то есть обработка резанием.

Если значение \tilde{S}_i меньше минимально допустимого, то необходимо либо изменять время рабочего хода инструментального блока и пересчитывать режимы резания всех инструментов блока.

Если $\tilde{S}_i < [S]_{min}$,

то $\tilde{t}_{px} = t_{px} * \frac{\tilde{S}_i}{[S]_{min}}$; $\tilde{S}_i = [S]_{min}$,

где

$[S]_{min}$ – минимально допустимая подача i -го инструмента, мм/об;

\tilde{t}_{px} – время рабочего хода инструментального блока, скорректированное по минимально допустимой подаче, мин.

В тех случаях, когда расчетные характеристики частоты вращения и подачи меньше соответствующих граничных значений необходимо изменять структуру объединения поверхностей для обработки с использованием инструментального блока и полностью пересчитывать параметры всех инструментальных блоков.

Такой подход позволяет более эффективно использовать режущий инструмент, уменьшить воздействие силовых факторов в зоне обработки (увеличить

жесткость системы СПЗИ, продлить срок службы силовых агрегатов), снизить затраты на электроэнергию, а возможно, и остальные статьи технологической себестоимости обработки (при условии соответствия остальным ограничивающим факторам).

Выводы. Установлена количественная взаимосвязь между параметрами процесса резания, тактом выпуска изделия и стойкостью режущего инструмента при различных способах замены инструмента. Разработана методика определения параметров процесса резания при обработке деталей с использованием инструментальных блоков, основанная на анализе целевой функции, в качестве которой используется технологическая себестоимость обработки и, в частности, затраты, связанные с эксплуатацией инструмента. Предлагаемая методика расчета параметров процесса резания может служить основой математической модели для создания системы автоматизированного проектирования структуры и параметров инструментальных блоков при обработке концевым режущим инструментом в условиях жестких требований к такту выпуска изделия использования прогрессивных систем обслуживания инструментальных блоков.

Список литературы: 1. Гильман А.М. Автоматизированное проектирование оптимальных наладок металлорежущих станков. / А.М. Гильман, Г.В. Гостев, Ю.Б. Егоров и др. М. : Машиностроение, 1984. 168с. 2. Даниленко Б.Д. Некоторые вопросы нормирования режимов резания. "Известия ВУЗов. Машиностроение". М. : Машиностроение, №6, 2004. – 352с. 3. Игумнов Б.Н. Расчет оптимальных режимов обработки для станков и автоматических линий. – М. : Машиностроение, 1974. – 198 с. 4. Яковенко И.Э. Оптимизационный синтез инструментальных наладок при многопереходной обработке на специальном оборудовании. / Ю.В. Тимофеев, И.Э. Яковенко, А.А. Пермяков и др. Сборник «Резание и инструмент» вып. 49. Харьков. : ХПИ, 1994. с.26-31.

Bibliography (transliterated): 1. Gil'man A.M. Avtomatizirovannoe proektirovanie optimal'nyh naladok metallorézhuszhih stankov. A.M. Gil'man, G.V. Gostev, Ju.B. Egorov i dr. Moscow. : Mashinostroenie, 1984. – 168 p. Print. 2. Danilenko B.D. Nekotorye voprosy normirovaniya rezhimov rezaniya. "Izvestiya VUZov. Mashinostroenie". Moscow. Mashinostroenie, №6, 2004. – 352 p. Print. 3. Igumnov B.N. Raschet optimal'nyh regimov obrabotki dlya stankov i avtomaticheskikh linij. Moscow. Mashinostroenie, 1974. – 198 p. Print. 4. Jakovenko I.Je. Optimizaciiannyj sintez instrumental'nyh naladok pri mnogoperehodnoj obrabotke na special'nom oborudovanii. Ju.V. Timofeev, I.Je. Jakovenko, A.A. Permjakov i dr. Sbornik «Rezanie i instrument» vyp. 49. Kharkov. : KhPI, 1994. – PP. 26-31. Print.

Поступила (received) 20.03.2015

Яковенко Игорь Эдуардович – канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-707-66-25, e-mail: igor.dych59@gmail.com;

Пермяков Александр Анатольевич – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-707-66-25, e-mail: perm_a@i.ua.

ДІАГНОСТИКА БЕЗВІДМОВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ, ЩО ВИМІРЮЮТЬСЯ

Розв'язується задача технології машинобудування, яка стосується контролю, управління та діагностики технологічних систем. Запропоновано нову формулу розрахунку безрозмірного показника якості технологічної системи з урахуванням номінальних значень вимірювальних характеристик якості виробів машинобудування. Знайдені оцінки параметрів моделей безрозмірного показника якості технологічної системи. Результати досліджень застосовувалися для створення методики оцінки безвідмовності технологічної системи за показниками, що вимірюються

Ключові слова: якість, безвідмовність, надійність, діагностика, технологічна система.

Вступ. Досягнення якості технологічних систем (ТС) можливе тільки за допомогою їхнього контролю, управління та діагностики, що й являє собою одне з важливіших питань технології машинобудування.

Якість технологічної системи включає в себе таке поняття, як її надійність, що є комплексною властивістю. Надійність технологічної системи, в свою чергу, містить поняття безвідмовності.

У відповідності до існуючих стандартів непрацездатний стан технологічної системи – це такий стан, при якому значення хоча б одного параметра чи показника якості продукції, що виготовляється, продуктивності, матеріальних та вартісних витрат на виготовлення продукції, не відповідає вимогам, що встановлені нормативно-технічною, конструкторською й технологічною документацією. В свою чергу, непрацездатний стан технологічної системи за параметрами продукції – це стан технологічної системи, при якому значення хоча б одного параметра чи показника якості продукції, що виготовляється, не відповідає вимогам, що встановлені в нормативно-технічній, конструкторській і технологічній документації. Тому, для забезпечення випуску якісної продукції, розв'язання задач діагностування ТС має важливе значення.

Аналіз останніх досліджень та літератури. З огляду робіт вітчизняних вчених [1, 2, 3], впливає, що розробці нових методів діагностування якості ТС приділяється велика увага. Питання діагностики та оцінки надійності й безвідмовності в техніці не залишаються поза увагою й закордонних авторів [4, 5]. Однак, деякі питання в цьому напрямку не достатньо вивчені, в зв'язку з чим дослідження необхідно продовжити. Так, в роботах [1, 2] та [3, 6] для моделі якості системи у часі був введений безрозмірний параметр, який дозволяє порівнювати різні показники якості. Цей показник може бути застосований тільки при симетричних відхиленнях відносно середини поля допуску й не може застосовуватися для несиметричних відхилень відносно номінальних значень. В роботах [7,8,9], пропонується безрозмірний показник якості ТС, який може застосовуватися для симетрич-

них та несиметричних відхилень відносно номінального розміру. Однак, це нормування не враховує номінальне значення параметра якості.

Метою даної статті є запропонування розрахованої формули для знаходження нормованих безрозмірних параметрів якості з урахуванням номінального показника для моделі безвідмовності ТС, а також розроблення методики розрахунку її безвідмовності за параметрами якості, що досліджується.

Постановка проблеми. Дослідження представленої роботи стосуються аналізу якості та управління ТС. Нормування параметрів якості в [7, 8, 9], тільки дозволяє визначити, який з нормованих параметрів якості ТС виходить за межі інтервалу від мінус одиниці до одиниці та час виходу параметра за ці межі. Таким чином, неможливо здійснювати управління процесом ТС, тобто тільки констатується факт виходу за вказані границі. Для аналізу та діагностики ТС в деяких випадках необхідно знати, як поводить себе номінальний показник якості в часі t .

Наукові дослідження. Як показали дослідження в [7, 8, 9], було запропоновано формули нормування показника якості ТС без врахування номінального параметра, тому було запропоновано формулу нормування безрозмірного показника якості ТС у часі t :

$$r_i(t) = \begin{cases} (x_i(t) - x_{i,o}) / (x_{i,2} - x_{i,o}), & x_{i,o} \leq x_i(t) \leq x_{i,2}, \\ (x_i(t) - x_{i,o}) / (x_{i,o} - x_{i,1}), & x_{i,1} \leq x_i(t) \leq x_{i,o}, \end{cases} \quad (1)$$

де $x_i(t)$ - значення нормованого i -го показника якості в момент часу t , $x_{i,o}$ - оптимальне (номінальне) значення i -го показника, $x_{i,1}$ - нижня межа i -го показника якості системи, $x_{i,2}$ - верхня межа i -го показника якості системи.

В роботах [1, 2, 3, 6, 8] пропонувалися різні оцінки параметрів моделей безрозмірного показника якості ТС. Ці моделі для будь-якого i -го показника якості мають вигляд:

$$f(r) = \frac{(2+\alpha)(1+\alpha)}{r_k^{2+\alpha}} (r-r_0)(r_0+r_k-r)^\alpha \quad (2)$$

$$f(r) = \frac{(2+\alpha)(1+\alpha)}{r_k^{2+\alpha}} (r-r_0)^\alpha (r_0+r_k-r), \quad (3)$$

де $\alpha > -1$ і $r \in [r_0, r_0+r_k]$, α - параметр форми моделі, r_0 - нижня межа безрозмірного показника якості, r_k - теоретичний розмах безрозмірного показника, r - величина безрозмірного показника якості.

Для параметрів цих моделей можливо знайти й інші оцінки, які можуть бути кращими, тобто близькі до оптимальних.

Для отримання оцінок моделі (2) приймемо, що середнє вибіркоче значення \bar{r} нормованих значень співпадає з математичним сподіванням $M(R) = r_0 + 2r_k / (\alpha + 3)$. Квадрат стандартного відхилення S^2 співпадає з теоретичною дисперсією $D(R) = 2(\alpha + 1)r_k^2 / [(\alpha + 3)^2(\alpha + 4)]$, а найменше вибіркоче значення $r_{(1)}$ з математичним сподіванням першої порядкової статистики вибірки об'єму n :

$$\mu_{1:n} = r_0 + r_k \frac{2(2+\alpha)F(3, 1-n; 3+n+\alpha n; -1-\alpha)}{(2+n+\alpha n)(n+\alpha n+1)},$$

де $F(\beta, \gamma, \delta; z)$ - гіпергеометрична функція.

Для знаходження оцінки параметра форми α моделі (2) необхідно розв'язати рівняння:

$$\frac{\bar{r} - r_{(1)}}{S} = \frac{(M(R) - \mu_{1:n})(\alpha + 3)}{r_k} \sqrt{\frac{\alpha + 4}{2(\alpha + 1)}} \quad (4)$$

Оцінка параметра масштабу r_k визначається за знайденим параметром форми α , за формулою:

$$\hat{r}_k = S(\alpha + 3) \sqrt{\frac{\alpha + 4}{2(\alpha + 1)}}, \quad (5)$$

а оцінка параметра r_0 має вигляд:

$$\hat{r}_0 = \bar{r} - 2\hat{r}_k / (\alpha + 3). \quad (6)$$

Для отримання оцінок моделі (3) приймемо, що середнє вибіркоче значення \bar{r} співпадає з математичним сподіванням моделі (3): $M(R) = r_0 + (1+\alpha)r_k / (\alpha + 3)$. Квадрат стандартного відхилення S^2 співпадає з теоретичною дисперсією моделі (2), а найбільше вибіркоче значення $r_{(n)}$ з математичним сподіванням останньої порядкової статистики:

$$\mu_{n:n} = r_0 + r_k - r_k \frac{2(2+\alpha)F(3, 1-n; 3+n+\alpha n; -1-\alpha)}{(2+n+\alpha n)(n+\alpha n+1)}$$

вибірки об'єму n .

Для оцінки параметра форми α необхідно розв'язати рівняння відносно α :

$$\frac{r_{(n)} - \bar{r}}{S} = \frac{(\mu_{n:n} - M(R))(\alpha + 3)}{r_k} \sqrt{\frac{\alpha + 4}{2(\alpha + 1)}} \quad (7)$$

Оцінка масштабного параметра визначається за формулою (5), а оцінка нижньої межі має вигляд:

$$\hat{r}_0 = \bar{r} - (1+\alpha)\hat{r}_k / (\alpha + 3). \quad (8)$$

Параметри моделей (2) та (3) значно відрізняються один від одного в залежності від нормування безрозмірних показників.

Проводивши статистичний аналіз з використанням метода Монте-Карло ста вибірок з об'ємом $n = 20$ для двох моделей з оцінками, знайденими в роботах [1,2,3,6,8], показано, що для моделі (2) кращими оцінками є оцінки (4), (5) та (6) в порівнянні з раніше отриманими оцінками. Ці оцінки дали меншу дисперсію нижньої та верхньої межі й наближені до заданих значень. Для моделі (3) за розкидом виявились кращими оцінки, які використовують формули (7), (5) та (8).

Запропоновані часові безрозмірні моделі якості ТС (2) та (3), й знайдені для них оцінки параметрів на основі розроблених методів, що використовують математичні очікування першої та останньої порядкових статистик, дозволяють запропонувати метод визначення показника якості ТС.

В роботах [7,9] запропонована інша модель показника якості ТС, яка має вигляд:

$$f(r) = k^3(r-a)(b-r)e^{kr} / (e^{kb}(kb-ka-2) + e^{ka}(2+kb-ka)) \quad (a \leq r \leq b), \quad (9)$$

та знайдені оцінки її параметрів.

Оскільки загальна модель розподілу лінійних розмірів [10,11] має верхню та нижню межі та різну форму розподілу, та для неї знайдені оцінки параметрів за результатами експериментів, то для оцінки безрозмірного показника якості ТС можна застосовувати й загальну модель розподілу лінійних розмірів.

Результати досліджень. Використовуючи запропоновані моделі та знайдені оцінки їхніх параметрів, стає можливим запропонувати методику безвідмовності ТС за показниками якості, що досліджуються.

Методика розрахунку безвідмовності ТС полягає в наступному:

1. За результатами 5 – 10 вимірювань в визначені моменти часу t знаходимо значення кожного i -го показника якості ТС.

2. Використовуючи формулу (1), проводимо нормування кожного i -го показника якості в визначені моменти часу t .

3. Для кожного визначеного моменту часу t та кожного i -го показника якості ТС використовуємо чотири запропоновані моделі, й знаходимо для них оцінки нижньої та верхньої межі безрозмірного показника якості.

4. Для моделі (2) застосовуємо формули (4), (5) та (6), а для моделі (3) - формули (7), (5) та (8). Оцінки параметрів розташування для моделі (9) знаходимо з програми в системі Maple, складеної з розрахунко-

вих формул, поданих в [7,9]. Застосовуючи модель лінійного розміру для безрозмірного параметру, знаходимо її оцінки з [10,11].

5. Отримавши для чотирьох моделей оцінку нижнього та верхнього безрозмірного параметра i -го показника якості в задані моменти часу t та побудувавши для кожної моделі інтерполяційний многочлен за точками верхньої та нижньої меж окремо, знаходимо, при якому значенні t ці многочлени дорівнюють плюс одиниці та мінус одиниці.

6. З отриманих чотирьох значень часу t , що співпадають з плюс одиницею, знаходимо найменший час - T_1 , а з чотирьох значень, що співпадають з мінус одиницею, також знаходимо найменший час - T_2 .

7. Визначаючи $T_i = \min(T_1, T_2)$, знаходимо величину безвідмовності i -го показника ТС.

8. Величину безвідмовності ТС визначаємо як $T = \min_{1 \leq i \leq m} T_i$, де m - кількість показників якості ТС.

Висновки.

1. Запропоновано розрахункову формулу для безрозмірного показника якості ТС з урахуванням номінального значення.

2. Для моделей безрозмірного показника якості (2) та (3) знайдені, найкращі з відомих, оцінки їхніх параметрів.

3. Для розрахунків формул оцінок параметрів моделей та часу безвідмовності ТС створені комп'ютерні програми в системі Maple.

4. Запропоновано нову методику оцінки безвідмовності ТС за параметрами якості, що досліджуються.

5. Отримані результати дозволяють вирішувати важливі питання технології машинобудування, що пов'язані з діагностуванням ТС.

Список літератури: 1. Куцин А.Н. Оценка качества технических систем [Текст] / А.Н. Куцин, Ю.И. Созонов // Сборка в машиностроении, приборостроении, М., 2004. - No7. - С.23-27. 2. Арпентьев Б.М. Параметрические показатели качества изделий [Текст] / Б.М. Арпентьев, Н.К. Резниченко // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 7-го Международного научно-технического семинара. г. Свалява. - Киев: АТМ України, 2007. - С.5-9. 3. Резниченко Н.К. Безразмерный комплексный параметр качества технологической системы [Текст] / Н.К. Резниченко // Високи технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць. - Харків: НТУ «ХПІ», 2006. - Вип.1 (12) - С.417-423. 4. Tashouh Ghassan M. Reliability Analysis of Car Maintenance Scheduling and Performance [Text] / Ghassan M. Tashouh, Khalid K. Tashouh, Mutaz A. Al-Muhtaseb, Ahmad T. Mayyas // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 2010. - Vol 4, Number 3, - PP 388 - 393. 5. Montgomery Douglas C. Applied Statistics and Probability for Engineers [Text] / Douglas Montgomery C. George C. Runger, 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc.,

2003, - 157 pp. 6. Созонов Ю.И. Временная модель качества технологической системы [Текст] / Ю.И. Созонов, Н.Ю. Ламнауэр, О.С. Черкашина // Сучасні технології в машинобудуванні. Харків: НТУ «ХПІ», 2010.-Випуск 4. - С. 257-263. 7. Ламнауэр Н.Ю. Расчет показателя качества технологической системы во времени [Текст] / Н.Ю. Ламнауэр // Восточно - Европейский журнал передовых технологий, 2009. -No6/7(42). - С.59-61. 8. Ламнауэр Н. Ю. Оценка безразмерного показателя качества технологических процессов в машиностроении [Текст] / Н.Ю. Ламнауэр, Ю.И. Созонов, О.С. Черкашина // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2010. - 6/4(48). -С.7-10. 9. Ламнауэр Н.Ю. Надежность технологической системы от точности изготовления изделия [Текст] / Н.Ю. Ламнауэр // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2010. - 1/7(43). - С.19-22. 10. Ламнауэр Н.Ю. Модель распределения размеров изделий и ее применение для оценки точности обработки [Текст] / Н.Ю. Ламнауэр // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. - Харків: НТУ «ХПІ», 2012. - No27.- С. 98-107. 11. Ламнауэр Н.Ю. Загальна модель розподілу лінійних розмірів деталей та її застосування для поліпшення якості виробів [Текст] / Н.Ю. Ламнауэр // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. - Харків: НТУ «ХПІ», 2013. - No54(1027).- С.134-143.

Bibliography (transliterated): 1. Kucin, A.N., Sozonov, Y.I. *Ocenka kachestva technicheskikh system*. Moscow: Sborka v mashinostroenii, priborostroenii, 2004. No7. - PP. 23-27. Print. 2. Arpentiev, B.M., Reznichenko, N.K. *Parametricheskie pokazateli kachestva izdeliy*. Kiev: Sovremenniye problemi podgotovki proizvodstva, zagotovitel'nogo proizvodstva, obrabotki, sborki i remonta v promishlennosti I na transporte, 2007. - PP 5-9. Print. 3. Reznichenko, N.K. *Bezrazmerniy kompleksniy pokazatel kachestva technologicheskoy sistemi*. Kharkiv: Visoki technologii v machinobuduvanni NTU «Kh PI», 2006. -PP 417-423. Print. 4. Tashouh, Ghassan M., Tashouh, Khalid K., Al-Muhtaseb, Mutaz A., Mayyas Ahmad T. *Reliability Analysis of Car Maintenance Scheduling and Performance* Jordan: Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 2010. - Vol 4, Number 3, - PP 388 - 393. Print. 5. Montgomery, Douglas C, Runger, George C. *Statistics and Probability for Engineers*. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2003.- 157 p. Print. 6. Sozonov, Y. I., Lamnauer, N.Y., Cherkashina, O.S. *Vremennaya model kachestva technologicheskoy sistemi*. Kharkiv: Suchasni technologii v machinobuduvanni NTU «Kh PI», 2010.- No7 - PP. 257-263. Print. 7. Lamnauer, N.Y. *Raschet pokazatelya kachestva technologicheskoy sistemi vo vremeni*. Vostochno - Evropeyskiy jurnal peredovih technology, 2009. -No6/7(42). - PP.59-61. Print. 8. Lamnauer, N.Y., Sozonov, Y. I, Cherkashina, O.S. *Ocenka bezrazmernogo pokazatelya kachestva technologicheskikh processov v mashinostroenii*. Vostochno - Evropeyskiy jurnal peredovih technology, 2010. - 6/4(48). -PP.7-10 Print. 9. Lamnauer, N.Y. *Nadejnost technologicheskoy sistemi ot tochnosti izgotovleniya izdeliya*. Vostochno - Evropeyskiy jurnal peredovih technology, 2010. - 1/7(43). - PP.19-22. Print. 10. Lamnauer, N.Y. *Model raspredeleniya razmerov izdeliy I ee primenenie dlya ochenki tochnosti obrabotki*. Visnik NTU «KhPI», 2012. - No27.- PP. 98-107. Print. 11. Lamnauer, N.Y. *Zagalna model rozpodilu liniy nih rozmiriv detaley ta yiyi zastosuvannyadlya polipshennya yakosti virobiv*. Visnik NTU «Kh PI», 2012. - No54(1027).- С.134-143. Print.

Поступила (received) 03.03.2015

Наталія Юрїївна Ламнауер – канд. техн. наук, доц. УПА, Харьков, тел.: (057)-733-78-18, e-mail: lamnaouernatali@mail.ru.

ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ СВЕРЛЕНИИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ И МЕХАНИЗМ ПОЯВЛЕНИЯ РАССЛАИВАНИЯ

Рассмотрены физический, технологический и математический аспекты появления дефектов при сверлении многослойных композиционных материалов. Представлен анализ экспериментальных и теоретических исследований образования расслоения и скалывания в заготовке при сверлении. Описан механизм появления таких дефектов и современное состояние проблемы прогнозирования их количественных характеристик. Проанализировано влияние различных технологических факторов на уменьшение величины дефектов, в том числе фактора расслоения. Приведены модели прогнозирования появления дефектов и пути их минимизации в процессе сверления.

Ключевые слова: дефекты сверления, слоистые композиты, расслаивание при сверлении.

Введение. Сложность состава композиционных материалов (КМ), многообразии ориентации волокон или жгутов, различные технологии их получения и обработки обуславливают значительное многообразие дефектов [1-3].

Все дефекты, имеющие место в композиционных материалах, возникающие на стадии изготовления, механической обработки или эксплуатации, принято разделять на дефекты на макро- и микроуровне. К макродефектам относят нарушения оплошности типа расслоения, непроклеи, трещины, воздушные и газовые раковины, соизмеримые с характерными размерами, инородные включения, которые в значительной степени ослабляют интегральную прочность композита. На микроуровне различают местное несоответствие соотношения содержания матрицы и наполнителя, поры, низкую степень отверждения связующего при формовании, нарушение ориентации волокон, всевозможные складки и свили, смятия и другие несовершенства, снижающие местную прочность.

Известные дефекты композитов классифицируют по нескольким признакам: по происхождению, местоположению, глубине залегания и размерам. По степени опасности все дефекты разделены на 7 групп [3].

Различные дефекты по-разному влияют на ухудшение физико-механических характеристик материала, что проявляется в снижении прочностных характеристик [4,5]. Расслоение, прежде всего, вызывает разрушение материала за счет потери межслойной сдвиговой прочности. Величина снижения прочности за счет расслоения определяется расположением и схемой армирования композитов. Она может составлять от 9% для перекрестно армированного композита, до 17% для однонаправленного композита [3]. Сверление, как разновидность повреждения поверхностного слоя, может привести к местному снижению статической прочности до 50% в зависимости от места образования расслоения. Таким образом,

расслаивание при сверлении полимерных композитов относят к одному из наиболее опасных дефектов.

Анализ последних исследований и литературы. При сверлении КМ, как и других конструктивных материалов, возникают дефекты обработки, ухудшающие качество поверхности изделия и вызывающие несоответствие полученных размеров требуемым. Наряду с общими для сверления всех материалов параметрами качества такими, как шероховатость обработанной поверхности, эллиптичность отверстия, несоответствие диаметров входного и выходного отверстия и т.д., при сверлении многослойных композитов существуют свои специфические дефекты обработки, в основном связанные с начальным контактом инструмента и его выходом из заготовки. Разрушение при сверлении было классифицировано многими авторами [6-11], которые выделили следующие явления: разрыв волокон армирования, межслойная трещина, расщепление вдоль волокон, растрескивание и выкрашивание, нарушение адгезионной связи волокно-связующее и термическое разрушение. Эти факторы были рассмотрены и проанализированы в работах [12-15].

Наиболее опасным дефектом является расслаивание между соседними слоями армирования вдоль его направления. Принято считать, что основной причиной появления расслаивания при сверлении многослойных композитов является высокое значение действующей осевой силы, величина которой в основном определяется подачей. Кроме того существенную роль играет также неправильный выбор режущего инструмента и степень его изношенности. Для уменьшения расслаивания известно несколько приемов, например, снижение подачи, что уменьшает осевую силу или сверление в подкладную плиту. В последнее время для уменьшения расслаивания все чаще применяется вибрационное сверление.

Расслаивание является одной из важнейших проблем для конструкций авиастроения и в компьютерной технике. Особенно велика опасность роста

трещин расслаивания под действием растягивающих напряжений так, как в этом случае именно расслаивание влияет на прочность растяжения уложенных слоев. Расслаивание может привести к боковому выпучиванию слоев под действием растягивающих или сжимающих напряжений.

Межслойное расслаивание, возникающее при сверлении многослойных композитов, является главным дефектом, не только уменьшающим целостность композита и его изгибную прочность, но также во многом определяет усталостную прочность под действием циклической нагрузки [17-20]. Рост межслойных трещин расслаивания при действии циклической нагрузки обычно происходит достаточно медленно потому, что амплитуда действующей циклической нагрузки растяжения или сжатия не слишком велика.

Расслаивание традиционно определяют как разъединение слоев наполнителя в многослойном композиционном материале (ламинате). Этот эффект может проявляться по многим причинам: в результате роста начального дефекта (межслойной трещины) в материале в процессе эксплуатации, являться результатом действия внешнего воздействия или взаимодействия с внешней средой, или следствием механической обработки заготовки. Расслаивание является наиболее опасным и коварным дефектом, возникающим при механической обработке композитов. Внешняя недоступность для обнаружения проявляется дальнейшим подрастанием межслойной трещины в процессе эксплуатации, особенно при действии циклической нагрузки. В отличие от других дефектов обработки, таких как растрескивание и выдергивание волокон, расслаивание снижает не только общую прочность материала за счет изменения его структуры, но и долговечность эксплуатации детали.

Цель работы. Целью данной статьи является формирование современных представлений о появлении дефектов качества при сверлении слоистых композиционных материалов, анализ экспериментальных

и теоретических исследований образования расслоения и скалывания в заготовке, прогнозирование качественных и количественных характеристик расслоения и моделирование их зависимости от технологических параметров сверления.

Постановка проблемы. Экспериментальные наблюдения показали, что расслаивание и скалывание появляется вокруг отверстия на входе и выходе инструмента из заготовки, рис.1,2.

Механизм расслаивания подробно рассмотрен в литературе [11,19,20]. Это явление порождается действием поперечной режущей кромки сверла и режущих кромок.

Расслаивание на входе обусловлено контактным взаимодействием поперечной режущей кромки с поверхностью заготовки, когда тонкий поверхностный слой начинает шелушиться и отделяться от соседнего, в результате чего образуется зона расслаивания вокруг входного отверстия, рис.2,а.

Во втором случае, в момент, когда сверло находится на выходе из отверстия, число слоев композита, находящихся перед сверлом, уменьшается и это приводит к снижению общей их жесткости в структуре композита, и, как следствие, к расслаиванию (отслаиванию) последних слоев и разрушению последних волокон (жгутов) в материале, рис.2,б.

Изучению качественных и количественных характеристик этого процесса посвящено достаточно много исследований [8,9,15,22-25].

Степень дефектности выходного отверстия при сверлении многослойных композитов, которую называют растрескиванием или отслаиванием (spalling) определяет качество обработки выходного отверстия. Средний размер зоны растрескивания и ее амплитуда определяется условиями сверления. Так, известно, при сверлении традиционным спиральным сверлом из быстрорежущей стали, величина зоны растрескивания растет с увеличением подачи, но уменьшается с ростом частоты вращения шпинделя.

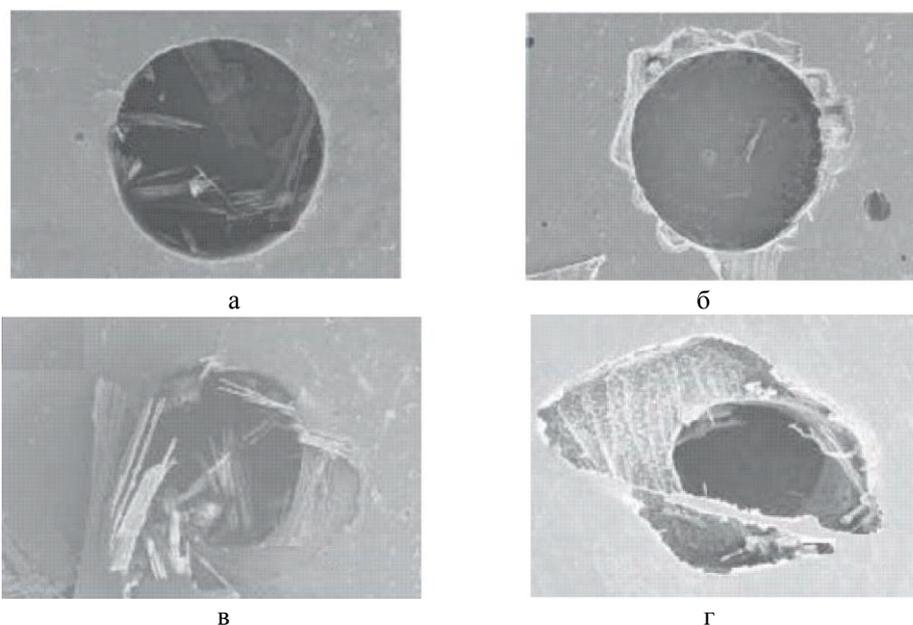


Рис. 1 – Отслаивание при сверлении многослойных композитов: а, б – на входе; в, г – на выходе [21]

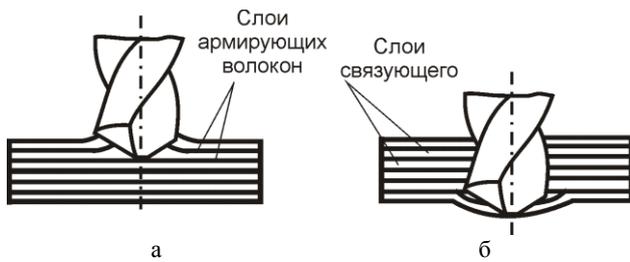


Рис.2 – Механизм образования трещин расслаивания при сверлении композитов: а – на входе инструмента в заготовку; б – на выходе инструмента

Однако влияние подачи намного сильнее, чем частоты вращения шпинделя [27,28]. Некоторые исследования показали, что минимизировать растрескивание можно применением алюминиевых или бакелитовых подкладок под заготовку при сверлении [26,28]. Кроме того, для уменьшения выходного растрескивания, необходимо управлять величиной осевой силы, особенно на этапе, когда поперечная режущая кромка подходит к нижней поверхности заготовки [26,27].

Материалы исследований. Перечисленные выше исследования не достаточны для формирования полного представления о механизме образования дефектов. В результате имеющаяся технология сверления приводит к разрушению верхних и нижних слоев и, как следствие, может допускать в практике обработки образование расслаивания длиной соизмеримой с диаметром отверстия [29].

Итак, многочисленными исследованиями было установлено, что разрушение поверхности на выходе сверла из заготовки (edge defect) в основном бывает в виде расслаивания (растрескивания) и распушивания (разлохмачивания). Общие закономерности появления этих дефектов сводятся к следующему:

- расслаивание (растрескивание) проявляется вдоль направления армирования (вдоль волокон или жгутов) и его размеры обычно больше, чем сопровождающее растрескивание распушивание (разлохмачивание);
- расслаивание (растрескивание) развивается в две фазы, одна фаза инициируется действием поперечной режущей кромки, а другая собственно режущей кромкой;

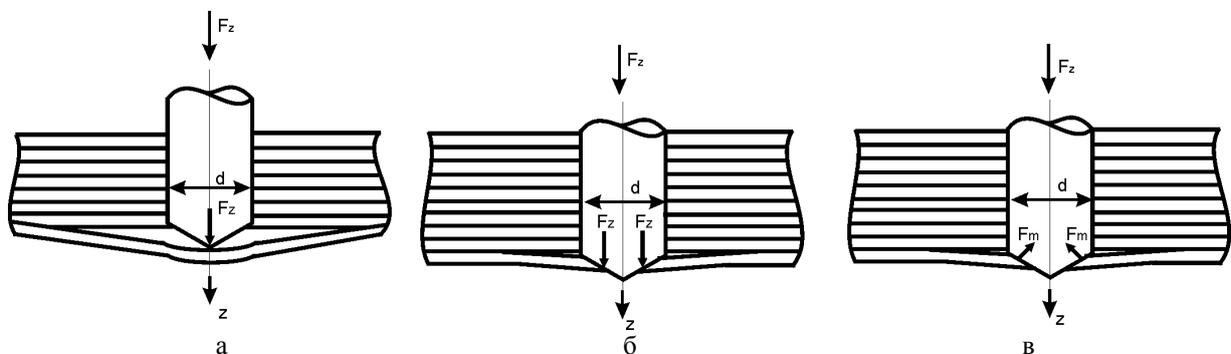


Рис.3 – Общая схема появления и развития трещины расслаивания на выходе инструмента: а – расслаивание под действием поперечной режущей кромки; б – расслаивание непосредственно под действием режущих кромок; в – крутящее воздействие режущих кромок на выходе из заготовки

- первая фаза наступает, когда осевая сила, действующая через поперечную режущую кромку на выходную поверхность заготовки, станет больше некоторой критической величины и заканчивается, когда поперечная режущая кромка только выйдет за пределы заготовки;
- вторая фаза определяется действием режущих кромок и длится до полного выхода инструмента из контакта.

Анализ фотографий выходного отверстия дал возможность сделать вывод о том, что поперечная режущая кромка оказывает сильное влияние на формирование растрескивания. В начале вблизи оси отверстия появляется небольшое выпучивание, которое затем развивается вдоль направления волокон у выходного отверстия, рис.3,а. По мере достижения определенной величины изгиба (выпуклости) начинается фаза действия режущей кромки. Расслаивание, образовавшееся в течение первой фазы, далее активно развивается, рис.3,б, и заканчивается при крутящем действии режущих кромок на выходе из заготовки, рис.3,в.

Поперечная режущая кромка играет ключевую роль так, как воздействует на материал заготовки с большим отрицательным главным передним углом и тратит, по некоторым оценкам, примерно до 50% от величины осевой силы. Эксперименты показывают, что в момент действия поперечной режущей кромки, растрескивание всегда обладает большим размером, чем на заключительной стадии. Рост расслаивания в первой фазе гораздо больше, чем во второй.

Развитие расслаивания (растрескивания) в две фазы порождает образования главной и вторичной области разрушения, рис.4.

Результаты исследований. Главная область имеет максимальное повреждение направленное в своей основе в направлении волокон. Вторичная область мала и образуется в режущей фазе, в которой имеется острый угол между направлением армирования и скоростью резания. Кроме того, здесь часто имеются волокна, которые не были чисто срезаны на краю отверстия. Этот дефект при сверлении носит названия распушивания (разлохмачивания, fuzzing), и формируется в следующих случаях:

- волокно достаточно трудно перерезать в области, где имеется острый угол между направлением армирования и скоростью резания;
- наружный поверхностный слой выходного отверстия является свободной поверхностью так, что волокна не подвергаются срезающим деформациям;
- на выходе инструмента происходит резание деформированного слоя, что приводит к искажению геометрии выходного отверстия.

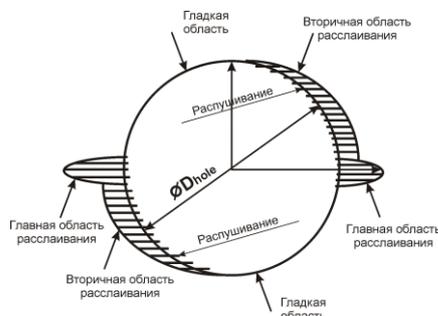


Рис.4 – Модель образования главной и вторичной области разрушения

Расслаивание и разломачивание обычно появляются совместно и их размеры могут изменяться, т.е. большее расслаивание порождает большее разломачивание и наоборот. Появление заусенцев, выдернутых и не срезанных волокон, в виде распушивания-разломачивания определяется в основном действующей осевой силой. С ростом осевой силы эти дефекты не проявляются резко, а плавно нарастают. Это связано с тем, что с увеличением осевой силы зона расслоения возрастает, и большая зона расслоения появляется в большем по длине изогнутом волокне и, следовательно, возрастает число дефектов больших по величине. Однако когда расслоение достигает определенного пространства вокруг отверстия, разломачивание может заметно уменьшиться.

Кроме разломачивания и распушивания на краю входного и выходного отверстий могут образовываться различного вида заусенцы и близкие к ним дефекты, связанные с несрезанными кусочками наполнителя. Такого вида дефекты были классифицированы в [30] на три вида (А, В и С) по месту появления трещины. Тип А характеризуется тем, что заусенцы имеют малую величину и обычно появляются при сверлении очень хрупких материалов. Трещина в этом случае образуется перед вершиной сверла и по наружному краю. Тип В образуется как с формированием вздутия впереди вершины, так и без, когда заготовка испытывает некоторую пластическую деформацию. Трещина инициирует появление заусенцев типа В возникает по краю отверстия. Тип С получается, когда трещина начинается перед вершиной сверла. В этом случае заусенцы имеют форму, подобную цветку и получают большими по величине.

Другим дефектом обработки, который практически всегда сопровождает сверление слоистых композитов, является изменение геометрии выходного отверстия. Как уже упоминалось выше, расслаивание вызывает действующая осевая сила. Сверление про-

должается также после появления расслаивания, и отделившийся слой изгибается под действием осевой силы. Когда слой будет просверлен, осевая сила перестанет действовать и изогнутый слой (рис.2) под действием упругих сил вернется на место.

Модель оценки краевого дефекта [25,31] основана на рассмотрении деформирования слоя, который отделился в течение процесса сверления. Предполагается упругое нагружение, характеризующее напряженно-деформированное состояние волокон как функцию осевой силы. Модель не учитывает деформирование матрицы композита, и ее влияние на краевой дефект не рассматривается. Это допущение оправдано тем, что матрица обычно является более мягким и гибким материалом по сравнению с наполнителем, который может оставаться не перерезанным или частично не перерезанным из-за твердости и хрупкости волокон. Поведение отделившегося слоя в виде волокна и матрицы, описывается теорией изотропной упругой пластины, где влияние матрицы проявляется неявно. Считается, что реализуется процесс идеального резания и материал удаляется полностью. После окончания сверления, осевая сила перестает действовать и за счет упругого деформирования, волокна возвращаются в первоначальное состояние.

Выводы. Из представленных физических представлений, величина разрушения вокруг отверстия возрастает с ростом осевой силы и имеет тенденцию к сглаживанию при значительном увеличении осевой силы. Величина дефектов возрастает с увеличением диаметра отверстия и можно предположить, что несоответствие диаметров будет расти более быстро с его увеличением.

Список литературы: 1. *Cawley P.* Defect types and NDT for composites and bonded joints / *P. Cawley, R. Adams* // *Material Science and Technology*, 1989. – Vol.5. – PP. 406-447. 2. *Круглянский И. М.* Классификатор методов и средств неразрушающего контроля конструкций из полимерных конструкционных материалов [Текст] // *И. М. Круглянский* // *Науч. Труды МАТИ*, 2003. – 6 (78). – С.222-226. 3. *Мурашов В. В.* Дефекты монолитных деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] // *В. В. Мурашов, А. Ф. Румянцева* // *Контроль и диагностика*, 2007.–№4. – С.23-31. 4. *Bar-Cohen Y.* Experimental enhancements of leaky Lamb wave dispersion data acquisition and implementation challenges to NDT of composites / *Y. Bar-Cohen, S.-S. Lih* // *Material Evaluation*, 2000. – V. 58, №6. – P. 801-806. 5. *Незрушающий контроль: справочник в 7-ми т.: под общ. ред. В. В. Клюева, Т.3: Ультразвуковой контроль* / *И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге.* – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. 6. *An optimise drilling process for an aircraft composite structure using design of experiments* [Text] / *M. K. A. Mohd Ariffin, M. I. Mohd Ali, S. M. Sapuan, N. Ismail* // *Journal of Scientific Research and Essay*, 2009. – V.4, N 10. – P. 1109-1116. 7. *Chen W. C.* Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates [Text] / *W. C. Chen* // *Int. J. Machine Tools & Manufacturing*, 1997. – Vol.37. – P. 1097-1110. 8. *Durão P. M. L.* Machining of hybrid composites [Text] // *Thesis, FEUP, Porto*, 2005. – 245 p. 9. *Delamination analysis of carbon/epoxy plates after drilling* / *P. M. L. Durão, A. G. Magalhães, J. M.R. S. Tavares, A. Torres Marques* // http://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/IJMP08_Durao_et_al.pdf. 10. *Valavan U.* Tool life prediction based on cutting forces and surface temperature in edge trimming of multidirectional CFRP composites [Text] // *Thesis, Tamil Nadu, India*, 2003.–235 p. 11. *Vandervelde H.* Drilling processes. In: *Printed circuits handbook* / *Ed. C. F. Coombs, Jr., Ed. Mc. Graw Hill Companies*, 2008. 12. *Bendjaballah D.* Analyse des plaques composites carbone/epoxyde sous l'effet des efforts de perçage / *Thèse, Université Mentouri* – Con-

stantine, 2009. **13.** Bonnet C. Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone / Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2010. **14.** Ghidossi P. Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique / Thèse, L'ENSAM, Châlons-En-Champagne, 2003. **15.** Iliescu D. Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbon/epoxy / Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2008. **16.** Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling on woven CFRPs / N. Feito, J. Diaz-Alvarez, A. Diaz Alvarez, J. L. Cautero, M. H. Miguez // Materials.– 2014.– 7.– P.4258-4271. **17.** Neural network approach for estimate the residual tensile strength after drilling in unidirectional glass fiber reinforced plastic laminates [Text] / R. Mishra, J. Malik, I. Singh, J.P. Davim // Mater. Des., 2010.–31.– P.2790–2795. **18.** Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites [Text] / V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, R.J. Campos, E.A. Correia A, A.M. Abrao P.J. Davim // J. Mater. Process Technology, 2008. –203.– P.431–438. **19.** Jain S. Delamination-free drilling of composite laminates [Text] / S. Jain, D.C.H. Yang // Journal of Engineering for Industry, 1994. –116.– P.475–481. **20.** Hocheng H. Delamination during drilling in composite laminates [Text] / H. Hocheng, C.K.H. Dharan // Journal of Engineering for Industry, 1990. –112.– P.236–239. **21.** Sharma S. C. Delamination during drilling polyurethane foam composite sandwich structures [Text] / S.C. Sharma, M. Krishna, H.M.N. Murth // Journal of Materials Engineering and Performance, 2005.–Vol.15, N3. – P.306-310. **22.** Hocheng H. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits [Text] / H. Hocheng, C.C. Tsao // Journal of Materials Processing Technology, 2003. – Vol. 140. – P. 335-339. **23.** Tsao C. C., Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [Text] // International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2008.– Vol.37.– P.23-28. **24.** Tsao C. C. The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials [Text] / C.C. Tsao, H. Hocheng // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003.– Vol.43.– P.1087-1092. **25.** Vijayaraghavan A. Drilling of fiber-reinforced plastics – Tool modelling and defect prediction // <http://www.optimet.com/publications/Quantify-edge-defects-in-drilled-FRP-Composites.pdf>. 2006. **26.** Luo H. Machining of Difficult-to-Cut Materials [Text] / H. Luo, D. Chen // Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, Beijing, 1988. **27.** Fan H. Study On The Drilling of Composites [Text] // Beijing Institute of Aeronautics, Master thesis, Beijing, 1985. **28.** Wang Y. Assembly of Composite Structures [Text] / Y. Wang, Q. Zhang // The Publishing House of National Defense Industry, Beijing, 1992. **29.** Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin // Composite Structures, 2001.–Vol.52.– P.511–516. **30.** Ko S. L. Burr minimizing scheme in drilling [Text] / S.L. Ko, J.E. Chang, G.E. Yang // J. Mater. Process. Technology. –2003. – Vol.140. – P.237-242. **31.** Vijayaraghavan A. Quantifying Edge Defects in Drilled FRP Composites [Text] / A. Vijayaraghavan, D. Dornfeld, C. K.H. Dharan // This paper is posted at the eScholarship Repository, University of California. http://repositories.cdlib.org/lma/codef/vijayaraghavan_06_1.

Bibliography (transliterated): **1.** Cawley P. *Defect types and NDT for composites and bonded joints* P. Cawley, R. Adams Material Science and Technology, 1989. – Vol.5. – PP.406-447. **2.** Kruglyanskiy I. M. *Klassifikator metodov i sredstv nerazrushayushego kontrolya konstruksiy iz polimernykh konstruksionnykh materialov [Tekst]* / I. M. Kruglyanskiy Nauch. Trudy MATI, 2003. – 6 (78). – PP.222-226. **3.** Murashov V. V. *Defekty monolitnykh detaley i konstruksiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov i metody ih vyyavleniya. Chast 1. Defekty monolitnykh detaley i konstruksiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Tekst]* V. V. Murashov, A. F. Rumyantsev // Kontrol i diagnostika, 2007.–Vol.4. – PP.23-31. **4.** Bar-Cohen Y. Experimental enhancements of leaky Lamb wave dispersion data acquisition and implementation challenges to NDT of composites / Y. Bar-Cohen, S.-S. Lih Material Evaluation, 2000. – Vol. 58, No6. – PP. 801-806. **5.** *Nerazrushayuschiy kontrol: spravochnik v 7-mi t.: pod obsch. red. V. V. Klyueva, T.3: Ultrazvukovoy kontrol / I. N. Ermolov, Yu. V. Lange.– Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 864 p.* **6.** *An optimize drilling process for an aircraft composite structure using design of*

experiments [Text] M. K. A. Mohd Ariffin, M. I. Mohd Ali, S. M. Sapuan, N. Ismail // Journal of Scientific Research and Essay, 2009. – Vol.4, N 10. – PP. 1109-1116. **7.** Chen W. C. *Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates [Text]* W. C. Chen Int. J. Machine Tools & Manufacture, 1997. – Vol.37. – PP. 1097-1110. **8.** Durão P. M. L. *Machining of hybrid composites [Text]* Thesis, FEUP, Porto, 2005. – 245 p. **9.** *Delamination analysis of carbon/epoxy plates after drilling* P. M. L. Durão, A. G. Magalhães, J. M.R. S. Tavares, A. Torres Marques http://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/IJMPT08Duraao_et_al.pdf. **10.** Valavan U. *Tool life prediction based on cutting forces and surface temperature in edge trimming of multidirectional CFRP composites [Text]* Thesis, Tamil Nadu, India, 2003.–235 p. **11.** Vandervelde H. *Drilling processes. In: Printed circuits handbook* Ed. C. F. Coombs, Jr., Ed. Mc. Graw Hill Companies, 2008. **12.** Bendjaballah D. *Analyse des plaques composites carbone/epoxyde sous l'effet des efforts de perçage* Thèse, Université Mentouri – Constantine, 2009. **13.** Bonnet C. *Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V Composite fibre de carbone* / Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2010. **14.** Ghidossi P. *Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique* Thèse, L'ENSAM, Châlons-En-Champagne, 2003. **15.** Iliescu D. *Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbon/epoxy* / Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2008. **16.** *Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling on woven CFRPs* N. Feito, J. Diaz-Alvarez, A. Diaz Alvarez, J. L. Cautero, M.H. Miguez // Materials.– 2014.– 7.– PP.4258-4271. **17.** *Neural network approach for estimate the residual tensile strength after drilling in unidirectional glass fiber reinforced plastic laminates [Text]* R. Mishra, J. Malik, I. Singh, J.P. Davim Mater. Des., 2010.–31.– PP.2790–2795. **18.** *Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites [Text]* V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, R.J. Campos, E.A. Correia A, A.M. Abrao P.J. Davim J. Mater. Process Technology, 2008. –203.– PP.431–438. **19.** Jain S. *Delamination-free drilling of composite laminates [Text]* S. Jain, D.C.H. Yang Journal of Engineering for Industry, 1994. –116.– PP.475–481. **20.** Hocheng H. *Delamination during drilling in composite laminates [Text]* H. Hocheng, C.K.H. Dharan Journal of Engineering for Industry, 1990. –112.– PP.236–239. **21.** Sharma S.C. *Delamination during drilling polyurethane foam composite sandwich structures [Text]* S.C. Sharma, M. Krishna, H.M.N. Murth Journal of Materials Engineering and Performance, 2005.–Vol.15, No3. – OP.306-310. **22.** Hocheng H. *Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits [Text]* H. Hocheng, C.C. Tsao Journal of Materials Processing Technology, 2003. – Vol. 140. – PP. 335-339. **23.** Tsao C. C., *Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [Text]* International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2008.– Vol.37.– PP.23-28. **24.** Tsao C. C. *The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials [Text]* C.C. Tsao, H. Hocheng International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003.– Vol.43.– PP.1087-1092. **25.** Vijayaraghavan A. *Drilling of fiber-reinforced plastics – Tool modelling and defect prediction* <http://www.optimet.com/publications/Quantify-edge-defects-in-drilled-FRP-Composites.pdf>. 2006. **26.** Luo H. *Machining of Difficult-to-Cut Materials [Text]* H. Luo, D. Chen Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, Beijing, 1988. **27.** Fan H. *Study On The Drilling of Composites [Text]* Beijing Institute of Aeronautics, Master thesis, Beijing, 1985. **28.** Wang Y. *Assembly of Composite Structures [Text]* Y. Wang, Q. Zhang The Publishing House of National Defense Industry, Beijing, 1992. **29.** *Drilling of composite structures* F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin Composite Structures, 2001.–Vol.52.– PP.511–516. **30.** Ko S. L. *Burr minimizing scheme in drilling [Text]* S.L. Ko, J.E. Chang, G.E. Yang J. Mater. Process. Technology. –2003. – Vol.140. – PP.237-242. **31.** Vijayaraghavan A. *Quantifying Edge Defects in Drilled FRP Composites [Text]* A. Vijayaraghavan, D. Dornfeld, C. K.H. Dharan This paper is posted at the eScholarship Repository, University of California. http://repositories.cdlib.org/lma/codef/vijayaraghavan_06_1.

Поступила (received) 05.03.2015

Хавин Геннадий Львович – канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: gen-nadiy.khavin@mail.ru.

Робота виконана по проекту М2133Ф фінансированого Міністерством освіти та науки України.

Г.П. Клименко, В.С. Гузенко, И.И. Полупан

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСИЛИЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЫ ПО ЦИЛИНДРИЧЕСКОМУ ОТВЕРСТИЮ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СБОРНОГО РЕЗЦА

В статье приведены результаты исследований влияния величины силы закрепления по цилиндрической поверхности отверстия режущей пластины на прочностные и динамические характеристики усовершенствованной конструкции сборного чашечного резца для обработки колесных пар. Установлено, что существенное влияние величины радиальной силы закрепления по цилиндрической поверхности отверстия режущей пластины оказывает на жесткостные характеристики конструкции сборного чашечного резца.

Ключевые слова: сборный чашечный резец, цилиндрическая поверхность, жесткость, прочность, динамические характеристики, колесная пара, угол конуса оправки.

Введение. Процесс восстановления профиля колесных пар на колесотокарных станках представляет собой сложную технологическую операцию, которая характеризуется относительно невысокой производительностью и целым рядом особенностей. Для процесса обточки колес характерно колебание в широком диапазоне припуска, твердости обрабатываемой поверхности. В зависимости от вида повреждения профиля колесной пары глубина резания может достигать 14-16 мм, а твердость обрабатываемой поверхности - до 900 НВ и более. Кроме того, колесо имеет сложный фасонный профиль, что приводит в процессе обработки к изменению угла контакта режущего инструмента с деталью от 0 до 105°, т.е. ширина среза может в определенный момент достигать 27,5 мм. Перечисленные факторы, и их изменение в процессе обработки приводят при работе с заранее запрограммированным режимом к сложным колебаниям тепловой и силовой нагрузок на инструмент, что влечет за собой преждевременный выход инструмента из строя из-за выкрашивания и поломок режущей пластины, а так же пластических деформаций или разрушения элементов механического крепления [1,2].

Анализ последних исследований и литературы. Анализ методов восстановления профиля обода колесных пар показал, что в ближайшем будущем приоритет сохранится за лезвийной обработкой - точением на колесотокарных станках по копиру или программе [1].

В настоящее время наибольшее применение для черновой и чистовой обработки получили чашечные резцы с механически закрепляемыми пластинами различного диаметра из твердого сплава. Недостатком применяемых конструкций является отсутствие надежного базирования и закрепления в радиальном направлении по цилиндрической поверхности отверстия режущей пластины.

Целью данной статьи является исследование влияния величины силы закрепления по цилиндриче-

ской поверхности отверстия режущей пластины на прочностные и динамические характеристики усовершенствованной конструкции сборного чашечного резца для обработки колесных пар.

Постановка проблемы. Процесс механической обработки колесных пар точением характеризуется рядом особенностей: колебанием в широком диапазоне припуска, твердости обрабатываемой поверхности [2]. В зависимости от вида повреждения профиля колесной пары глубина резания является переменной величиной и может достигать (14-16) мм, а твердость обрабатываемой поверхности - до 900 НВ и более. Кроме того, колесо имеет сложный фасонный профиль, что приводит в процессе обработки к изменению угла контакта режущего инструмента с деталью, поэтому ширина среза может на некоторых участках профиля колеса достигать 27 мм. Перечисленные факторы, и их изменение в процессе обработки приводят при работе с заранее запрограммированным режимом к сложным колебаниям тепловой и силовой нагрузок на инструмент, что влечет за собой преждевременный выход инструмента из строя из-за выкрашивания и поломок режущей пластины, а так же пластических деформаций или разрушения элементов механического крепления режущей пластины и корпуса инструмента.

Материалы исследований. Для obtачивания профиля поверхности обода колес на колесотокарных станках применяют резцы различной конструкции с использованием различных инструментальных материалов и форм пластин. Наибольшее применение для черновой и чистовой обработки получили чашечные резцы с напайными или механически укрепляемыми пластинами различного диаметра из твердого сплава марки Т14К8 или Т5К10. На отдельных вагоноремонтных предприятиях используют для черновой обработки поверхности катания, фаски и гребня колесных пар на станках моделей UBВ 112, 1А936, 1ТСН, 1ТСН/А напайные резцы со стандартными пластина-

ми типов 1636 и 1639 (ГОСТ 2209-69) из твердого сплава марок ВК8, Т5К10 и Т15К6. Также для черновой обработки применяют резцы с механическим креплением стандартных пластин.

Чашечные резцы различных диаметров выпускают с напайными пластинами и сборными с механическим креплением пластин преимущественно из твердого сплава марки Т14К8. Выпускают также чашечные резцы диаметрами 30,8 и 45,6 мм из быстрорежущей стали марки Р6М3 или Р18 с твердостью режущей части после термообработки HRC 62-65. Сборные чашечные резцы с механическим креплением выпускают с пластинами из стандартных (форма 12 по ГОСТ 2209-82) и нормализованных (ТУ 48-19-113-74) заготовок с укороченной и удлиненной оправкой.

С целью повышения надежности базирования и закрепления в радиальном направлении по цилиндрической поверхности отверстия режущей пластины, а также улучшения жесткостных характеристик сборного чашечного резца, была разработана усовершенствованная конструкция сборного инструмента [3], показанная на рисунке 1, которая состоит из державки 1, оправки 2, режущей пластины 3, упругой разрезной втулки 4, болта 5, гайки 6. Торцовая поверхность цилиндрического выступа оправки выполнена конической и контактирует с конической частью упорной разрезной втулки, противоположная сторона которой контактирует с торцовой частью головки болта. Оправка прижимается к державке с помощью гайки 6. Для анализа прочности и жесткости крепления режущих пластин рассматриваемых конструкций производился расчет нормальных напряжений режущей кромки в базовой и усовершенствованной конструкциях сборного чашечного инструмента в среде программного пакета ANSYS. Для построения расчетной схемы и определения напряжений в режущей кромке чашечной пластины применялись методы, указанные в работе [4].

К режущей кромки сборного чашечного инструмента были приложены максимально возможные составляющие силы резания: $P_x = 8$ кН, $P_y = 5$ кН, $P_z = 16$ кН, которые возникают при черновой обработке колесных пар локомотивов на колесотокарном станке 1836.

Для определения влияния угла наклона конусной оправки α на условия закрепления режущей пластины в плоскости XY, а также характер и величину напряжений в пластине инструмента, были выполнены расчеты для следующих значений угла $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$.

Значения напряжений анализировались на режущей пластине в точках наибольшей их концентрации: вблизи крепления винтом (точка 1), вблизи режущей кромки (точка 2). Пример такого расчета показан на рисунке 2.

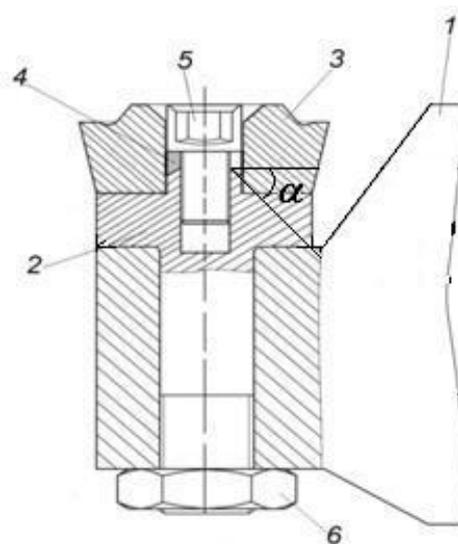


Рис. 1 – Усовершенствованная конструкция сборного чашечного резца

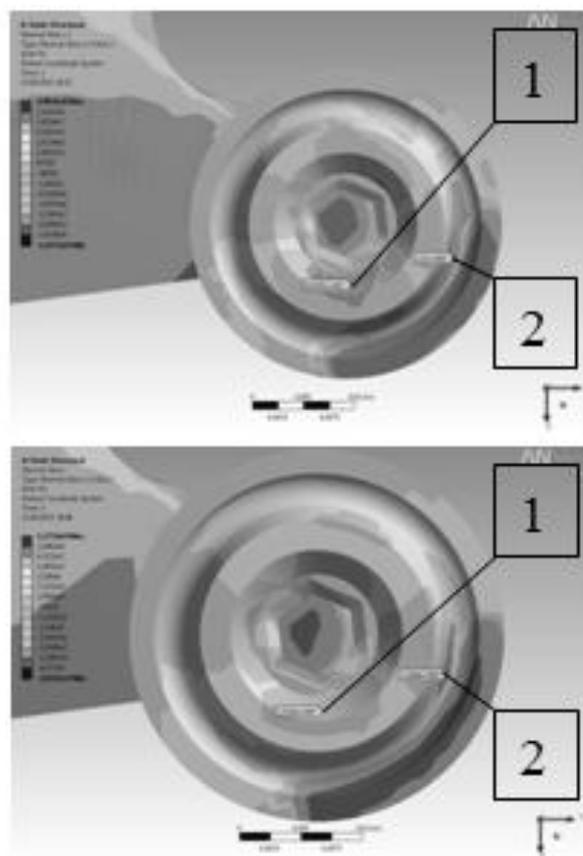


Рис. 2 – Распределение нормальных напряжений σ_{xy} в режущей пластине резца в зависимости от угла α конуса втулки

На рисунке 3 представлены результаты расчета нормальных напряжений в зависимости от угла α сборного чашечного резца в указанных точках в направлении оси x в среде прикладного пакета ANSYS.

Динамический расчет сборной конструкции чашечного резца выполнялся путем построения амплитудно-частотной характеристики для основной собственной формы колебаний режущей пластины (перемещения определялись в точке 2), как это показано на рисунке 4.

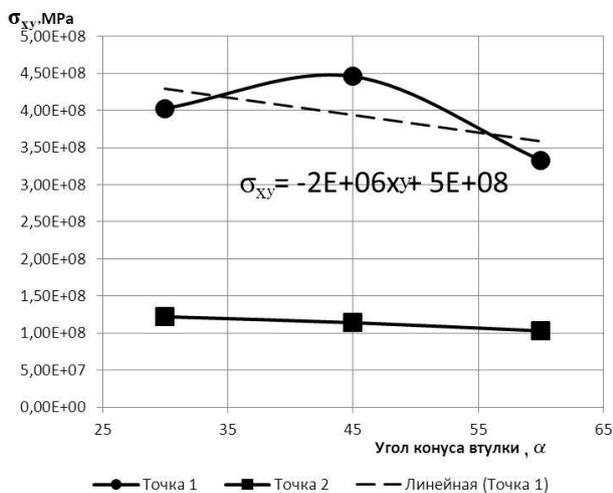


Рис. 3 – График зависимости нормальных напряжений σ_{xy} в режущей пластине резца в зависимости от угла α конуса втулки в точках 1 и 2

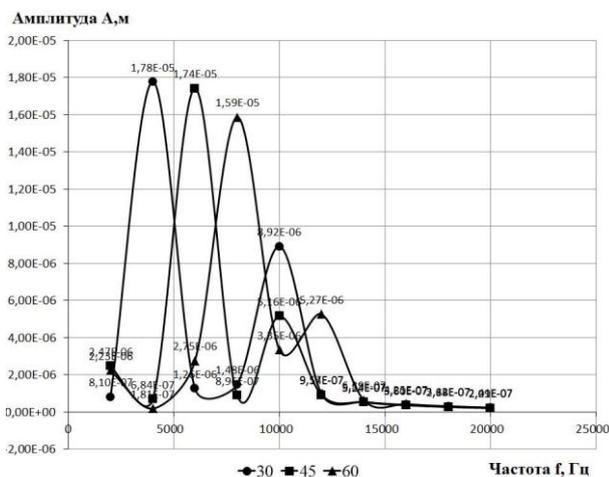


Рис. 4 – Амплитудно-частотные характеристики собственных колебаний режущей пластины резца в зависимости от угла α конуса втулки

Результаты исследований. В результате анализа полученных зависимостей установлено, что вблизи режущей кромки (точка 2) максимальные напряжения $\sigma_{xy}=125$ МПа возникают при угле конуса $\alpha=30^\circ$, а минимальные $\sigma_{xy}=100$ МПа, – при угле

конуса $\alpha=60^\circ$. Вблизи крепления пластины винтом (точка 1) максимальные напряжения $\sigma_{xy}=450$ МПа возникают при угле конуса $\alpha=45^\circ$, а минимальные $\sigma_{xy}=320$ МПа, – при угле конуса $\alpha=60^\circ$.

Динамический анализ показал, что при увеличении угла α до 60° имеем уменьшение амплитуды колебаний (от 18 мкм при $\alpha=30^\circ$ до 9 мкм при $\alpha=60^\circ$) в 2 раза. Частота собственных колебаний режущей пластины увеличивается со значения 4 кГц при угле $\alpha=30^\circ$ до 8 кГц при угле конуса при $\alpha=60^\circ$, то есть АЧХ перемещается в область более высоких частот, что говорит о более жестком закреплении режущей пластины.

Выводы.

Величина напряжений в режущей пластине сборного чашечного резца в радиальной плоскости уменьшилась в 1,4 раза.

Амплитуда колебаний режущей пластины уменьшилась в 2 раза, а частота увеличилась в 2 раза.

Таким образом, проведенные исследования показали, что рациональным углом конуса оправки с целью максимально жесткого закрепления режущей пластины в плоскости XY является угол $\alpha=60^\circ$.

Список литературы: 1. Богданов А.Ф. Восстановление профиля поверхности катания колёсных пар / А.Ф. Богданов, И.А. Иванов., М. Ситаж // СПб.: ПГУПС, 2000. 2. Машнев М.М. Экономическая оптимизация процесса восстановления профиля поверхностей катания колёсных пар обточкой после отжига их при нагреве токами высокой частоты / М.М. Машнев В.В. Диденко, А.П. Шифман, И.А. Иванов, А.Д. Аleshin. // Конструкционно-технологическое обеспечение надежности подвижного состава. Сборник научных трудов. Ленинград: ЛИИЖТ, 1985, с. 48-53. 3. В.С. Гузенко, И.И. Полупан. Різальний інструмент. Патент 32230, Україна, МКІ В23В 27/16. - Оpubл. 12.05.2008. Бюл.№9. 4. Гузенко В.С. Повышение эксплуатационных характеристик чашечного резца для колесотокарного станка / В.С. Гузенко, С.Л. Миранцов, И.И. Полупан // Надежность режущего инструмента. Сб. статей. Вып. 22/ Краматорск: ДГМА, 2007, С. 41-45.

Bibliography (transliterated): 1. Bogdanov A.F., Ivanov I.A., Sitazh M. *Vosstanovlenie profilya poverhnosti katanija koljosnyh par* / A.F. Bogdanov., I.A. Ivanov., M. Sitazh. Sankt Peterburg: PGUPS, 2000. 2. Mashnev M.M. *Jekonomicheskaja optimizacija processa vosstanovlenija pro-filya poverhnostej katanija kolesnyh par obtochkoy posle otzhiga ih pri nagreve tokami vysokoj chastoty* M.M. Mashnev V.V. Didenko, A.P. Shifman, I.A. Ivanov, A.D. Aleshin. Konstrukcionno-tehnologicheskoe obespechenie nadezhnosti podvizhnogo sostava. Sbornik nauchnyh trudov. Leningrad: LIIZhT, 1985. – PP. 48-53. 3. V.S. Guzenko, I.I. Polupan. *Rizal'nij instrument*. Patent 32230, Ukraina, MKI V23Vol 27/16. - Opubl. 12.05.2008. Bjul.No9. 4. Guzenko V.S. *Povyshenie jekspluatacionnyh harakteristik chashechnogo rezca dlja kolesotokarnogo stanka* V.S. Guzenko, S.L. Mirancov, I.I. Polupan Nadezhnost' rezhushhego instrumenta. Sb. ctatej. Publ. 22. Kramatorsk: DGMA, 2007, PP. 41-45.

Поступила (received) 21.03.2015

Клименко Галина Петровна – зав. кафедрой, док. техн. наук, проф. ДГМА, Краматорск;
 Гузенко Виталий Семенович – канд. техн. наук, проф. каф. КМСИТ ДГМА, Краматорск, e-mail: ntc_instrument@mail.ru;
 Полупан Иван Иванович – ассистент каф. КМСИТ ДГМА, Краматорск, e-mail: ivan_polupan@mail.ru.

E. Konoplyanchenko, V. Kolodnenko, W. Atalawei

SAVING DISASSEMBLY AT HEAVY-DUTY GAS TURBINE COMPRESSOR REENGINEERING

In a paper the considered questions of a machine industry hard loaded responsible products resource saving at a stage of their repair, on an example of the heavy-duty gas-turbine compressors. The main causes of failure and include the results of turbo systems. The modern concept of the rational search path to the failed element of sophisticated equipment. The technique of safe disassembly of their element base in view of maintenance specificity conditions of and residual influence on an environment is stated. Practical application of the offered approach will allow to increase quality and safety of special assignment, and introduction of the formalized technique in conditions of real manufacture will allow increase in level of efficiency and the use of available means of complex technological equipment.

Keywords: repair, selective disassembly, heavy-duty compressors, gas-turbine, resource saving.

INTRODUCTION

In modern manufacture, in many areas of the industry heavy-duty gas turbine have found application (Figure 1)[16].

Distinctive feature of such equipment is:

- the big size;
- the big weight;
- high cost of components;
- increased requirements to manufacture, maintenance and repair of the equipment.

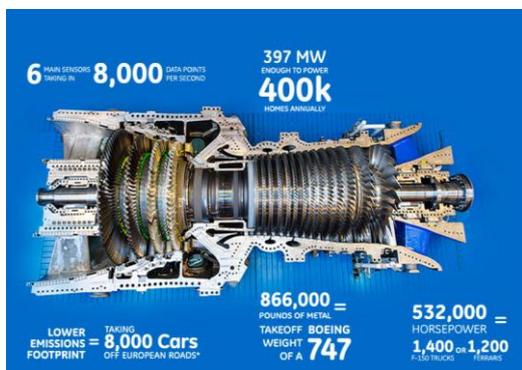
Maintenance costs and machine availability are two of the most important concerns to a heavy-duty gas turbine equipment owner. Therefore, a well thought out maintenance program that reduces the owner's costs while increasing equipment availability should be instituted. General Electric (GE) have Gas turbine maintenance program. For this maintenance program to be effective, owners should develop a general understanding of the relationship between the operating plans and priorities for the plant, the skill level of operating and maintenance personnel, and all equipment manufacturer's recommendations regarding the number and types of inspections, spare parts planning, and other major factors affecting component life and proper operation of the equipment.

Advanced planning for maintenance is necessary for utility, industrial, independent power, and cogeneration plant operators in order to maintain reliability and availability. The correct implementation of planned maintenance and inspection provides direct benefits in the avoidance of forced outages, unscheduled repairs, and downtime. The primary factors that affect the maintenance planning process are shown in Figure 2. The owners' operating mode and practices will determine how each factor is weighted. Gas turbine parts requiring the most careful attention are those associated with the combustion process, together with those exposed to the hot gases discharged from the combustion system. These are called the combustion section and hot gas path parts, and they include combustion liners, end caps, fuel nozzle assemblies, crossfire tubes, transition pieces, turbine nozzles, turbine stationary shrouds, and turbine buckets.

Gas turbines wear differently in continuous duty application and cyclic duty application, as shown in Figure 3.



a



b

Fig.1 - Heavy-duty gas turbine:
a – typical construction; b – heavy-duty parameters



Fig.2 - Key factors affecting maintenance planning

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Continuous Duty Application - Rupture - Creep Deflection - Corrosion - Oxidation - Erosion - High-Cycle Fatigue - Rubs/Wear - Foreign Object Damage | <ul style="list-style-type: none"> • Cyclic Duty Application - Thermal Mechanical Fatigue - High-Cycle Fatigue - Rubs/Wear - Foreign Object Damage |
|---|---|

Fig.3 - Causes of wear – hot gas path components

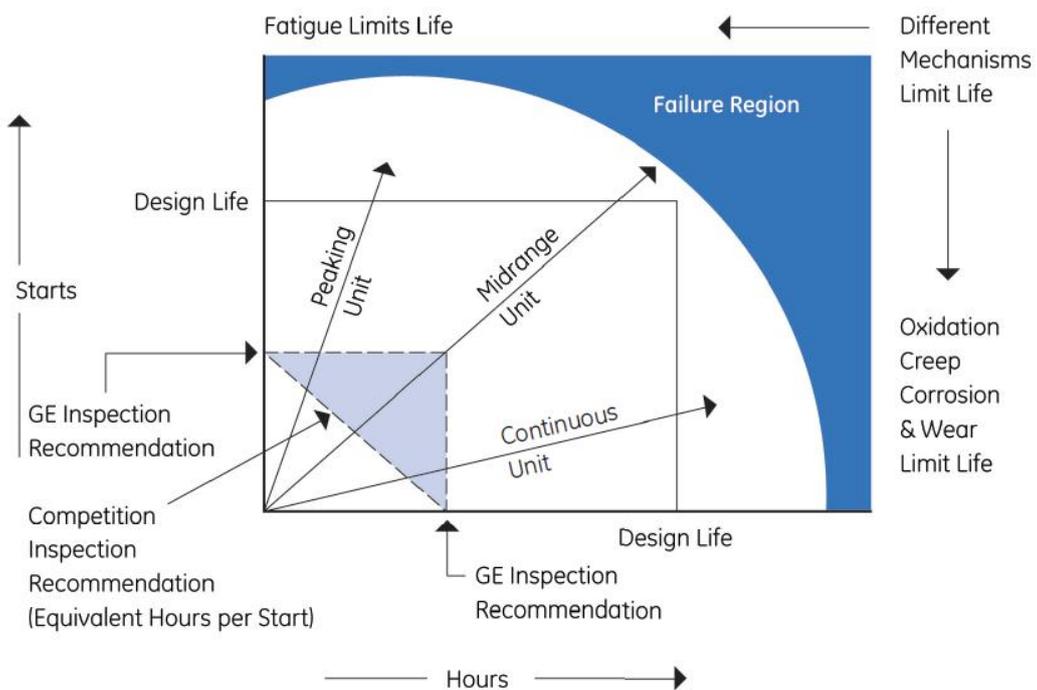


Fig. 4 - GE bases gas turbine maintenance requirements on independent counts of starts and hours

Thermal mechanical fatigue is the dominant life limiter for peaking machines, while creep, oxidation, and corrosion are the dominant life limiters for continuous duty machines. Interactions of these mechanisms are considered in the GE design criteria but to a great extent are second-order effects. For that reason, GE bases gas turbine maintenance requirements on independent counts of starts and hours. Whichever criteria limit is first reached determines the maintenance interval. A graphical display of the GE approach is shown in Figure 4. In this figure, the inspection interval recommendation is defined by the rectangle established by the starts and hours criteria. These recommendations for inspection fall within the design life expectations and are selected such that components acceptable for continued use at the inspection point will have low risk of failure during the subsequent operating interval.

STATEMENT OF THE PROBLEM

At a stage of gas turbine maintenance and repair there is their necessity for disassembly for access to the failed detail or a unit. It is known, that full disassembly of the equipment at repair – one of undesirable operations as even at the most qualified safe disassembly interface of the worn-in details and a normal tightness in slots with motionless landings are disturbed. The part of details at disassembly is damaged (inflow, paws, flanges break, edges of bolts, nuts get off, rivets and etc.). Aggregates and the details which are not demanding repair, at all it is not recommended to remove from the equipment because of possible lowering working capacity of machines as a whole. Therefore before disassembly of the equipment it is important to define objective necessity of execution of operations.

Modern direction in disassembly is Disassembly Wave Propagation (DWP) method [5,8,10,13]. The disassembly analysis involves evaluating a disassembly sequence (order of component removals) from the geometric model of an assembly (A). In general, two categories of problems exist in disassembly: (let C_i denotes the i^{st} component in A)

1. *Complete Disassembly (CD)* involves disassembling all the components in A to obtain a CD sequence. For example, to disassemble all the components from A in Figure 5, one possible

sequence is $\{C_1, C_2, C_6, C_3, C_4, C_5\}$, as shown in Figure 6.

2. *Selective Disassembly (SD)* involves disassembling a subset of components (C) from A to

obtain a SD sequence (S). For example, to disassemble $C = \{C_4, C_5\}$ for A in Figure 5, one

possible sequence $S = \{C_6, C_4, C_5\}$, as shown in Figure 7.

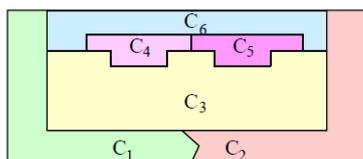


Fig.5 - Test assembly to illustrate complete and selective disassembly

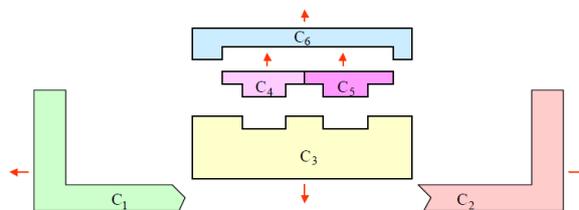


Fig.6 - CD sequence is $\{C_1, C_2, C_6, C_3, C_4, C_5\}$ for A in Figure 5

An application for CD is assembling, since reversing a disassembly sequence can potentially yield to an assembly sequence. For example, in Figure 6 the reverse of disassembly sequence gives an assembly sequence $\{C_5, C_4, C_3, C_6, C_2, C_1\}$. However, SD is often more relevant than CD for applications such as maintenance, recycling and reuse. These applications usually require removal of a subset of components of A, and not the entire assembly, hence providing a need for SD.

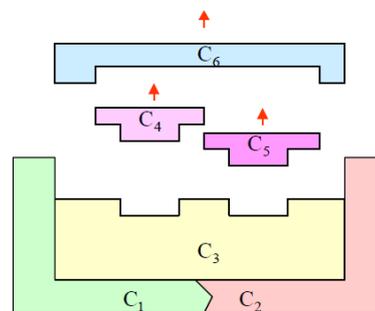


Fig. 7 - SD Sequence $S = \{C_6, C_4, C_5\}$ for $C = \{C_4, C_5\}$ in Figure 5

In real conditions at repair gas turbine compressor needs multiple SD [1,4,14,17,18]. The multiple SD problem is formulated as follows: Given an assembly (A) of n components and target components (C), automatically determine a SD sequence (S) for $m < n$ components, where $m = \text{Cardinality}(C)$.

One potential approach to perform the multiple SD analysis is by applying the SWP algorithm for every component in C. Although this approach may determine S for individual target components with a few removals, the resultant S for C (which is an aggregation of all sequences for $C_x \in C$) is not necessarily an appropriate SD sequence with fewer removals. To illustrate the multiple-component SD problem, consider A in Figure 8 with the requirement to disassemble $C = \{C_3, C_5\}$. Let n_r denote the number of components in S. For $C = \{C_3\}$, $S = \{C_2, C_3\}$ with $n_r = 2$. For $C = \{C_5\}$, two S's with $n_r = 3$ exist: $\{C_7, C_6, C_5\}$ and $\{C_1, C_4, C_5\}$.

Aggregating these two disjoint sequences (one with $C = \{C_3\}$ and another with $C = \{C_5\}$) for $C = \{C_3, C_5\}$ results in $S = \{C_2, C_3, C_7, C_6, C_5\}$ and $\{C_2, C_3, C_1, C_4, C_5\}$ with $n_r = 5$. However, for $C = \{C_3, C_5\}$ a better solution exists: $S = \{C_1, C_4, C_3, C_5\}$ with $n_r = 4$. Therefore, a better solution may be obtained if two or more components are disassembled along a common sequence. This motivates the need for multiple SD analysis.

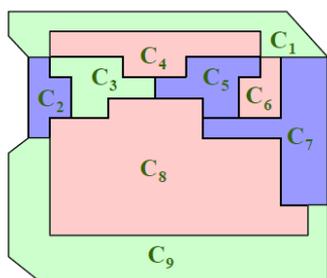


Fig. 8 - Test assembly to illustrate multiple selective disassembly problem

The geometric constraints in this research are of two types:

- *Spatial Constraints*: Constraints imposed in assembling or disassembling of a component due to the spatial position and geometry of all other components in **A**.

- *User-Defined Constraints*: Constraints imposed by the user on the component geometry that restricts some assembly/disassembly operations.

User-defined constraints include component grouping (two or more components are grouped as a sub-assembly) and directional constraints (one or more possible assembly or disassembly directions for the components are constrained).

RESEARCH TECHNIQUE

In real conditions of equipment maintenance can vary not only joints parts type going into it, but also a degree of their effect on an environment (chemical, radiological danger, etc.), that by all means leads to change of a set of the methods involved a disassembly (Figure 9) [6,7,9,11,12,15].

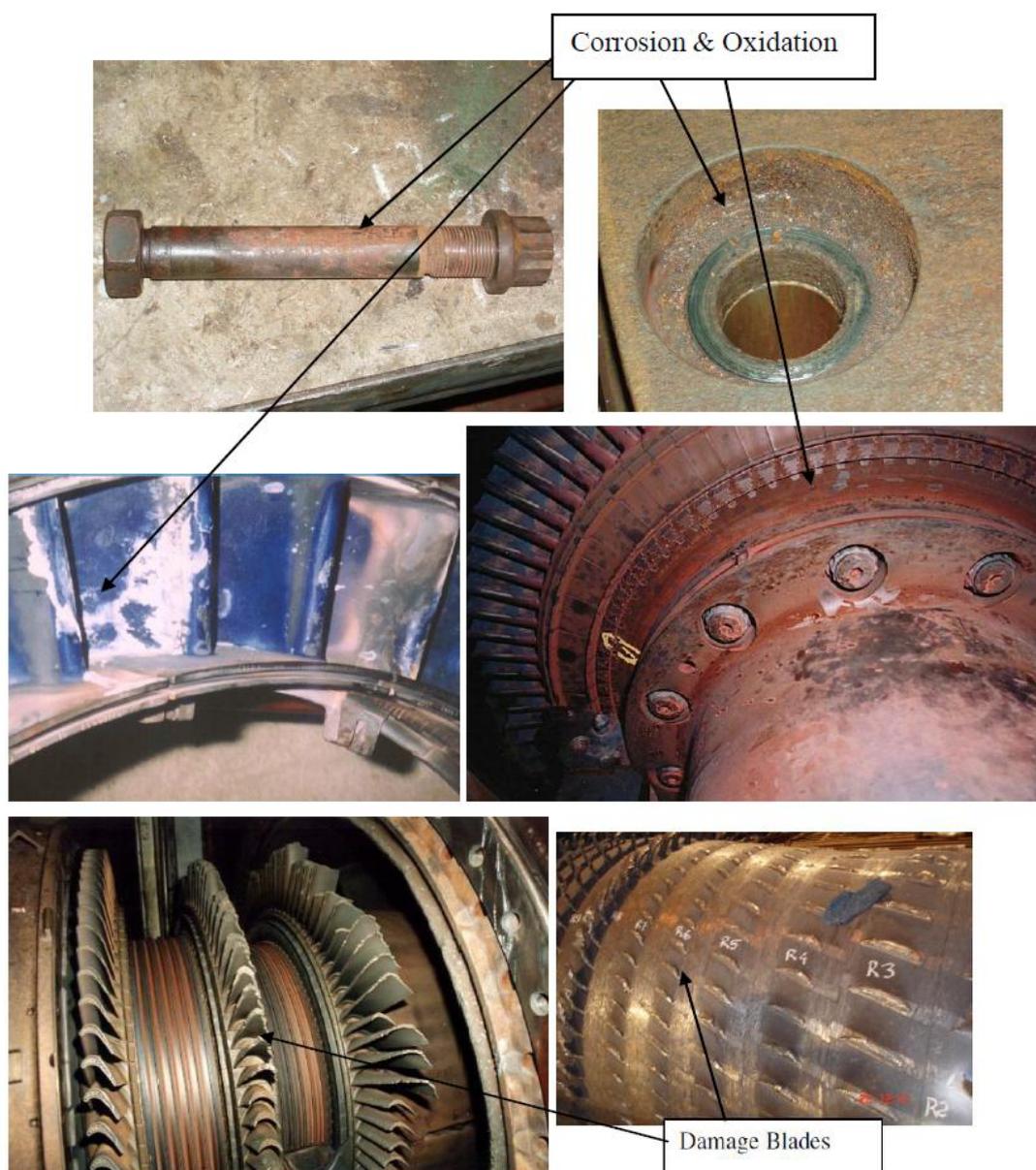


Fig.9 - Gas turbine compressor damage cause and results

The object may come from out side and hit the component causing damage to the components and this type of damage is popularly known as **Foreign Object damage** (FOD). Or the object may be generated within the turbine and may hit the component causing damage to the components and this type of damage is known as **Domestic Object damage** (DOD). This is most common type of failure in gas turbine and takes place due to premature failure of gas turbine components. As mentioned above that the failure is due to impact and for impact failure, the material is to be hit by an object and this object may be external or internal, hence further investigation done on each and every stages of moving and stationary blades of compressor to identify the source of object.

Damage due to Foreign Object

If the damage was due to foreign object, then the material has to travel from out side the Gas Turbine, and it has to be entered in to the Gas turbine Compressor through Compressor inlet air plenum air flow path only.

Damage due to Domestic Object

As the probability of damage due to FOD has already been ruled out therefore, the damage has to be due to DOD, in order to find the source of Domestic Object, when the compressor mid casing was opened, it was found that all most all moving & stationary blades have failed from the root just above platform with massive deformations and failed surface are totally distorted (clockwise). Therefore, though a nos. of moving & stationary blades have failed still question arises which has/have failed first and whether they have failed of their own (due to any reason) or they have also been hit by an object and this object has been generated with in compressor.

Now Domestic Object will generate only because of any one or combination of the following:

1. Something left during last inspection
2. Failure of fixing material and hitting the other components
3. Dislodging of metallic piece from stationary blade and hitting the other components.
4. Dislodging of metallic piece from moving blades and hitting the other components.
5. Dislodging of metallic piece from moving and stationary blades and hitting the other components.

THE RESULTS OF RESEARCH

Offered the new approach, which considers consequences of maintenance of the complex equipment, such as a gas turbine compressor. The product, from the point of disassembly technique, view is represented as set of parts joints that going into it.

Thus the period of product maintenance is represented as the function $E = f(t, u, v)$ that depending from of some factors:

- t – time of maintenance;
- u – conditions of maintenance;
- v – degrees of residual effect on an environment.

The factor of time – for long time of parts maintenance even in normal conditions occurs change of an aspect of the connection, linked for example, to wear of

pairs abrasion, change of parts physical properties being in contact (drying of rubber seals, contact surface magnetization and etc.).

The maintenance conditions factor – effect of an excited environment, a dust content of a working area, effect of a heat, heavy loadings, maintenance in hard radiation conditions (heightened radiation), etc.

The factor of a degree of residual effect on an environment – defines a degree of consequences of unfavorable maintenance conditions effect any product as a whole, and details going into it in particular (explosion hazard, residual radiation, biological danger, etc.).

All the above-stated factors influence, separately and in the set, not only on transformation of joints aspects, but also on generation of sequence of selective product disassembly up to the costing parts. Besides the choice of industrial conditions on repair shop and means of technological equipment also depends on a combination of their influence.

The set of decisions of the given problem at a qualitative level is described by the equation (a necessary condition):

$$\forall_{\psi \in \Psi} R_{\psi} = \{R \mid \gamma_R^{\min} \leq \gamma_R \leq \gamma_R^{\max}\},$$

i.e. for all existing candidate solutions of a problem (set of techniques) the included criteria on quality of process is in the field of acceptable values $\lambda_{P_0}^{\min} \leq \lambda_{P_0} \leq \lambda_{P_0}^{\max}$.

The decision of a problem at a technological level (sufficient condition):

$$\exists_{\xi \in \theta} R_{\xi} = \bigcap_{\psi=1}^{\chi} R_{\psi} \vee \exists_{\phi=1}^{\varphi} M_{\phi} \vee \exists_{\zeta=1}^{\lambda} STO_{\zeta} \vee \exists_{\varepsilon=1}^{\tau} TP_{\varepsilon},$$

where

$\exists_{\xi \in \theta} R_{\xi}$ – the existing candidate solution of a problem;

$\bigcap_{\psi=1}^{\chi} R_{\psi}$ – set of candidate solutions of the problem, satisfying to a necessary condition;

$\exists_{\phi=1}^{\varphi} M_{\phi}$ – presence of methods of the decision of a problem for each variant;

$\exists_{\zeta=1}^{\lambda} STO_{\zeta}$ – presence of means of the technological equipment, capable to realize necessary methods;

$\exists_{\varepsilon=1}^{\tau} TP_{\varepsilon}$ – presence of necessary technological conditions for means of technological equipment under each method.

In this case the set is shaped of technological cost prices of candidate solutions of a problem satisfying necessary and to a sufficient condition, according to expression:

$$\{C_{P_0}\} = \bigcup_{k \in X} \{C_{P_0}(k) \mid \begin{cases} \exists_{\xi \in \theta} R_{\xi} = \bigcap_{\psi=1}^{\chi} R_{\psi} \vee \exists_{\phi=1}^{\varphi} M_{\phi} \vee \exists_{\zeta=1}^{\chi} STO_{\zeta} \vee \exists_{\varepsilon=1}^{\tau} TP_{\varepsilon}, \\ \forall_{\psi \in \Psi} R_{\psi} = \{R \mid \gamma_R^{\min} \leq \gamma_R \leq \gamma_R^{\max}\} \end{cases}\}$$

The optimization problem by economic criteria (a minimum of the technological cost price) then is represented expression:

$$P_0^{opt} = \lim_{C_{max} \rightarrow \min} P_0 \mid C_{max} \in \{C_{P_0}\}.$$

CONCLUSION

The basic idea of the concept resulted in operation consists in development of methodology of a system approach to projection of the highly effective technological systems applied at repair and modernizing of heavy duty gas turbine compressor. Practical application of the offered approach will allow to increase quality and safety of special assignment, and introduction of the formalized technique in conditions of real manufacture will allow increase in level of efficiency and the use of available means of complex technological equipment.

Bibliography: 1. Конопляченко Е. К вопросу обеспечения качества ремонта оборудования направленным выбором технологии его разборки// VI Конференция Naukowo-Techniczna TEROTECHNOLOGIA 2009 Targi -Kielce, 29-30 - wrzesnia 2009 (Польша). – С.188-195. 2. Конопляченко Е.В., Радчук О.В., Колодненко В.Н. Проблемы формализации последовательности разборки изделий при их восстановлении, ремонте и модернизации// Вісник ХНТУСГ. Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. – Харків: ХНТУСГ. – 2009. – Вип. 77 – С.122-127. 3. Конопляченко Е.В. Обеспечение качества процесса реновации машин внедрением ресурсосберегающих технологий их разборки/ Конопляченко Е.В., Колодненко В.Н. // Вісник Сумського національного аграрного університету, Вип. 2(22), 2010.- С.15-19. 4. Beasley, D., and Martin, R.R., 1993, "Disassembly sequences for objects built from unit cubes," *Journal of Computer Aided Design*, Vol. 25, no. 12, pp. 751-761. 5. Boothroyd, G., and Alting, L., 1992, "Design for assembly and disassembly," *CIRP Annals*, Vol. 42, no. 2, pp. 625-636. 6. Daleo, J. A. and B one, D. H. , June 2-5, 1997, "Failure Mechanisms of Coating Systems Applied to Advanced Gas Turbines," Paper Presented at the 1 997 ASME Gas Turbine and Aero engine Congress, Orlando, Florida, ASME Paper Number: 97-GT-486. 7. Dundas, R. E., June 1 3 - 1 6, 1 994, "A Statistical Study of Gas Turbine Losses and Analysis of Causes and Optimum Methods of Prevention," ASME International Gas Turbine and Aero engine Congress, The Hague, Netherlands, ASME Paper Number: 94-GT-279. 8. Gad, R. and Srinivasan, H., 2000, "Assembly and disassembly sequences of components in computerized multi-component assembly models," *U.S. Software Utility Patent*, P99152US. 9. Gallardo, J.M., Rodriguez, J.A., and Herrera, E.J., "Failure of Gas Turbine Blades," *Wear*, Vol. 252, 2002, pp. 258-264. 10. Gupta S. M. Disassembly of Products/ Gupta S. M., McLean C. R. // Computers and Industrial Engineering.- 1996. -Vol.31(1)- P.225-228. 11. Jianfu, H., Wicks, B.J., and Antoniou, R.A., "An Investigation of Fatigue Failures of Turbine Blades in a Gas Turbine by Mechanical Analysis," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, 2002, pp. 201-211. 12. Khajavi, M.R. and Shariat, M.H., "Failure of First Stage Gas Turbine Blades," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, 2004, pp. 589-597. 13. Kuo T.C., Zhang H.C., Huang S.H., Disassembly analysis for electromechanical products: a graph based heuristic approach, *International Journal of Production research*, Vol. 38, No.5, 2000 14. Lee, Young Q., Kumara Sounder R.T., 1992, "Individual and Group Disassembly Sequence Generation Through Freedom and Interference Spaces", *J. of Design and Manufacturing*, PP. 143-154. 15. Mazur, Z., Luna-Ramirez, A., Juarez-Islas, J.A., and Campos-Amezcu, A., "Failure Analysis of a Gas Turbine Blade Made of Inconel 738LC Alloy," *Engineering Failure Analysis*, Vol.12, 2005, pp. 474-486. 16. Patterson, J. R., "Heavy-Duty Gas Turbine Maintenance Practices," GE Gas Turbine Reference Library, GER-2498, June 1977. 17. Penev, K.D., and Ron, A.J., 1996, "Determination of a disassembly strategy," *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 2, pp. 495-506. 18. Srinivasan, H., Figueroa, R., and Gad, R., 1999, "Selective disassembly for virtual prototyping as applied to dem-manufacturing," *Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 15, No. 3, pp. 231-245.

Received 17.03.2015

Конопляченко Евгений Владиславович – канд. техн. наук, доц., Сумский национальный аграрный университет, e-mail: konopl_e@i.ua;

Колодненко Виталий Николаевич – ст. препод., доц., Сумский национальный аграрный университет;

Аталавей Винстон Тимизэрэ – студент, доц., Сумский национальный аграрный университет.

В.О. Іванов, В.Є. Карпусь, І.М. Дегтярьов, І.В. Павленко, В.Р. Богдан

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ВАЖЕЛІВ

У статті запропоновано конструкцію верстатного пристрою, який забезпечує достатню інструментальну доступність і дозволяє виконувати багатокординатну обробку деталей типу важелів при одному закріпленні. Дослідження, виконані методами чисельного моделювання, підтвердили, що запропонована конструкція відповідає усім параметрам точності. Результати досліджень напружено-деформованого стану показали, що величини переміщень і напружень, які виникають у процесі механічної обробки, у запропонованому верстатному пристрої менші, ніж у стандартних. Проведений модальний аналіз підтвердив, що запропонований верстатний пристрій має значно вищу динамічну жорсткість, ніж стандартні верстатні пристрої. Моделювання виконувалося для обробки важелів із сталі, чавуна, алюмінієвого сплаву. Визначені залежності переміщень і напружень від глибини різання, що дозволяє оптимізувати процес механічної обробки.

Ключові слова: верстатний пристрій, технологічний процес, фрезерування, напружено-деформований стан, напруження, переміщення, точність, частота.

Вступ. Важливу роль у забезпеченні випуску конкурентоспроможної продукції відіграють верстатні пристрої (ВП). Це підтверджується тим, що вони складають 70–80% від загального обсягу технологічної оснастки [1], 80–90% витрат на технологічну підготовку виробництва витрачається на проектування та виготовлення ВП [2], 10–20% загальної вартості виробничих систем становить вартість ВП [3], до 40% бракованих деталей у машинобудуванні виникає через недосконалість ВП [4].

Постановка проблеми. Сучасне машинобудування характеризується багатонаменклатурністю деталей, що випускаються. Збільшення номенклатури виробів потребує ускладнення проектно-конструкторських робіт із виготовлення технологічної оснастки, особливо ВП. Такі умови виробництва вимагають частих переналагоджень на обробку іншої партії деталей, що ставить питання про економічну доцільність проектування та виготовлення спеціальних ВП для деталей конкретного типорозміру. Тому актуальним є впровадження гнучких ВП, які забезпечують переналагодження на інший типорозмір деталей [5].

Аналіз останніх досліджень і літератури. Сучасна тенденція реалізації механічної обробки – висока інтенсифікація технологічних процесів (ТП), тобто скорочення витрат штучного часу за рахунок зменшення частки допоміжного часу, що в умовах жорсткої конкуренції на ринку, багатонаменклатурності деталей машинобудування та можливостей сучасних металорізальних верстатів – є актуальною задачею на сьогодні [6]. Одним із основних рішень щодо підвищення інтенсифікації механічної обробки є розроблення та впровадження прогресивних ВП, які мають високий ступінь гнучкості, дозволяють виконувати механічну обробку за мінімальну кількість установлень за рахунок підвищення інструментальної досту-

пності та забезпечення багатокординатної обробки. Прагнення до обробки деталі за одне установлення є особливо актуальним для верстатів свердлильно-фрезерно-розточувальної групи, адже на них обробляються різні деталі складної просторової конфігурації із взаємним розташуванням поверхонь під різними кутами з малими допусками взаємного розташування. Це, як правило, потребує великої кількості установлень та частих змін схем базування, що безпосередньо впливає на точність виготовлення кінцевого продукту.

На вищевказаних верстатах, як правило, обробляються деталі типу корпусів, блоків циліндрів, планок, шатунів, кронштейнів, важелів тощо. Також виконується фрезерування шпонкових пазів і лисок на валах, свердління радіально-розташованих отворів у фланцях і дисках та отворів, розташованих під кутом.

Підвищення гнучкості та розширення технологічних можливостей ВП, скорочення підготовчо-заклучного часу на їх переналагодження, а, отже, підвищення ефективності використання металорізальних верстатів забезпечується за рахунок розроблення та впровадження швидкопереналагоджуваних базуючих модулів, які входять до комплекту універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв [7, 8].

Розроблені конструкторські рішення для базування корпусних деталей за площиною [9–11], площиною та двома отворами [12, 13], у координатний кут [14], а також деталей типу тіл обертання з базуванням за зовнішніми циліндричними поверхнями [15–19] та внутрішніми циліндричними поверхнями [20, 21] показали високу ефективність в умовах сучасного машинобудування.

У машинобудуванні, зокрема в автомобільній промисловості, досить розповсюдженим є клас деталей складної форми, до якого належать важелі, кронштейни, вилки, шатуни, кулісні, тягові та інші деталі, які входять до класу 74 згідно ЄСКД 1.79.100

ОК 012-93. Вони характеризуються наявністю великої кількості поверхонь, розташованих у різних площинах під різними кутами одна до іншої. Незважаючи на їх складну просторову геометричну форму, їх елементарні поверхні прості (циліндричні та конічні отвори, шпонкові пази, площини, уступи тощо) [22].

Деталі даного класу характеризуються складністю схем встановлення та недостатньою інструментальною доступністю, що обумовлено складним розташуванням поверхонь у просторі, тому досить складно навіть на сучасному обладнанні забезпечити багатокоординатну обробку деталей та інтенсифікувати технологічний процес їх виготовлення.

У даний час обробка деталей складної форми виконується із застосуванням спеціальних або універсально-збірних ВП, які або виключають можливість переналадження, або дозволяють виконувати його в малому діапазоні розмірів [23].

Метою даної роботи є обґрунтування доцільності розроблення ВП, який забезпечує можливість переналадження елементів ВП для встановлення деталей типу важелів у певному діапазоні розмірів, підвищує інструментальну доступність та дозволяє виконувати багатокоординатну обробку, а також довести, що запропонована конструкція ВП забезпечує задані показники точності при механічній обробці деталей і порівняти з аналогічними показниками спеціального та збірного ВП.

Матеріали досліджень. Об'єктом дослідження обрано деталі типу важелів, які є складовими багатьох агрегатів і вузлів машинобудівної продукції, особливо в автомобільній промисловості. Хоча різноманіття моделей автомобілів у наш час досить велике, проте основні їх механізми, де присутні важелі, відрізняються не суттєво. Різниця може бути лише у зміні типорозміру або розташуванні деяких поверхонь, тому доцільним є розроблення ВП, який забезпечить можливість встановлення важелів різних автомобілів у певному діапазоні розмірів та форми, на відміну від спеціальних ВП, які дозволяють встановлювати деталі лише одного типорозміру.

Розроблено переналаджуваний установлювально-затискний модуль для обробки деталей типу важелів (рис. 1), який призначений для встановлення важелів різних типорозмірів у межах технічної характеристики, та дозволяє скоротити витрати часу на переналадження та забезпечити інструментальну доступність оброблюваних поверхонь [24].

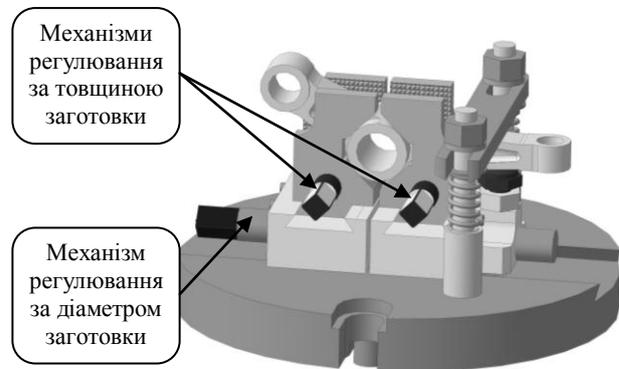


Рис. 1 – Переналаджуваний установлювально-затискний модуль для обробки деталей типу важелів

Запропонована конструкція призначена для встановлення важелів у діапазоні діаметрів центральної бобишки та різною товщиною плечей, що здійснюється шляхом регулювання гвинтових механізмів, які забезпечують зміну відстані між установлювально-затискними елементами. Переналаджуваний установлювально-затискний модуль може бути встановлений як на столі верстата, так і на базових платформах, що входять до різних комплектів збірних ВП.

Таке технічне рішення у сукупності з оборотним столом верстата дозволяє виконати всі свердлильно-фрезерно-розточувальні операції при незмінному закріпленні заготовки на одній комплексній операції, виконуваний на оброблювальному центрі з ЧПК. Таким чином, ТП скорочується на 5 операцій (рис. 2).

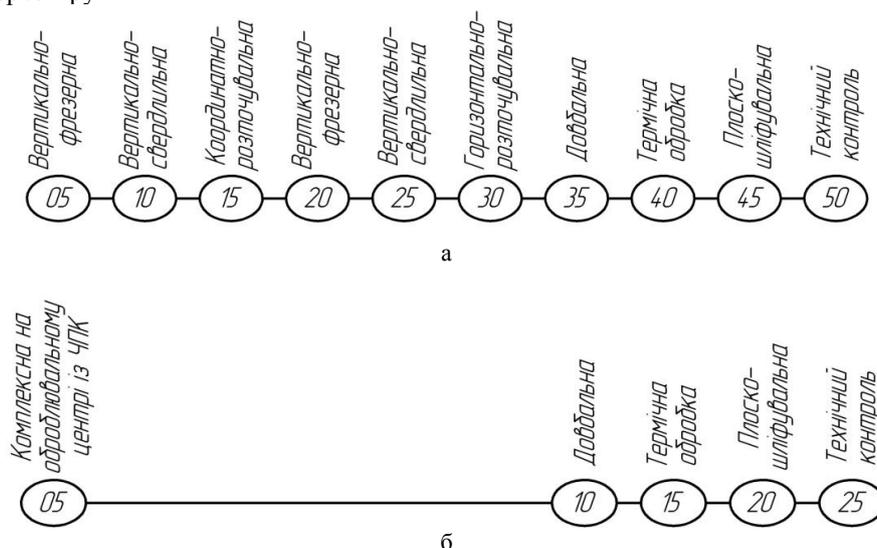


Рис. 2 – Порівняння технологічних маршрутів обробки деталі «Важіль»: а – типовий технологічний процес; б – запропонований технологічний процес

Для визначення можливості досягнення точності розмірів, форми та взаємного розташування поверхонь важеля при проведенні механічної обробки виконано дослідження напружено-деформованого стану (НДС) та визначено переміщення елементів системи «ВП – заготовка» під дією зовнішніх навантажень (сили закріплення та різання, моменти). Досліджено міцність ВП шляхом визначення еквівалентних напружень у місцях контакту, виявлено концентратори напружень, де величини напружень перевищують допустиме значення для конкретного матеріалу. Для цього поряд із вирішенням задачі з визначення НДС потрібно розв'язувати також і контактну задачу.

Встановлено залежність величини напружень та переміщень від сил і моментів для прогнозування відхилень від номінальних розмірів, що безпосередньо будуть впливати на точність механічної обробки. Проведено дослідження зі змінами силових факторів на переходах фрезерування бобишок торців важеля, де можливе варіювання глибинами різання.

За допомогою вбудованого модуля Modal Analysis у розрахунковому комплексі ANSYS Workbench визначено частоти власних коливань ВП, які порівняно з частотами дії знакозмінних компонент сил і моментів різання на всіх переходах свердильно-фрезерно-розточувальних операцій.

При розрахунках усі елементи ВП зв'язувались між собою шляхом об'єднання вузлів. Для деяких поверхонь елементів ВП передбачено можливість відносного переміщення з коефіцієнтом тертя [25]. Типи контактів і характеристики контактних пар між поверхнями елементів наведено в табл. 1.

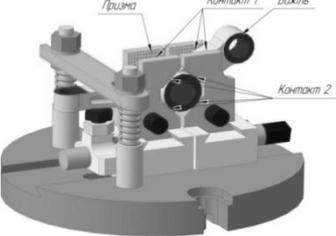
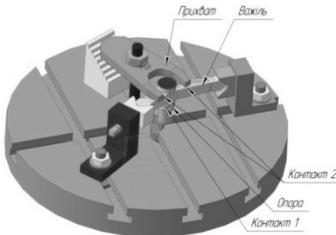
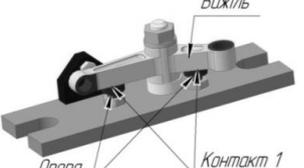
Результати досліджень.

За допомогою ANSYS Workbench побудовані розрахункові схеми та отримані значення переміщень та напружень, що виникають у елементах ВП та заготовці, а також у місцях їх контакту. Результати проведенного чисельного моделювання для важелів із різних груп матеріалів (сталь 40XH, сірий чавун СЧ20 та алюмінієвий сплав АЛ4) з визначеними значеннями максимальних еквівалентних напружень за IV гіпотезою міцності Губера-Мізеса [26], та максимальних переміщень, що виникли при моделюванні процесу механічної обробки для ВП типового та запропонованого ТП, наведені у табл. 2. Ілюстрації результатів моделювання при фрезеруванні торця бобишки головного отвору наведені на рис. 3–6.

Для виявлення залежності величини переміщень від глибини різання виконано моделювання фрезерування торця бобишки допоміжного отвору важеля, розташованого перпендикулярно головному. Результати моделювання наведені у табл. 3. За отриманими даними побудовано графіки залежності величини переміщень і напружень від глибини різання (рис. 7, 8).

Переміщення, що виникають на всіх переходах механічної обробки в стандартних ВП більші, ніж у запропонованому ВП. Це свідчить про те, що за інших рівних умов відхилення розмірів, форми і взаємного розташування поверхонь деталі, що обробляється в запропонованому ВП, будуть меншими, а, отже, точність обробки збільшується. Напруження на деяких переходах при обробці в запропонованому ВП більші, ніж у стандартному ВП, що пояснюється різними величинами площі контактної взаємодії елементів ВП і заготовки, частково викликаним характером прикладання сил закріплення для ВП різних конструкцій.

Таблиця 1 – Ескізи ВП та групи контактних пар

ВП	Схема розташування контактів	Характеристика реалізованих груп з'єднань
Запропонований		Контакт 1 – «бокові поверхні призм – бокові поверхні важеля»: поверхні призм – рифлені; поверхні заготовки – необроблені; коефіцієнт тертя – 0,7; Контакт 2 – «робочі поверхні призм – циліндричні поверхні важеля»: поверхні призм – гладкі; поверхня заготовки – необроблена; коефіцієнт тертя – 0,2.
Стандартний для операцій 05-15 типового ТП		Контакт 1 – «опора – торець важеля»: поверхня опори – рифлена; поверхня заготовки – необроблена; коефіцієнт тертя – 0,7; Контакт 2 – «затискні поверхні прихоплювача – бокові поверхні важеля»: поверхні прихоплювача – гладкі; поверхні заготовки – необроблені; коефіцієнт тертя – 0,2.
Стандартний для операцій 20-30 типового ТП		Контакт 1 – «опора – бокові поверхні важеля»: поверхні опор – рифлені; поверхні заготовки – необроблені; коефіцієнт тертя – 0,7.

Для чистових переходів із рис. 7 можна визначити допустимі глибини різання, при яких переміщення, що виникають при обробці, не будуть перевищувати величини допустимих відхилень розмірів. Це дозволить більш точно прогнозувати досягнення точності обробки на конкретній операції чи переході.

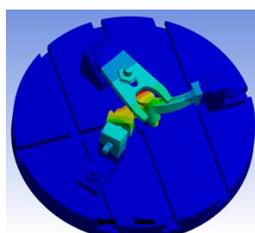
Із рис. 8 можуть бути визначені допустимі глибини різання, при яких відсутні залишкові деформації. Це дозволяє підвищити продуктивність механічної обробки за рахунок використання максимальних можливостей інструмента та верстата.

Для запобігання виникнення явища резонансу в процесі механічної обробки важеля необхідно, щоб час-

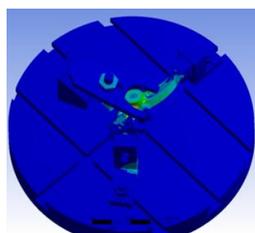
тота власних коливань елементів ВП не співпадала з частотою процесу різання. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є призначення інших режимів різання. Для цього за допомогою вбудованого модуля Modal Analysis у розрахунковому комплексі ANSYS Workbench визначені частоти власних коливань ВП для типового та запропонованого ТП та виконано їх порівняння з частотами, які виникають у процесі механічної обробки (табл. 4). Результати аналізу дозволяють визначати необхідне відлаштування від резонансу.

Таблиця 2 – Результати чисельного моделювання обробки важелів із різних матеріалів

Технологічний перехід, де виникають найбільші навантаження	Матеріал важеля	Максимальні переміщення, мм		Максимальні напруження, МПа	
		Типовий ТП	Запропонований ТП	Типовий ТП	Запропонований ТП
Фрезерування торця бобишки головного отвору	40ХН	0,08	0,017	132	174
	СЧ20	0,03	0,015	78	122
	АЛ4	0,03	0,015	74	121
Свердління головного отвору	40ХН	0,02	0,019	72	101
	СЧ20	0,01	0,017	44	73
	АЛ4	0,01	0,019	38	61
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	40ХН	0,18	0,11	604	589
	СЧ20	0,18	0,12	372	364
	АЛ4	0,17	0,14	299	288
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого паралельно головному	40ХН	0,15	0,14	446	620
	СЧ20	0,15	0,13	295	420
	АЛ4	0,13	0,13	238	342
Фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному	40ХН	0,05	0,046	208	134
	СЧ20	0,05	0,05	143	91
	АЛ4	0,05	0,05	130	83
Свердління бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному	40ХН	0,19	0,12	348	307
	СЧ20	0,23	0,16	302	243
	АЛ4	0,21	0,18	235	199

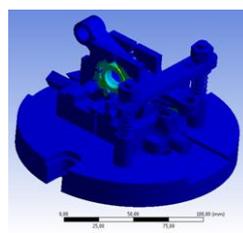


а

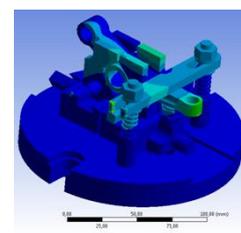


б

Рис. 3 – Ілюстрації результатів моделювання для стандартного ВП для операцій 05–15 типового ТП: а – картина напружень; б – картина переміщень

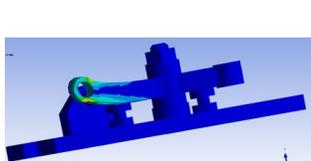


а

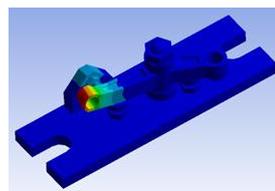


б

Рис. 4 – Ілюстрації результатів моделювання для запропонованого ВП: а – картина напружень; б – картина переміщень

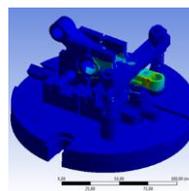


а

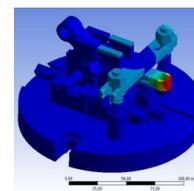


б

Рис. 5 – Ілюстрації результатів моделювання для стандартного ВП для операцій 05-15 типового ТП: а – картина напружень; в – картина переміщень



а



б

Рис. 6 – Ілюстрації результатів моделювання для запропонованого ВП: а – картина напружень; в – картина переміщень

Таблиця 3 – Результати чисельного моделювання фрезерування бобишки допоміжного отвору, розташованого перпендикулярно головному

Глибина різання, мм	Максимальні переміщення, мм		Максимальні напруження, МПа	
	Типовий ТП	Запропонований ТП	Типовий ТП	Запропонований ТП
0,25	0,016	0,018	65	42
0,5	0,027	0,026	115	76
1	0,05	0,047	208	134
2	0,091	0,084	375	241
3	0,128	0,118	529	339
4	0,164	0,152	677	434

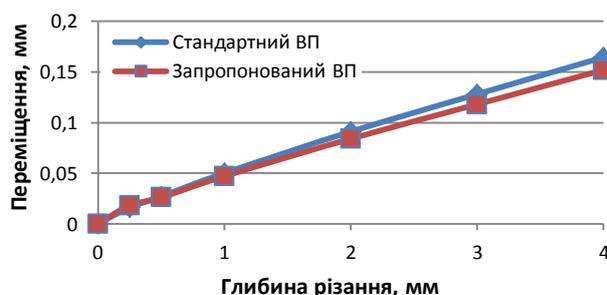


Рис. 7 – Графік залежності величини переміщень від глибини різання

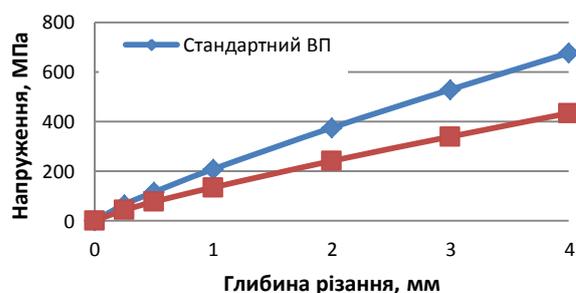


Рис. 8 – Графік залежності величини напружень від глибини різання

Таблиця 4 – Результати дослідження власних коливань верстатних пристроїв

Верстатний пристрій	1-ша критична частота, Гц	2-га критична частота, Гц	3-я критична частота, Гц	Частота процесу різання, Гц
Стандартний для операцій 05–15 типового ТП	2186	2595	2835	2229
Стандартний для операцій 20–30 типового ТП	5888	7268	8250	766
Запропонований	6125	7830	8915	2229

Із табл. 4 видно, що для ВП операцій 05–15 типового ТП робоча частота різання майже співпадає з власною частотою, що свідчить про появу резонансу. Для інших ВП явище резонансу не виникне, оскільки перша критична частота значно перевищує частоту процесу різання.

Таким чином, розроблений ВП для реалізації запропонованого ТП є більш жорстким ніж ВП для реалізації типового ТП, оскільки перша критична частота у 1,04 і 2,8 разів перевищує критичну частоту для ВП операцій 05–15 і 20–30 відповідно. Це свідчить про збільшення динамічної жорсткості розробленого ВП майже у 9 разів.

Висновки.

Доведено, що розроблені технічні рішення сприяють інтенсифікації ТП механічної обробки та не призводять до погіршення показників точності. Проведені дослідження НДС показали, що розроблена конструкція ВП для обробки важелів забезпечує багатокординатну обробку та відповідає умовам міцності, а також значно скорочує витрати допоміжного та підготовчо-заклучного часу.

Результати чисельного моделювання НДС процесу механічної обробки важеля у ВП різних конструкцій показали, що обробка в розробленому ВП має більш високі точнісні показники порівняно зі стандартними ВП за рахунок меншої величини переміщень – у середньому на 0,01–0,05 мм.

Напруження, що виникають в елементах ВП і місцях контакту із заготовкою при обробці, відрізняються незначно, у межах 10–50 МПа, і не перевищують допустимих значень для елементів ВП і заготовки. Істотна відмінність значень на 100 МПа на переході свердління бобишки допоміжного отвору, перпендикулярного головному, можна пояснити різним характером сприйняття навантаження внаслідок відмінності конструкцій ВП. Однак, це не є критичним, оскільки при коефіцієнті запасу міцності для даної системи 1,5, максимальні напруження, що виникають на цьому переході не перевищують допустимих значень.

Подальші дослідження спрямовані на експериментальну перевірку результатів чисельного моделювання процесу механічної обробки деталі типу важелів, що дозволить оцінити ефективність розробленого технічного рішення, а також розробку ВП для обробки інших деталей складної форми, використовуючи новий підхід до проектування.

Список літератури: 1. Ряховский А. В. Разработка и внедрение комплекта унифицированной технологической оснастки для обработки корпусных деталей специзделий [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Ряховский Алексей Владимирович. – Харьков, 1996. – 135 с. 2. Иванов В.О. Выбор оптимальных компоновок верстатных пристроїв для верстатів з ЧПК [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Иванов Віталій Олександрович. – Харків, 2010. – 239 с. 3. Hashemi H. A case-based reasoning for design of machining fixture [Text] / H. Hashemi, A. M. Shaharoum, I. Sudin // Int Journal of Manu-

facturing Technology, 2014. – Vol. 74. – P. 113–124. **4.** Wang H. Computer aided fixture design: recent research and trends [Text] / H. Wang, Y. Rong, H. Li, P. Shaun // Computer-Aided Design, 2010. – Vol. 42 (12). – P. 1085–1094. **5.** Карпуть В. Е. Обоснование выбора системы приспособлений в серийном производстве [Текст] / В. Е. Карпуть, В. А. Иванов // Високи технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 1 (16). – С. 125–134. **6.** Карпуть В. Е. Интенсификация процесів механічної обробки [Текст]: монографія / В. Е. Карпуть, В. О. Иванов, О. В. Котляр та ін.; за ред. В. Е. Карпуся. – Суми : Сумський державний університет, 2012 – 436 с. **7.** Карпуть В. Е. Универсально-сборные переналаживаемые приспособления [Текст] / В. Е. Карпуть, В. А. Иванов // Вестник машиностроения. – 2008. – No11. – С. 46–50. **8.** Karpus' V. E. Universal-composite adjustable machine-tool attachments [Text] / V. E. Karpus', V. A. Ivanov // Russian Engineering Research, 2008. – Vol. 28, No. 11. – P. 1077–1083. **9.** Пат. на корисну модель No 71870, Україна, МПК (2012) B23 V39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Иванов В. О., Дегтярьов І. М., Кушніров П. В. **10.** Пат. на корисну модель No 96399 Україна, МПК (2015) B23V 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Иванов В. О., Дегтярьов І. М. **11.** Швидкопереналагоджувані базуючі модулі для встановлення корпусних деталей [Текст] / В. Е. Карпуть, В. О. Иванов, Д. О. Мінєнко, І. М. Дегтярьов. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2012. – No 2. – С. 91–94. **12.** Пат. на корисну модель No 60130 Україна, МПК (2011) B23V 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Иванов В. О., Карпуть В. Е. **13.** Пат. на корисну модель No 67918 Україна, МПК (2012) B23V 39/00, B23V 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Иванов В. О., Карпуть В. Е., Романенко І. В. **14.** Пат. на корисну модель No 59745 Україна, МПК (2011) B23V 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Иванов В. О., Карпуть В. Е. **15.** Пат. на корисну модель No 31416 Україна, МПК (2006) B23V 39/00. Базуюча призма, що автоматично регулюється [Текст] / Карпуть В. Е., Иванов В. О. **16.** Карпуть В. Е. Вибір базуючих модулів для установавання валів при обробці на свердильно-фрезерно-розточувальних верстатах [Текст] / В. Е. Карпуть, В. О. Иванов, К. С. Вараксіна. // Резание и инструмент в технологических системах. – 2009. – No 76. – С. 55–62. **17.** Карпуть В. Е. Экспериментальные исследования точности обработки валов при базировании в призмах [Текст] / В. Е. Карпуть, В. А. Иванов, А. В. Ряховский. // Вісник Сумського державного університету. – 2010. – No 4. – С. 24–27. **18.** Карпуть В. Е. Точность базирования валов в призмах [Текст] / В. Е. Карпуть, В. А. Иванов // Вестник машиностроения. – 2012. – No 2. – С. 40–45. **19.** Karpus V. E. Locating accuracy of shafts in V-blocks [Text] / V. E. Karpus, V. A. Ivanov. // Russian Engineering Research, 2012. – Vol. 32 No 32. – P. 144–150. **20.** Пат. на корисну модель No 30999 Україна, МПК (2006.01) B23Q 3/06. Оправка розтиска [Текст] / Карпуть В. Е., Иванов В. О. **21.** Пат. на корисну модель No 95074 Україна, МПК (2014.01) B23V 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Иванов В. О., Дегтярьов І. М. **22.** Иванов В. А. Конструктивные особенности деталей сложной формы в структуре автомобиля [Текст] / В. А. Иванов, И. М. Дегтярьов // Прогрессивные технологии и процессы : сборник статей Междунар. молод. научно-техн. конф., 25–26 сентября 2014 г., Курск. – С. 238–243. **23.** Боровік А. І. Технологічна оснастка механоскладального виробництва [Текст]: книга / А. І. Боровік. – К.: Кондор, 2008. – 726 с. **24.** Переналагоджуваний установлювально-затискний модуль для установавання деталей типу важелів [Текст]: заявка u201413066 Україна : МПК 2015.01; B23V 39/00 / Иванов В. О., Дегтярьов І. М., Карпуть В. Е.; заявник Сумський державний університет; заявл. 05.12.2014. **25.** Справочник технолога-

машиностроителя [Текст]: справочник : в 2 т. / А. М. Дальский, А. Г. Сулова, А. Г. Косилова, Р. К. Меццержков. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2. – 944 с. **26.** Тимошенко С. П. Теория упругости [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Rjahovskij A. V. *Razrabotka i vnedrenie kompleksa unificirovannoj tehnologicheskoy osnastki dlja obrabotki korpusnyh detalej specizdelij*, Kharkiv, 1996. – 135 p. Print. **2.** Ivanov V.O. Vy`bir opty`mal`ny`x komponovok verstatnyh pry`stroiyv dlya verstativ z ChPK, Kharkiv, 2010. – 239 p. Print. **3.** Hashemi H. A., Shaharoum A. M., Sudin I. *Case-based reasoning for design of machining fixture*, 2014. Vol. 74. – P. 113–124. Print. **4.** Wang H., Rong Y., Li H., Shaun P. *Computer aided fixture design: recent research and trends*, 2010. Vol. 42 (12). – P. 1085–1094. Print. **5.** Karpus` V.E., Ivanov V.A. *Obosnovany`e vibora sy`stemi pry`sposobleny`j v seryjnom proy`zvodstve* Kharkiv. Vy`soki tehnologiyi v mashynobuduvanni, 2008. Publ. 1(16) – PP. 125-134. Print. **6.** Karpus` V.E., Ivanov V.O., Kotlyar O.V. *Intensy`fikaciya procesiv mexanichnoyi obrobky`*. Sumy, 2012. – 436 p. Print. **7.** Karpus` V.E., Ivanov V.A. *Universal`no-sbornnye perenalazhivaemye prispособleniya*, 2008. . – No11. – PP. 46–50. Print. **8.** Karpus` V.E., Ivanov V.A. *Universal-composite adjustable machine-tool*, 2008. Vol. 28, No. 11. – PP. 1077–1083. Print. **9.** Ivanov V.O., Degtyar`ov I.M., Kushnirov P.V. *Pat. na kory`snu model. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2012. Print. **10.** Ivanov V.O., Degtyar`ov I.M. *Pat. na kory`snu model. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2015. Print. **11.** Karpus` V.E., Ivanov V.O., Minenko D.O., Degtyar`ov I.M. *Shvy`dkoperenalagodzhuvani bazuyuchi moduli dlya vstanovlennya korpusnyh detalej*, 2012. Print. **12.** Ivanov V.O., Karpus` V.E. *Pat. na kory`snu model 60130. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2011. Print. **13.** Ivanov V.O., Karpus` V.E., Romanenko I.V. *Pat. na kory`snu model. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2012. Print. **14.** Ivanov V.O., Karpus` V.E. *Pat. na kory`snu model 59745. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2011. Print. **15.** Ivanov V.O., Karpus` V.E. *Pat. na kory`snu model. Bazuyucha pry`zma, shho avtomaty`chno reguluyet`sya*, 2006. Print. **16.** Karpus` V.E., Ivanov V.O., Varaksina K.S. *Vy`bir bazuyuchykh moduliv dlya ustanovlennya valiv pry` obrobci na sverdlyl`no-frezerno-roztochuval`nyh verstatah*, 2009. No 76. – PP. 55–62. Print. **17.** Karpus` V.E., Ivanov V.A., Rjahovskij A.V. *Eksperymental`nye issledovaniya tochnosti obrabotki valov pri bazirovani v prizmah*, 2010. No 4. – PP. 24–27. Print. **18.** Karpus` V.E., Ivanov V.A. *Tochnost` bazirovaniya valov v prizmah*, 2012. No 2. – PP. 40–45. Print. **19.** Karpus V. E., Ivanov V. A. *Locating Accuracy of Shafts in V-blocks*, 2012. Vol. 32 No 32. – PP. 144–150. Print. **20.** Karpus` V.E., Ivanov V.O. *Pat. na kory`snu model. Opravka rozty`ska*, 2006. Print. **21.** Ivanov V.O., Degtyar`ov I.M. *Pat. na kory`snu model. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2014. Print. **22.** Ivanov V.A., Degtyarev I.M. *Konstruktivnye osobennosti detalej slozhnoj formy v strukture avtomobilja*. Kursk. Progressivnyye tehnologii i process, 2014. – PP. 238–243. Print. **23.** Borovik A.I. *Tehnologichna osnastka mexanoskladal'nogo vy`robny`cztva*, 2008. – 726 p. Print. **24.** Ivanov V.O., Degtyar`ov I.M., Karpus` V.E. *Perenalagodzhuvany`j ustanovlyuval`no-zaty`skny`j modul` dlya ustanovlennya detalej ty`pu vazheliv : zayavka u201413066*, 2015. **25.** Dal'skij A. M., Suslova A.G., Kosilova A.G., Meshherjakov R.K. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja*, 2001. Vol. 2. – 944 p. Print. **26.** Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti*, 1975. – 576 p. Print.

Надійшла (received) 22.03.2015

Іванов Віталій Олександрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету, тел. (0542) 68-78-52, e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua;

Карпуть Владислав Євгенович – докт. техн. наук, професор, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України;

Дегтярьов Іван Михайлович – аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету;

Павленко Іван Володимирович – канд. техн. наук, старший викладач кафедри загальної механіки і динаміки машин Сумського державного університету;

Богдан Валерія Ростиславівна – магістрант, Сумський державний університет.

ТРИБОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПЛАСТМАСС. ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Предложен итерационный алгоритм расчета параметров процесса ультразвуковой сварки (УЗС) на базе трибологической системы, которая определяется как некая логико-математическая структура, элементами которой являются подсистемы материалов, излучения, динамики, внутреннего трения, термодинамики и собственно ультразвукового инструмента. Выработаны критерии сходимости итерационного процесса для существенно нелинейной модели УЗС. Приведены тестовые расчеты для нескольких типов сварочных рабочих наконечников.

Ключевые слова: трибологическая система, высокочастотное нагружение, ультразвуковая сварка, нелинейная математическая модель, итерационный алгоритм, критерии сходимости.

Введение. Ультразвуковая сварка (УЗС), как один из наиболее эффективных методов высокочастотного нагружения, находит все большее применение при решении проблем соединения отдельных узлов и элементов в производстве изделий, как из металлических, так и из полимерных термопластичных материалов. Это стало возможным благодаря совершенствованию технологии сварки, оптимизации режимов ультразвукового воздействия и повышению точности дозирования ультразвуковой энергии, вводимой в зону сварки. Условия ввода энергии и режимы сварки, как правило, оптимизируются в ходе экспериментальной отработки технологии для каждого изделия отдельно и затем используются при его серийном производстве. При этом несущественные для нормального функционирования изделия отклонения геометрических размеров отдельных узлов и изменения свойств материалов нарушают оптимальность процесса сварки, приводят к снижению качества соединений и браку конечной продукции.

Анализ последних исследований и литературы. Ультразвуковая сварка (УЗС) по своей сути является типовым процессом высокоскоростного нагружения, при котором важную роль играют внутреннее и внешнее трение, а при моделировании таких процессов необходимо учитывать нелинейные процессы диффузии, тепло и массопереноса в зоне сварки [1-9].

Процесс образования сварного соединения характеризуется сложным взаимодействием многочисленных и разнородных факторов. С одной стороны, это комплекс явлений, связанный с интенсивными процессами внешнего трения, повышения температуры в свариваемых материалах, растрескиванием твердых и выгоранием жировых пленок, повышением пластичности, обмятием микро- и макронеровностей, сближением контактирующих поверхностей на расстояние, близкое к межатомному, и т.п. С другой стороны — это комплекс явлений, связанных с состоянием, способностью энергетического тракта подать эту энергию в зону сварки.

Непрерывное ужесточение требований к качеству формируемых соединений, расширение ассортимента

свариваемых материалов, увеличение размеров и усложнение конструкций изделий обуславливают необходимость поиска путей автоматического установления оптимального ультразвукового (УЗ) воздействия при формировании каждого сварного соединения. Для выбора и поддержания оптимального воздействия в процессе формирования соединений требуется учитывать влияние всех факторов, осуществлять непрерывный контроль состояния соединяемых материалов и условий протекания процесса, обеспечивая при этом работу УЗ аппарата с максимальной эффективностью.

В статье [10] была предложена трибологическая система УЗС, определяемая как логико-математическая структура, элементы которой классифицируются как ее основные подсистемы: подсистема материалов и их свойств, подсистема излучения ультразвука, динамическая подсистема, подсистема внутреннего трения, термодинамическая подсистема и подсистема ультразвукового инструмента (УЗИ), которые базируются, в том числе, и на эмпирических и полуматематических базах данных.

Целью данной статьи является создание эффективной модели, которая адекватно описывает процессы, происходящие в зоне сварки, и обеспечивает широкие возможности при моделировании процесса сварки разнообразных узлов и деталей.

Постановка проблемы. Исследования в представляемой работе направлены на разработку итерационного алгоритма расчета параметров процесса ультразвуковой сварки на базе трибологической системы и определения критериев сходимости итерационного процесса для существенно нелинейной модели УЗС.

Результаты исследований. Определенная в [10] трибологическая система процесса ультразвуковой сварки пластмасс с учетом формализованных подсистем, входящих в нее, представляет собой существенно нелинейную структуру, для решения которой предлагается следующий итерационный процесс:

1. Определяется начальное температурное поле в объеме установленной зоны трибологической системы.

При этом начальное поле температур целесообразно установить постоянным и равным, например, температуре окружающей среды. Начальные границы трибосистемы могут быть установлены в форме полусферы с радиусом, например, равным 4-5 диаметрам излучателя ультразвукового инструмента или 2-3 толщинам верхней детали.

2. В подсистеме материалов при заданном поле температур вычисляются значения физико-механических параметров материалов деталей, которые свариваются.

3. Создаваемое ультразвуковым сварочным инструментом поле давлений в сварочной зоне определяется в подсистеме излучения, где выбор типа элементарных излучателей базируется на полуэмпирических данных и накопленном опыте.

4. В соответствии с выбранной моделью материалов в динамической подсистеме строится распределение деформаций в зоне трибологической системы, вызванное соответствующим ультразвуковым воздействием.

5. В подсистеме трения на базе используемой модели внутреннего трения строится объемное распределение функции тепловых источников.

6. По решению задачи теплопроводности в термодинамической подсистеме определяется новое распределение температур материалов по объему трибосистемы.

7. Если критерий сходимости процесса удовлетворяется, то процесс расчета трибосистемы завершается. В качестве критерия сходимости может быть использовано, например, интегральное приращение тепловой энергии по объему трибосистемы, изменение границы трибосистемы или какие-то другие показатели. Если сходимость процесса не достигнута, то установленное в п.6 распределение температур передается в подсистему материалов и процесс по п.п.2-7 продолжается. При этом производится уточнение пространственной границы поверхности трибологической системы.

Тестовые примеры. Для подтверждения эффективности выбранной трибологической модели процесса ультразвуковой сварки были решены тестовые примеры с использованием нескольких типов ультразвуковых рабочих наконечников – сонотрод для шовной УЗ сварки пластин, сонотрод для контактной точечной сварки, сонотрод 1 для запрессовки втулок и сонотрод 2 для запрессовки втулок.

Физические свойства полимеров, которые наиболее часто используются для изготовления деталей, подвергаемых ультразвуковой сварке, приведены в табл. 1.

Для всех тестовых примеров начальное поле температур устанавливалось постоянным и равным $T_0=20^{\circ}\text{C}$, начальные границы трибосистемы устанавливались в форме полусферы с радиусом равным 5 радиусам излучателя ультразвукового инструмента.

Основные расчетные параметры трибосистемы приведены в табл. 2.

Для тестовых примеров зависимость физико-механических параметров материалов деталей, которые свариваются, от температуры устанавливалась линейной, элементарные УЗ излучатели моделировались монополями, распределение поля деформаций материала, вследствие воздействия УЗ колебаний, строилось по модели вязкоупругого тела Кельвина–Фойгта, а решение задачи теплопроводности производилось сеточными

методами [9] на сетке контрольных точек области построения поля звукового давления в подсистеме излучения [10].

Таблица 1 - Физические свойства полимеров

Параметр	Полиамид -6.6	Полиэтилен	ПОМ (ПОМ)	ПВХ (PVC) (мягкий)	ПВХ (PVC) (твердый)	Полистирол (цельный)	АБС (ABS)	Полиуретан
Удельная масса, г/см ³	1.14	0.95	1.42	1.3	1.4	1.05	1.05	1.26
Предел прочности на разрыв, МН/м ²	60	24	75	16	60	55	50	50
Предел прочности на изгиб, МН/м ²	38	37	108	-	-	35	-	-
Относительное удлинение при разрыве, %	140	350	65	400	40	30	3	600
Коэффициент эластичности, МН/м ²	1500	1000	3000	20	3000	2500	2500	25
Ударная вязкость (прочность), КДж/м ²	17	3	8.5	-	30	6.5	12	-
Максимальная рабочая температура, °С	120	80	100	80	80	81	80	80
Тангенс угла диэлектрических потерь	0.15	0.001	0.025	0.1	0.1	0,0004	0.015	0.1
Электрическая прочность, МВ*м	30	53	70	30	32	>40	85	20
Горючесть, по UL94(США)>1.6 мм	V2	-	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ
Коэффициент трения по стали	0.3	0.25-0.3	0.25	-	0.5	0.5	0.5	0.15-0.4
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ /°С	85	200	120	70	-	90	-	-

Таблица 2 - Расчетные параметры трибосистемы

Тип наконечника	Радиус, мм	Амплитуда, мкм	Частота колебаний, кГц	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/с	T _{вэс}
Шовная сварка	6	10	50	1050	2600	130
Контактная сварка	3	40	22	1000	3600	120
Сонотрод 1	1,15	2	10	1000	2490	130
Сонотрод 2	6,3	8	22	1000	2490	150

В качестве критерия сходимости процесса расчета использовалось интегральное приращение тепловой энергии по объему трибосистемы.

Результаты расчета, демонстрирующие установившееся поле температур в границах трибосистемы процесса УЗ сварки, для разных сварочных наконечников представлены на рис. 1-4. При этом на рисунках красно-зеленая область демонстрирует эффективную зону сварки, а граница между желтым и синим цветами

определяет установившуюся границу трибологической системы процесса УЗ сварки.

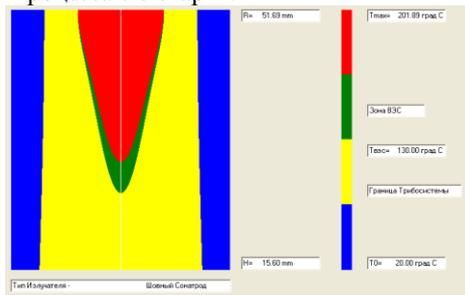


Рис.1 - Соноотрод для шовной УЗ сварки пластин

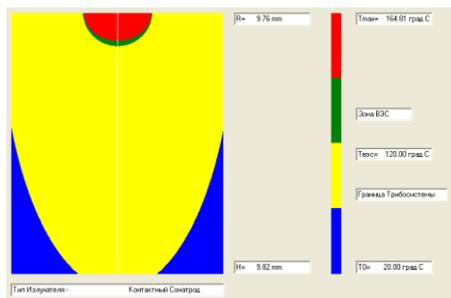


Рис. 2 - Соноотрод для контактной точечной сварки



Рис. 3 - Соноотрод 1 для запрессовки втулок

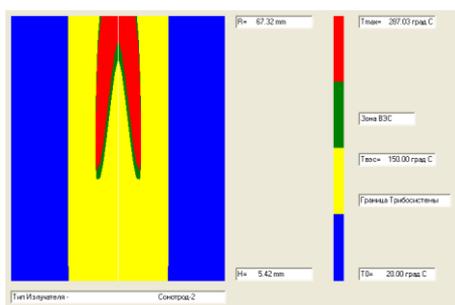


Рис. 4 - Соноотрод 2 для запрессовки втулок

Выводы. Для решения трибологической системы процесса ультразвуковой сварки пластмасс и полимеров с учетом формализованных подсистем, входящих в нее и представляющую собой существенно нелинейную структуру, разработан эффективный

итерационный процесс и предложены соответствующие критерии сходимости, а в качестве критерия сходимости используется интегральное приращение тепловой энергии по объему трибосистемы.

Разработано специализированное программное обеспечение для численного моделирования процесса УЗС пластмасс и полимеров.

Эффективность разработанной трибологической модели процесса ультразвуковой сварки подтверждена решением тестовых примеров процесса УЗС с использованием нескольких типов ультразвуковых рабочих наконечников.

Список литературы: 1. Основы трибологии (износ, трение, смазка) [Текст] / под. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 663 с. 2. Беркович И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский //: Учебник для вузов / Под ред. Д.Г. Громаковского. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. - 268 с. 3. Исаков С.М. Трибосистема в якості моделі УЗ зварювання/ С.М. Исаков //MicroCAD-2013: XXI між нар. Наук.-практ. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – Харків – травень.-2013.-Ч.1. - 1С. 4. Автономова Л.В. Управление параметрами технологического процесса структурно-связанной акустической системы / Л.В. Автономова, С.Н. Исаков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков, 2008.- No 1/5 (31-2008). - с. 3-6. 5. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов / Ю.В. Холопов // Л.: Машиностроение [Текст], 1988. -221 с. 6. Горячева И.Г. Контактные задачи в трибологии/ И.Г. Горячева, М.Н. Добычин // М.: Машиностроение, 1998. - 256 с. 7. Матвеев В. В. Демпфирование колебаний деформируемых тел/ В. В. Матвеев // - Киев: Наукова думка, 1985.- 264с. 8. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — Изд. 5-е перераб. и доп. — М.: Атомиздат, 1979. - 416 с. 9. Пасконов В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена/ В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов // – М.: Наука, 1984. - 286 с. 10. Исаков С.Н. Построение трибологической системы ультразвуковой сварки/ С.Н. Исаков // Вісник НТУ «ХПІ». 36. наук. праць. Серія: Динаміка і міцність машин. – X. : НТУ «ХПІ». - 2013. – No63(1036) . – с. 55 –59.

Bibliography (transliterated): 1. *Osnovy tribologii (iznos, trenie, smazka).* pod. red. A.V. Chichinadze. – Moscow: Mashinostroenie, 2001. – 663 p. Print. 2. Berkovich I.I., Gromakovskij D.G. *Tribologija. Fizicheskie osnovy, mehanika i tehniczeskie prilozhenija: Uchebnik dlja vizov* pod red. D.G. Gromakovskogo. - Samara: Samar. gos. tehn. un-t, 2000. - 268 p. Print. 3. Isakov S.M. *Trybosystema v yakosti modeli UZ zvarjuvannja* MicroCAD-2013: KhKhI mizh nar. Nauk.-prakt.konf. «Informatsijni tehnolohiji: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ja – Kharkiv – traven'.-2013.-Ch.1. - 1P 4. Avtonomova L.V., Isakov S.N. *Upravlenie parametrami tehnologicheskogo processa strukturnosv'jazanoj akusticheskoy sistemy* Vostochno-evropejskij zhurnalпередовых технологий. - Kharkov, 2008. - No 1/5 (31-2008). - PP. 3-6. Print. 5. Holopov Ju.V. *Ul'trazvukovaja svarka plastmass i metallov.* Leningrad: Mashinostroenie, 1988. - 221 p. Print. 6. Gorjacheva I.G. Dobychin M.N. *Kontaktnye zadachi v tribologii.* - Moscow: Mashinostroenie, 1998.- 256 p. Print. 7. Matveev V. V. *Dempfirovanie kolebanij deformiruemyh tel.*- Kiev: Naukova dumka, 1985.- 264p. Print. 8. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena.* — Izd. 5-e pererab. i dop. — Moscow: Atomizdat, 1979. - 416 p. Print. 9. Paskonov V.M., Polezhaev V.I., Chudov L.A. *Chislen-noe modelirovanie processov teplo- i masoobmena.* – Moscow: Nauka, 1984. - 286 p. Print. 10. Isakov S.N. *Postroenie tribologicheskoy sistemy ul'trazvukovoj svarki/* Visnyk NTU «KhPI». Zb. nauk. prats'. Seriya: Dynamika i mitsnist' mashyn. – Kharkov : NTU «KhPI». - 2013. – No63(1036) . – PP. 55 –59. Print.

Поступила (received) 24.03.2015

Исаков Сергей Николаевич – канд. техн. наук, ст. научн. сотр. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: si@manoilgroup.com;

Марусенко Светлана Ивановна – научн. сотр. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: svivmar@mail.ru.

А.В. Кузнецова, А.Н. Гнисько, Т.В. Терещенко

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С ДВОЯКОВЫПУКЛО-ВОГНУТЫМИ ЗУБЬЯМ

Разработана методика прогнозирования ресурса конических зубчатых передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями путем выбора рациональных параметров зацепления на основании моделирования изнашивания зубьев. Методика основывается на двух математических моделях: модели зацепления зубьев и имитационной численной модели изнашивания зубьев. Система моделей учитывает влияние формы профилей зубьев на кинематические (скорости качения и скорости скольжения) и нагрузочные (нормальная сила в зацеплении и контактные напряжения) параметры зацепления. Результаты прогнозирования ресурса подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: двояковыпукло-вогнутые зубья, прогнозирование, износ, ресурс.

Введение. В современных серийных конструкциях приводов горных и транспортных машин используются конические передачи с двояковыпукло-вогнутыми (ДВВ) зубьями, которые имеют ресурс в пределах одного-двух межремонтных сроков, то есть выходят из строя через 8...16 месяцев эксплуатации. По статистическим данным в среднем за год в Украине происходит свыше 250 тыс. отказов приводов, вследствие чего простой технологического оборудования составляют более 1 млн. часов, а соответствующие ремонтные затраты – свыше 7,5 млрд. гривен.

Одним из перспективных путей повышения ресурса конических передач с ДВВ зубьями является выбор рациональных параметров зацепления (коэффициентов смещения, модуля, количества зубьев шестерни и колеса и ширины зубчатого венца) на стадии проектирования передачи на основании моделирования изнашивания рабочих поверхностей зубьев.

Анализ последних исследований и литературы. Проблемой износа зубьев зубчатых передач занимались многие исследователи. На основе анализа большого количества изношенных зубчатых колес приводов горных машин Молдавским Л.А. [1] установлен факт тесной взаимосвязи между различными видами повреждений зубьев. На основе анализа этого статистического материала было доказано, что искажение профиля зуба в результате износа приводит к уменьшению приведенных радиусов кривизны, повышению контактных напряжений и, как следствие, к ускоренному развитию выкрашивания, а также появлению заедания рабочих поверхностей и др. Мыга Дж.Р. [2] экспериментально доказал, что искажение профилей закаленных зубьев в результате их износа существенно влияет на динамические нагрузки в зацеплении. А. Вилк, Дж. Н. Куанг и А.Д. Лин [3] ввели в динамическую модель профили изношенных колес, используя упрощенную модель профилей изношенных зубьев и считая передаточное отношение постоянным. Ю.Войнаровски и Онищенко В.П. [4] провели аналитические и эксперимен-

тальные исследования влияния деформации и износа зубьев на динамику зубчатых колес. Результаты экспериментов показали, что изменение профиля зубьев во время износа следует учитывать при расчетах на долговечность зубчатых передач.

Целью данной статьи является прогнозирование ресурса конических передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями на основании моделирования изнашивания рабочих поверхностей зубьев.

В данной работе исследование износа зубьев проводилось на базе анализа зацепления зубчатой передачи угольного комбайна РКУ10. Параметры исследуемой передачи представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Основные параметры исследуемой зубчатой передачи

Параметр	шестерня	колесо
Средний нормальный модуль	13 мм	
Внешний окружной модуль	15,465 мм	
Числа зубьев	13	24
Передаточное число	1,846	
Коэффициенты смещения исходного контура	0,55	0,95
Межосевой угол	90°	
Средняя арифметическая шероховатость	6,3 мкм	
Ширина зубчатого венца	70 мм	
Угловая скорость ведущего вала	27,69 рад/сек	
Вращающий момент на ведущем валу	10420 Н·м	
Удельная нагрузка по длине зуба	1867 Н/мм	
Материал и термическая обработка	сталь 20Х2Н4А цементация, закалка 57÷63HRC	
Предел текучести материала зубчатых колес	1080 МПа	

Работа по сбору информации об износе зубьев в эксплуатационных условиях проводилась следующим образом:

- редукторы приводов угольных комбайнов после отработки определенными нормами эксплуатации срока, либо в случае выхода машины из строя, поступали для капитального ремонта в сборочный цех ЗАО «Горловский машиностроитель»;

- после проведения разборки редуктора производилось изготовление слепков впадины зуба.

Для получения слепков на подготовленную поверхность впадины зуба заливался мелкодисперсный гипсовый раствор. После затвердевания раствора производился съем слепка. В обязательном порядке слепок маркировался специальным шифром с целью его последующей идентификации. Для надежности измерений изготавливались слепки двух-трех впадин между зубьями.

В настоящее время есть ряд методов измерения размеров поверхностей трехмерных объектов, но они часто требуют сложного и дорогостоящего оборудования. В отличие от цилиндрических колес, конические колеса с ДВВ-зубьями имеют сложную пространственную форму, поэтому возникает множество сложностей при выполнении дальнейшей обработки общеизвестными методами. Однако есть и более простые системы для сбора трехмерных данных. Так, в данной работе были определены координаты изношенной поверхности зуба методом лазерного сканирования [5], предложенным учеными института робототехники и управления технологическими процессами технического университета Брауншвейга (Германия) Симоном Вилькенбахом и др.

Для обеспечения представительности и достоверности экспериментальных исследований изготавливались слепки трех впадин между зубьями шестерни и трех впадин между зубьями колеса. Такое количество слепков превышает минимальное рекомендуемое значение (2 шт.) и является достаточным исходя из общепринятого допущения, что впадины между зубьями идентичны друг другу.

Количество исследуемых приводов, слепки впадин между зубьями шестерен и зубчатых колес которых изготавливались, определено в количестве 15 шт. Это значение определено количеством угольных комбайнов РКУ10 поступивших для капитального ремонта в сборочный цех ЗАО «Горловский машиностроитель» в течение четырех лет.

Пример трехмерного графика распределения износа по длине и высоте зуба двояковыпуклой шестерни и двояковогнутого колеса, полученного экспериментальным путем, представлен на рис.1.

Для изучения взаимовлияния нагрузочно-кинематических параметров контакта и действительной формы профилей зубьев на основе теоретических исследований был разработан взаимно увязанный комплекс моделей и соответствующее программное обеспечение.

Комплекс включает в себя методы математического описания теоретического профиля и профиля изношенного зуба, модель зацепления изно-

шенных зубьев и модель износа зубьев в контактной точке.

При разработке указанного комплекса моделей принят ряд допущений:

- суммарный износ в контакте двух контактирующих зубьев пропорционален удельной мощности, затрачиваемой на преодоление сил трения,

- все зубья одного колеса изнашиваются одинаково;

- суммарный износ соприкасающихся тел в контактной точке распределяется между зубьями шестерни и колеса прямо пропорционально пути скольжения точки контакта по этим телам и обратно пропорционально твердости контактной поверхности.

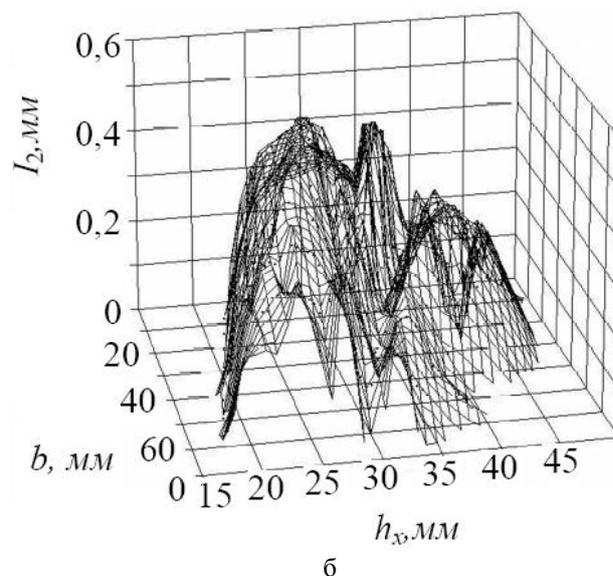
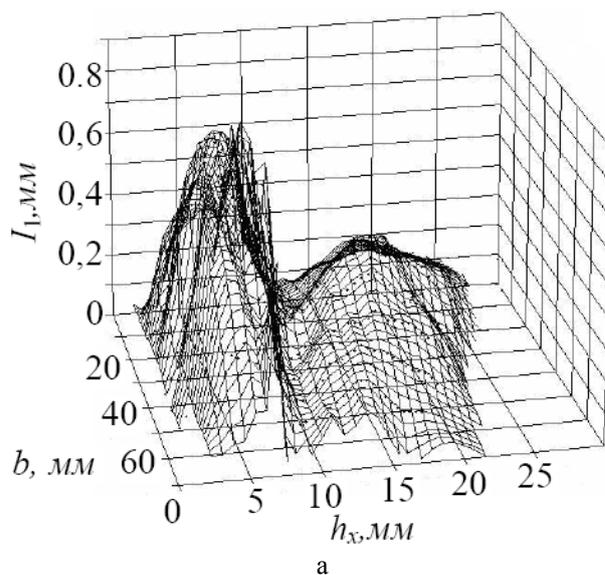


Рис. 1 – Пример распределение износа I по длине b и высоте зуба h_x : а – шестерня; б – колесо.

Модель прогнозирования параметров контакта предназначена для проведения численных экспериментов по прогнозированию качественных характеристик зацепления зубчатых передач с ДВВ-

зубьями. По введенной исходной форме профилей зубьев модель позволяет установить форму профилей зубьев по истечении заданного периода времени, оценить степень изменения передаточного числа, контактных напряжений, скорости скольжения и других параметров качества передачи. Путем варьирования входными параметрами можно спроектировать зубчатую передачу с наиболее оптимальными показателями.

Общая блок-схема модели прогнозирования формы профилей зубьев представлена на рис. 2.



Рис.2 – Блок-схема прогнозирования ресурса конических передач с ДВВ зубьями

Основное назначение блоков сводится к следующему.

Блок ввода исходных данных. Содержит исходные данные для прогнозирования ресурса.

В качестве исходных данных при реализации методики прогнозирования ресурса конических передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями принимаются следующие неуправляемые параметры:

- **геометрические параметры** зубчатого зацепления: α - угол профиля исходного контура;
- **технологический параметр** поверхности зубьев Ra – шероховатость боковой поверхности зубьев;
- **физико-механические параметры** материала зубьев: HRC – твердость поверхности зубьев; E – модуль упругости;
- **параметр смазочного материала** ϑ - кинематическая вязкость масла;
- **силовые и кинематические параметры** зацепления: $P_{ш}$ – мощность на валу шестерни; $\omega_{ш}$ – угловая скорость шестерни.

В качестве управляемых параметров используются коэффициенты смещения исходного контура x_1, x_2 для шестерни и колеса; m_{nm} – нормальный

модуль в среднем сечении зуба; z_1, z_2 – количество зубьев соответственно шестерни и колеса; ширина зубчатого венца b шестерни, колеса.

Также исходным параметром является максимальный по условиям эксплуатации ресурс L_h передачи с ДВВ зубьями (определяемых варьированием коэффициентов смещения исходного контура x_1, x_2 , модуля m_{nm} , количества зубьев z_1, z_2 и ширины зубчатого венца b).

В блоке модели зацепления зубьев выполняется математическое описание профиля боковых поверхностей ДВВ зубьев шестерни и колеса, формируется матрица координат точек профиля боковой поверхности зубьев шестерни и колеса, выполняется построение аппроксимирующей кривой рабочей поверхности зубьев. Определяется положение контактной точки в неподвижной и подвижных (связанных с осью симметрии зуба) системах координат, мгновенное передаточное число, скорости перемещения контактной точки по профилям зубьев, а также скорость скольжения, нормальная сила и контактные напряжения с учетом фактической кривизны профилей и распределения нагрузки между парами зубьев.

Блок износа зуба в контактной точке определяет значение износа контактирующих поверхностей с учетом максимально возможного числа факторов. Производится распределение износа между зубьями шестерни и колеса.

Далее выполняется сравнение полученных значений износа в контактных точках профиля и критического значения износа, которое принимается равным 80% толщины цементационного слоя зубьев шестерни и колеса. В случае меньшего значения износа в контактных точках профиля по сравнению со значением критического износа выполняется корректировка и синтез (создание) нового профиля методом кусочной аппроксимации.

Блок синтеза изношенного профиля по величине износа в отдельных точках профиля формирует новый профиль, сглаживая профильные кривые только в зонах износа и сохраняя в зонах отсутствия контакта прежние координаты не затронутой износом части профиля.

Далее повторно (в цикле) используются блок модели зацепления зубьев и блок модели износа зубьев.

Если износ зубьев, после n -ого цикла, становится большим, либо равным значению критического износа, то зубья колес считаются изношенными и работа программы прекращается.

Блок расчета ресурса переводит условные циклы изнашивания в ресурс передачи.

Интегральные результаты работы представляются в виде графиков функций качественных характеристики передачи. Основу моделирования кинетики изнашивания зубьев составляет итерационный процесс (рис. 2), реализованный в компьютерной программе с использованием численных методов решения соответствующих систем алгебраических и дифференциальных уравнений.

Средний износ за один итерационный цикл принимается, как минимум, на порядок выше, чем погрешность вычислительного процесса моделирования зацепления зубьев. В тоже время, для обеспечения близкого к эксплуатационному характера изнашивания, средний износ за цикл принимается в пределах $1 \div 2\%$ от максимального износа за период эксплуатации.

Для автоматизации расчетов согласно приведенной методике разработано и реализовано соответствующее программное обеспечение в среде Mathcad.

С целью учета разброса опытных данных сравнительная оценка характера изменения формы профиля производилась путем усреднения экспериментальных данных износа профилей зубьев следующим образом.

Исследуемые комбайны были разбиты на три группы (с малым, средним и большим износом) в зависимости степени эксплуатации. В каждую группу включалось 5 комбайнов таким образом, чтобы износ зуба зубчатого колеса в группе отличался от среднего износа группы на величину, не превышающую ошибку измерения износа.

Пример сравнения прогнозируемых и экспериментальных значений износа зубьев шестерни и колеса в среднем сечении зуба представлен на рис.3.

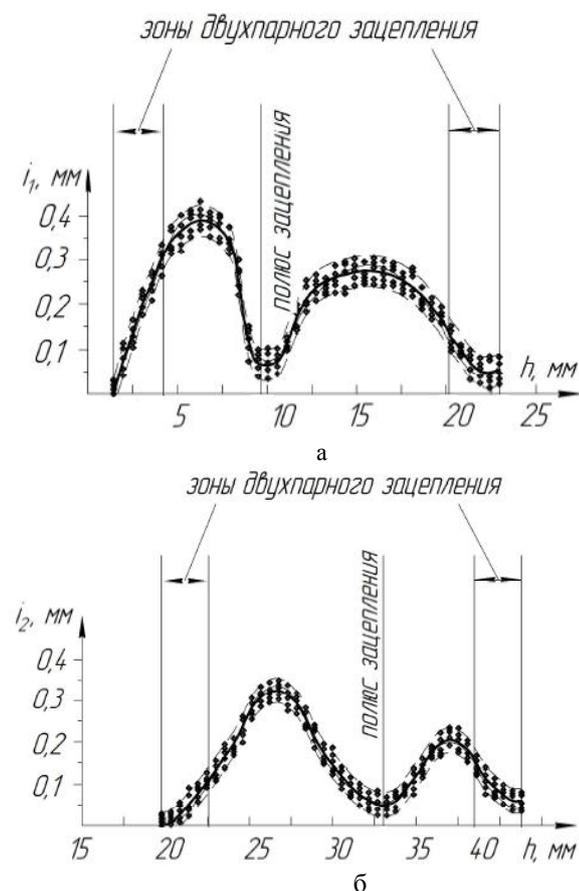


Рис. 3 – Сравнение прогнозируемых и экспериментальных значений износа зубьев (для группы комбайнов с малым износом): а – шестерня; б – колесо

Соответствие результатов численного эксперимента и опытных данных оценивалось на основе сравнения линейного износа зубьев. Оценка степени этого соответствия производилась по вероятности нахождения опытных данных в пределах ширины доверительного интервала, отсчитываемого от значений износа зуба по результатам моделирования.

Результаты определения доверительной вероятности представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты определения доверительной вероятности

Износ зуба, мм				Доверительная вероятность	
колесо		шестерня		вероятность	
эсп.	модель	эсп.	модель	колесо	шестерня
0,35	0,33	0,45	0,38	0,95	0,85

На основании значений, приведенных в табл. 2, можно утверждать с вероятностью более 0,85, что значения износа зуба, полученные в результате экспериментальных исследований, находятся в пределах доверительного интервала. Следовательно, результаты прогнозирования износа зубьев с высокой степенью вероятности близки к результатам эксперимента.

Выполнено сравнение значений ресурса конической передачи с ДВВ зубьями, определенного с помощью разработанных теоретических исследований, и действительного ресурса передачи с аналогичными параметрами, которая использовалась в качестве тихоходной ступени редуктора привода режущей части очистного комбайна РКУ10 производства «Горловский машиностроитель». По результатам теоретических расчетов установлено, что передача имеет средний ресурс 2767 часов в сравнении с действительным средним ресурсом 2500 часов. Различие между полученными значениями ресурсов составляет 10 %.

С помощью разработанной программы выполнен анализ влияния модуля и количества зубьев шестерни на ресурс L_h . Из анализа графика (рис. 4) следует:

- изменение ресурса в зависимости от модуля имеет нелинейный характер; с увеличением модуля ДВВ зубьев в 1,8 раза значение ресурса возрастает в 1,2 раза при прочих равных условиях;
- изменение ресурса в зависимости от количества зубьев шестерни имеет характер близкий к линейному;
- с увеличением z_1 в 3 раза значение L_h возрастает в 2 раза при прочих равных условиях.

Для определения максимальной по условиям эксплуатации долговечности L_h передачи с ДВВ зубьями необходимо оптимизировать значения коэффициентов смещения исходного контура x_1 , x_2 , модуля m_{nm} , количества зубьев шестерни z_1 и колеса z_2 , ширины зубчатого венца.

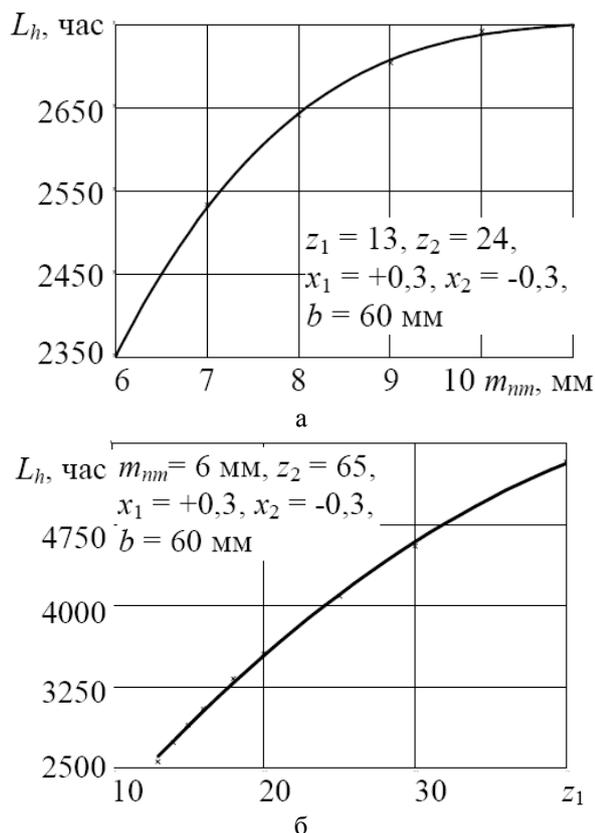


Рис. 4 – График зависимости ресурса L_h конической передачи с ДВВ зубьями: а – от модуля m_{nm} ; б – от количества зубьев шестерни z_1 .

Выводы

1. Износ зубьев оказывает значительное влияние на значения радиусов кривизны профилей зубьев. Вследствие изменения радиусов кривизны профилей меняется приведенный радиус кривизны, который в свою очередь оказывает непосредственное влияние на величину контактных напряжений.

2. Предложена методика оценки степени соответствия результатов моделирования изнашивания зубьев результатам экспериментальных исследований. Оценка степени этого соответствия производилась по вероятности нахождения экспериментальных данных в пределах ширины доверительного интервала, отсчитываемого от значений износа зуба по результатам моделирования.

3. С вероятностью более 0,85 значения износа зуба, полученные в результате эксперимента, находятся в пределах доверительного интервала.

4. Сравнение прогнозируемого 2767 часов и эксплуатационного 2500 часов значений ресурса конических передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями редуктора привода очистного комбайна РКУ10 показало погрешность моделирования 10 %.

Кузнецова Анна Вадимовна – канд. техн. наук, ГВУЗ «ДонНТУ», Красноармейск;

Гнидько Александр Николаевич – канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «ДонНТУ», Красноармейск;

Терещенко Татьяна Владимировна – магистр ДГМА, Краматорск.

5. На основании выполненных теоретических исследований разработана методика прогнозирования ресурса конических передач с ДВВ зубьями, основанная на учете искажения исходного профиля рабочей поверхности зубьев после каждого цикла изменения напряжений (контакта зубьев шестерни и колеса) и, как следствие, изменения значений геометрических, кинематических, силовых параметров контакта.

6. На базе разработанной методики создана программа для выбора рациональных параметров ДВВ зубьев конических передач.

7. На основе анализа влияния параметров зацепления конических передач с ДВВ зубьями на их ресурс с помощью разработанной программы установлено:

- с увеличением модуля в 1,8 раза значение ресурса возрастает на 12 % в рамках рекомендуемых стандартом геометрических параметров конических передач с ДВВ зубьями (параметры исследуемой передачи $z_1 = 13$, $z_2 = 24$, $x_1 = +0,3$, $x_2 = -0,3$, $b = 60$ мм);

- увеличение количества зубьев шестерни ДВВ зубьев конических передач приводит к возрастанию ресурса зубчатой пары в 2 раза в рамках рекомендуемых стандартом геометрических параметров конических передач с ДВВ зубьями.

Список литературы: 1. Молдавский Л.А. Виды повреждений и долговечность трансмиссий горных машин / Л.А. Молдавский, З.Л. Финкельштейн, Б.А. Верклов. – М.: Изд-во «Недра», 1981. – 190 с. 2. Myga J.R. Wpływ zużycia zęba na wielkość sił dynamicznych: praca doktorska / Myga J.R. – Politechnika Śląska, Gliwice, 1976. – 355p. 3. Kuang J.H. The effect of tooth wear on the vibration spectrum of a spur gear pair / J.H. Kuang, A.D. Lin // Journal of Sound and Vibration. – Transaction of ASME, Vol. 123, 2001. – pp. 311-317. 4. Wojnarowski J. Tooth wear effects on spur gear dynamics / J. Wojnarowski, V. Onishchenko // Mechanism and Machine Theory. – Vol. 38, 2003, pp. 161-178. 5. Winkelbach S. Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach / S. Winkelbach, S. Molkenstruck, F.M. Wahl. – DAGM 2006, LNCS 4174, 2006. – pp. 718–728.

Bibliography (transliterated): 1. Moldavskiy L.A. Types of damage and durability of mining machines transmissions L.A. Moldavskiy, Z.L. Finkelshstein, B.A. Verklov. – Moscow: Publishing Office «Subsoil», 1981. – 190 p. Print. 2. Myga J.R. Wpływ zużycia zęba na wielkość sił dynamicznych: praca doktorska Myga J.R. – Politechnika Śląska, Gliwice, 1976. – 355 p. Print. 3. Kuang J.H. The effect of tooth wear on the vibration spectrum of a spur gear pair J.H. Kuang, A.D. Lin/ Journal of Sound and Vibration. – Transaction of ASME, Vol. 123, 2001. – pp. 311-317. 4. Wojnarowski J. Tooth wear effects on spur gear dynamics / J. Wojnarowski, V. Onishchenko Mechanism and Machine Theory. – Vol. 38, 2003, pp. 161-178. Print. 5. Winkelbach S. Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach S. Winkelbach, S. Molkenstruck, F.M. Wahl. –Doneck: DAGM 2006, LNCS 4174, 2006. – pp. 718–728. Print.

Поступила (received) 24.03.2015

Ю.Г. Гуцаленко

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО СТАНДАРТНЫМ РЕГЛАМЕНТАМ СТОЙКОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Рассматривается проблема сравнения эксплуатационных возможностей инструментальных материалов и режущих пластин из них. Принятая во внимание расширенная система критериев работоспособности включает скорость объемного съема, стойкость, рабочий путь резания, площадь обработанной поверхности, объемный съем. Предложена системная аналитическая модель и выполнен расчет для сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора в стандартных неперетачиваемых режущих пластинах. Расчет выполнен в системе условий и нормативов стандартных стойкостных испытаний. Показан пример развития аналитической модели применительно к оценке рейтинга работоспособности перетачиваемых режущих пластин в условиях неоднозначности допустимого износа.

Ключевые слова: кубический нитрид бора, сверхтвердые композиты, режущие пластины, стойкостные испытания, работоспособность, рабочий путь резания, объемный съем, сравнительная оценка.

Введение и постановка задачи. Информация о сравнительной работоспособности инструментальных материалов, особенно в дорогостоящих альтернативах, к которым относятся прежде всего сверхтвердые, важна в принятии экономически обоснованных решений организационно-технологической подготовки производства.

В исследовании [1] базой исходных данных для аналитического расчета такой информации применительно к инструментальным композитам на основе кубического нитрида бора используется стандартный регламент и нормативы стойкостных испытаний сменных режущих пластин из сверхтвердых материалов [2]. Эта работа использует исходные данные (см. табл. 1) и методическую логику [1], с развитием в полной иерархической системе ресурсных показателей, рассматриваемых научной школой МГТУ им. Н. Э. Баумана [3], включающей рабочий путь резания, площадь обработанной поверхности и объемный съем. Исследование [1] опирается на использование только последнего из них.

Основные результаты. Выполненные расчеты охватывают группу инструментальных композитов на основе кубического нитрида бора, составившую предмет рассмотрения действующим в Украине межгосударственным стандартом [2].

Эта группа включает следующие композиты: 01 (K01 – эльбор-Р) [4], 02 (белбор) [5], 05 (K05ИТ) [4], 06 [6], 10Д (K10Д – двухслойные пластины: гексанит-Р с подложкой из безвольфрамового сплава) [4], 11 (киборит) [6, 7], Томал-10 [8].

Результаты расчетов и используемые в их производстве базы данных систематизированы в табл. 1.

Округление расчетных данных, где оно произведено в реляционном представлении, выполнено отбрасыванием остатка.

В табл. 2 приведены расчетные зависимости, использующие унифицированную систему идентификаторов и тут же сопровождаемые необходимыми понятийными пояснениями.

Таблица 1 – Исходные и расчетные данные

Показатель	Марка композита					
	01, 02	05	06	10Д	11	Томал-10
Исходные данные [2]						
Скорость (v), м/мин	75			60	110	90
Подача (S_o), м/об, $\cdot 10^{-3}$.	0,20	0,15	0,10	0,07	0,10	
Глубина (t), м, $\cdot 10^{-3}$.	0,8	2,0	0,5	0,4	0,5	0,8

Показатель	Марка композита					
	01, 02	05	06	10Д	11	Томал-10
Средняя стойкость (T_{cp}), мин	20	15	40	30	60	50
95-процентная стойкость ($T_{95\%}$), мин	8	6	16	12	24	20
Расчетные данные						
$k_T = k_{T_{cp}} = k_{T_{95\%}}$	0,33	0,25	0,66	0,5	1	0,83
$Q = v S_o t$, $М^3/мин, \cdot 10^{-6}$.	12	22,5	3,75	1,68	5,5	9
k_Q	0,53	1	0,16	0,07	0,24	0,4
$L_{cp} = v T_{cp}$, м	1500	1125	3000	1800	6600	4500
$L_{95\%} = v T_{95\%}$, м	600	450	1200	720	2640	1800
$k_{v(T)}$	0,68			0,54	1	0,81
$k_{T(v)}$	0,33	0,25	0,66	0,5	1	0,83
$k_L = k_{L_{cp}} = k_{L_{95\%}}$	0,22	0,17	0,45	0,27	1	0,68
$F_{cp} = S_o v T_{cp}$, $М^2, \cdot 10^{-4}$	3000	1687,5	3000	1260	6600	4500
$F_{95\%} = S_o v T_{95\%}$, $М^2, \cdot 10^{-4}$	1200	675	1200	504	2640	1800
$k_{S_o(S_o \cdot L)}$	2	1,5	1	0,7	1	1
$k_{L(S_o \cdot L)}$	0,22	0,17	0,45	0,27	1	0,68
$k_F = k_{F_{cp}} = k_{F_{95\%}}$	0,45	0,25	0,45	0,19	1	0,68
$W_{cp} = Q \cdot T_{cp}$, $М^3, \cdot 10^{-6}$.	240	337,5	150	50,4	330	450
$W_{95\%} = Q \cdot T_{95\%}$, $М^3, \cdot 10^{-6}$.	96	135	60	20	132	180
$k_{Q(Q \cdot T)}$	1,33	2,5	0,41	0,18	0,61	1
$k_{T(Q \cdot T)}$	0,4	0,3	0,8	0,6	1,2	1
$k_W = k_{W_{cp}} = k_{W_{95\%}}$	0,53	0,75	0,33	0,11	0,73	1

Выражения вида $k_{X(Y)}$ в табл. 1 и 2 объединяет ряд $I = 1, \dots, i, \dots, I$ относительных оценок $k_{X_i(Y)} = X_i / X_j \in Y_j = Y_{opt}$, где X – элементарный параметр или элементарный комплекс параметров (например, произведение двух или нескольких параметров), Y – критериальная функция, \in – знак принадлежности. Частные случаи $k_{X(Y)} \equiv k_X$: 1) если $X \equiv Y$; 2) если $X_j \in Y_j = Y_{opt}$, и притом $X_j \equiv X_{opt}$. В рассматриваемой задаче $opt \equiv max$ для всех Y , каковыми по табл. 1 и 2 являются Q, T, L, F, W и, в последующем рассмотрении перетачиваемых режущих пластин, суммарный съём V с учетом переточек.

В общем случае рассмотрения относительной работоспособности по элементарным оценкам (k_T, k_Q) и комплексным или, в контексте [3], ресурсным (k_L, k_F, k_W), как это представлено в табл. 1, предпочтение следует отдавать оценке по k_W , поскольку она входящей в ее состав структурой аналитического отобра-

жения объемного съема ($М^3$) учитывает наибольшее число независимых факторов влияния и поэтому является наивысшей по значимости в иерархии ресурсных, по сравнению с оперирующей площадями ($М^2$) оценкой k_F и оперирующей траекториями (м) оценкой k_L .

Максимальный съём обрабатываемого материала за время рабочей жизни режущей пластины из сверхтвёрдого материала как рейтинговый критерий – это одновременно и минимизация затрат в расчете на объемную единицу снимаемого припуска при формообразовании изделий, максимальное использование уникальных режущих свойств сверхтвёрдых материалов, инструментальных композитов и режущих пластин на их основе.

Как следует из табл. 1, киборит и Томал-10 получили две первые позиции по всем относительным характеристикам, опирающимся на независимые

Таблица 2 – Основные понятия и аналитические отображения

Символ	Понятийное содержание	Аналитическое выражение
k_T	Относительная стойкость, средняя, $T = T_{cp}$, или 95-процентная, $T = T_{95\%}$ в системе норм [2] $T_{95\%i} = 0,4T_{cp i}$ ($T_{95\%i} = 0,4T_{cp i}$) и $k_{Tcp} = k_{T95\%} = k_T$	$k_{Ti} = (T_{cp})_i / (T_{cp})_{max} = (T_{95\%})_i / (T_{95\%})_{max}$
Q	Производительность объемного съема, $м^3/мин$	$Q = v S_o t$
k_Q	Относительная производительность объемного съема	$k_{Qi} = (v S_o t)_i / (v S_o t)_{max}$
L	Рабочий путь резания за нормативную стойкость, среднюю, $T = T_{cp}$, или 95-процентную, $T = T_{95\%}$, $м$	$L = v T$
k_L	Относительный рабочий путь резания за нормативную стойкость, среднюю, $T = T_{cp}$, или 95-процентную, $T = T_{95\%}$ в общем случае непостоянства нормы стойкости T_i	$k_{Li} = (v T)_i / (v T)_{max}$ или $k_L = k_{v(v \cdot T)} \cdot k_{T(v \cdot T)}$, где $k_{v(v \cdot T)i} = v_i / v(v \cdot T)_{max}$ и $k_{T(v \cdot T)i} = T_i / T(v \cdot T)_{max}$
F	Площадь поверхности, обработанной за нормативную стойкость, среднюю, $T = T_{cp}$, или 95-процентную, $T = T_{95\%}$, $м^2$	$F = S_o \cdot v T$
k_F	Относительная площадь поверхности, обработанной за нормативную стойкость, среднюю, $T = T_{cp}$, или 95-процентную, $T = T_{95\%}$ в общем случае непостоянства нормы стойкости T_i .	$k_{Fi} = (S_o \cdot v T)_i / (S_o \cdot v T)_{max} = (S_o L)_i / (S_o L)_{max}$ или $k_F = k_{S_o(S_o \cdot L)} \cdot k_{L(S_o \cdot L)}$, где $k_{S_o(S_o \cdot L)i} = S_{oi} / S_{o(S_o \cdot L)max}$ и $k_{L(S_o \cdot L)i} = L_i / L(S_o \cdot L)_{max}$
W	Съем за нормативный период стойкости, средней, $T = T_{cp}$, или 95-процентной, $T = T_{95\%}$ в общем случае непостоянства нормы стойкости T_i , $м^3$	$W = v S_o t T$
k_W	Относительный съем за нормативный период стойкости, средней, $T = T_{cp}$, или 95-процентной, $T = T_{95\%}$ ($n_o = const$)	$k_{Wi} = (v S_o t T)_i / (v S_o t T)_{max}$ или $k_W = k_{Q(Q \cdot T)} \cdot k_{T(Q \cdot T)}$, где $k_{Q(Q \cdot T)i} = Q_i / Q(Q \cdot T)_{max}$ и $k_{T(Q \cdot T)i} = T_i / T(Q \cdot T)_{max}$

оценки ресурса инструмента по [3], и при этом заметно выделяются по уровню оценок на фоне остальных композитов: по данным табл. 1 средняя их относительных оценок k_L , k_F и k_W (0,85) значительно превосходит среднюю оценок остальной четверки композитов (0,40), регламент стойкостных испытаний которых по [2] также исходит из безударного характера работы (см. табл. 1).

По данным табл. 1 рейтинговая линейка по k_W представляет следующую последовательность (в порядке убывания расчетных значений рейтинговой оценки): композит Томал-10 (1), композит 05 (0,75), композит 11 (0,73), композиты 01 и 02 (0,53), композит 06 (0,33), композит 10Д (0,11).

Визуализация расчетных данных по всем относительным оценкам (k_T , k_Q , k_L , k_F и k_W) в рейтинговой линейке по k_W , в выполняемом исследовании определенной иерархически предпочтительной, приведена на рис. 1.

Полученные из расчетной модели k_W результаты после ранжирования (рис. 1, д) отражают функциональный рейтинг рассматриваемых нитридных композитов по критерию максимума ожидаемого съема рекомендуемой к обработке стали. Визуализация на рис. 1 результатов расчетов k_Q

(рис. 1, а) и k_T (рис. 1, б) в рейтинговой последовательности композитов, определенной расчетом k_W (рис. 1, д), показывает неочевидность следования наиболее значимой рейтинговой оценки (k_W) и других ресурсных комплексов (k_L , k_F) из элементарных рейтингов k_Q и (или) k_T .

Объективность обращения к избранным в рассмотренной задаче относительным оценкам в этом и подобных рассмотрениях возрастает с унификацией критерия и допустимой величины износа для пластин из разных материалов.

Регламент [2] таким унифицированным критерием во всех испытаниях определяет износ пластин по задней поверхности. Допустимая величина износа по задней поверхности (h_3) в стойкостных испытаниях определяется [2] равной, $h_3 = 0,4$ мм, вне зависимости от марки композита, угла при вершине пластины и предназначения для работы в автоматических линиях, станках с ЧПУ и ГПС, как это имеет место в регламентировании [2] контроля пластин после испытания их режущих свойств.

Обсуждение и перспективы развития методического подхода. Разработанная система аналитических моделей в части отображений относительных оценок работоспособности инструмен-

тальных материалов и инструментов из них высших порядков (k_L , k_F и k_W) представляет собой единую системную аналитическую модель, оперирующую с отношениями абсолютных значений характеристик работоспособности, описываемых произведением функциональной скорости (соответственно m , m^2 и m^3 за единицу времени) на нормативную стойкость.

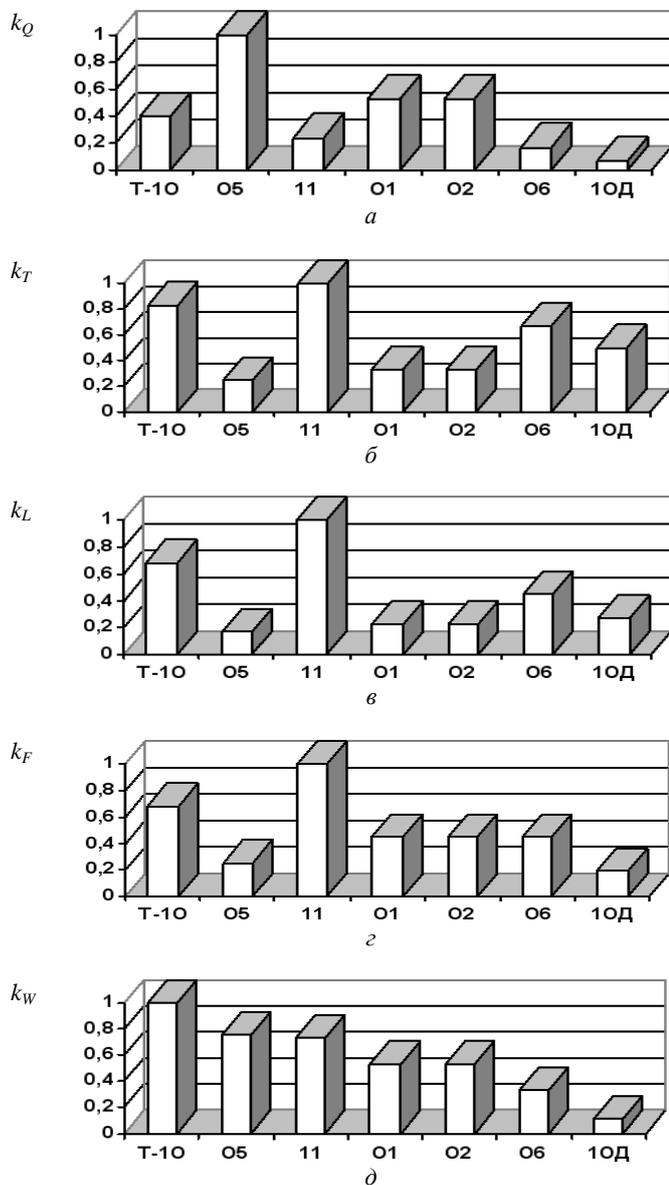


Рис. 1 – Относительные показатели работоспособности сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора: а – по производительности (k_Q); б – по стойкости (k_T), в – по пути резания (k_L); г – по площади обработанной поверхности (k_F); д – по объемному съему (k_W) в рейтинговой линейке относительно объема съема (идентификатором T-10 на рисунке обозначен композит Томал-10).

Предложенный подход является открытым для дальнейшего совершенствования, имеет перспективу развития на своей собственной аналитической основе. Причем как в направлении создания аналитического продукта повышенного уровня обобщения, так и в направлении разработки частных ана-

литических решений. Поясним это методическим примером адаптации аналитической расчетной схемы применительно к перетачиваемым режущим пластинам.

Единственность критерия и допустимой величины износа в соответствующей определению интегральной рейтинговой оценки k_W практике, как это имеет место в представленном исследовании, означает, что физический смысл этой вероятностной оценки заключается в отображении математического ожидания относительного съема данной пластиной в сопоставлении с наивысшим результатом среди всех оцениваемых не только за период стойкости, но, в рассмотрении разработанной расчетной модели в системе соответствующих допущений и ограничений применительно к перетачиваемым пластинам, и за весь ресурс работоспособности среди пластин с одинаковым исходным припуском δ на переточки или неперетачиваемых.

Эти допущения и ограничения в наиболее общем случае должны исходить из организации производства переточек в системе неравных предельных значений допустимого износа для ранжируемых объектов, причем с его заданием и переточкой либо по задней, либо по передней поверхности, а также из допустимости оценки съема W обрабатываемого материала за период стойкости T по каждому из используемых [2] стойкостных нормативов (Тср. и Т95%).

Систему достаточных допущений в общем случае может образовывать следующая триада: 1) зависимость критериального износа (т. е. по поверхности его нормирования) от времени резания имеет непрерывный линейный характер; 2) характер изнашивания режущей пластины в направлении нормали к перешлифовываемой поверхности идентичен характеру развития критериального износа; 3) коэффициенты ζ_i пропорциональности между величинами износа в направлении нормали к перешлифовываемой поверхности и критериального износа для всех пластин в ранжируемой группировке известны. Если перешлифовываемая поверхность и поверхность определения критериального износа взаимно перпендикулярны, то ζ_i вырождается в $\zeta_i = 1$.

Сформулированная система допущений позволяет рассчитывать интегральную рейтинговую оценку k_V относительного съема за нормативный ресурс режущей пластины, являющуюся оценкой более высокого порядка, чем k_W , а также более точной при неоднозначном задании критерия износа и его величины, как это имеет место, например, в оговоренных стандартом [2] условиях испытаний пластин на режущую способность, согласно которым норма h_3 , в зависимости от марки композита и угла ϵ_T при вершине пластины, варьируется от $h_3 = 0,10$ мм (композит 11, $\epsilon_T \geq 90^\circ$) до $h_3 = 0,15$ мм (Томал-10, для всех ϵ_T).

В контексте вышеизложенного, при $\delta = \text{const}$ у всех ранжируемых режущих пластин в выполненном представленным исследованием рассмотрении

по материалам [2] для стойкостных испытаний, $kV = kW$

Применительно, например, к некоторой виртуальной задаче с группировкой режущих пластин в аналогичных [2] и рассмотренных здесь условиях стойкостных испытаний, но с переменными h_{z1} и ζ_1 ; постоянными количеством (n) рабочих позиций (например, для многогранных определяемому количеству рабочих вершин или боковых граней, отражаемым в наименовании пластины); припуском (δ) на перешлифовку (например, по задней грани); передним (γ) и задним (α) углами режущего клина (например, нулевыми): минуя промежуточные выкладки, окончательно имеем

$$kVi = (v \cdot S_o \cdot t \cdot T \cdot [\delta / (\zeta \cdot h_{z.})])_i / (v \cdot S_o \cdot t \cdot T \cdot [\delta / (\zeta \cdot h_{z.})])_{\max},$$

или

$$kV = kQ(QTN) \cdot kT(QTN) \cdot kN(QTN),$$

где

$$kNi = [\delta / (\zeta \cdot h_{z.})]_i(QTN) / [\delta / (\zeta \cdot h_{z.})]_{\max}(QTN)$$

– относительное число переточек за нормативный ресурс режущей пластины.

Здесь полезно заметить, что определяющая kN целая часть $[\delta / (\zeta \cdot h_{z.})]$ вещественных чисел $\delta / (\zeta \cdot h_{z.})$, в общем случае не кратности числителя знаменателю, равна числу перешлифовок перетачиваемой режущей пластины за время ее успешной рабочей жизни, т. е. в отсутствие превышающих нормативный износ сколов и выкрашиваний.

И т. д., в т. ч. с инверсией поверхности перешлифовки на переднюю; переменными δ_1 и ζ_1 ; ненулевыми γ и α .

Заключение. Таким образом, разработанный подход к рейтинговой оценке работоспособности рабочей части лезвийных инструментов может использоваться применительно к различным группировкам в иерархии инструментальных материалов, в том числе используемым в виде перетачиваемых режущих пластин.

Подход аналитически реализован и получил расчетную апробацию с опорой на информационный базис стандартной методики стойкостных испытаний режущих пластин из сверхтвердых материалов. В результате расчетов определены рейтинги работоспособности в группе композитов на основе кубического нитрида бора (композиты 01, 02, 05, 06,

10Д, 11, Томал-10). Полученные рейтинговые оценки могут использоваться в планировании и подготовке научно-исследовательской и производственной практики.

Список литературы: 1. Гуцаленко, Ю. Г. Аналитическая модель и расчет рейтинговой оценки нитридных сверхтвердых композитов / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту "Харк. політехн. ін-т" : Зб. наук. пр. Темат. вип. : Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 42. – С. 192-196. 2. Пластины режущие сменные из сверхтвердых материалов. Технические условия : ГОСТ 28762-90 [Межгос. стандарт]. Введ. 1991-07-01. – Переизд. – М. : Стандартинформ, 2005. – 25 с. 3. Грановский, Г. И. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высш. шк., 1985. – 304 с. 4. ЗАО «Завод «Композит»»: [Официальный сайт; Санкт-Петербург, Россия]. – Режим доступа : <http://www.kompozit.spb.ru>. – Дата обращения : 29 августа 2014. 5. Институт физики твердого тела и полупроводников НАН РБ : [Официальный сайт; Минск, Беларусь]. – Режим доступа : <http://www.iftp.bas-net.by>. – Дата обращения : 29 августа 2014. 6. Научно-техническая фирма ООО «КНБ» : [Официальный сайт; Москва, Россия]. – Режим доступа : <http://www.knb.su>. – Дата обращения : 29 августа 2014. 7. Научно-технологический алмазный концерн «АЛКОН» : [Официальный сайт; Киев, Украина]. – Режим доступа : <http://www.alcon.com.ua>. – Дата обращения : 29 августа 2014. 8. ОАО «Московское производственное объединение по выпуску алмазного инструмента» : [Официальный сайт; пгт Томилино, Люберецкий район, Московская область, Россия]. – Режим доступа : <http://www.tomaltools.ru>. – Дата обращения : 29 августа 2014.

Bibliography (transliterated): 1. Gutsalenko, Yu. G. "Analiticheskaia model' i raschet rejtingovoj ocenki nitridbornyh sverhtverdyh kompozitov". *Visnyk NTU "KhPI"*. Kharkov. No. 42. 2014. pp.192–196. Print. 2. *Plastiny rezhushchie smennye iz sverhtverdyh materialov. Tehnicheskie uslovija*. GOST 28762-90. Moscow, Standartinform, 2005, 25 p. Reprint. 3. Granovskij, G. I., and V. G. Granovskij. *Rezanie metallov*. Vysshaja shkola, 1985. 304 p. Print. 4. *Zakrytoe akcionernoje obshchestvo Zavod Kompozit*. Zavod Kompozit, Closed Joint Stock Company, Sankt-Peterburg, Russia. 2014. Web. August 30, 2014. <<http://www.kompozit.spb.ru>>. 5. *Nacional'naja akademija nauk Belarusi. Institut fiziki tverdogo tela i poluprovodnikov*. Joint Institute for Solid State Physics and Semiconductors, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus', 2014. Web. August 30, 2014. <<http://www.iftp.bas-net.by>>. 6. *Nauchno-tehnicheskaja firma OOO KNB*. KNB, Co.Ltd, Moscow, Russia. Web. August 29, 2014. <<http://www.knb.su>>. 7. "ALKON diamond concern". *V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine*. V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kiev, Ukraine. Web. August 29, 2014. <<http://www.alcon.com.ua>>. 8. *Joint Stock Company – Moscow Industrial Union for Diamond Tools Production*. Moscow Industrial Union for Diamond Tools Production, Joint Stock Company, Tomilino, Ljuberetsky area, Moscow Region, Russia. Web. August 29, 2014. <<http://www.tomaltools.ru>>.

Поступила (received) 24.03.2015

Гуцаленко Юрий Григорьевич – старший научный сотрудник, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-707-61-85, e-mail: gutsalenko@kpi.kharkov.ua

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ВАРИАНТОВ ЦАПФ ЗАДНИХ МОСТОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В работе выполнено исследование сопротивления усталости цапф заднего моста транспортного средства «Дозор» различных вариантов изготовления. Для проведения испытаний использовали универсальную испытательную машину, позволяющую создавать максимальную статическую нагрузку 500 кН и максимальную циклическую нагрузку 250 кН с точностью $\pm 1\%$. Установлено, что место соединения цапфы с насадкой является менее нагруженным и напряженным, чем шлицы и зона крепления цапфы к корпусу.

Ключевые слова: транспортное средство, задний мост, цапфа, сопротивление усталости

Введение и постановка задачи. Актуальной задачей современного машиностроения является повышение эксплуатационной надежности транспортных средств. Использование быстроходных двигателей большой мощности обуславливает увеличение нагрузочных режимов основных агрегатов и деталей. При этом необходимо повышение надежности и долговечности этих узлов и деталей. Решение указанных проблем тесно связано с наиболее полным использованием свойств материалов и рациональным конструированием узлов транспортных средств [1, 2].

Целью настоящей работы являлась сравнительная оценка сопротивления усталости цапф заднего моста специального транспортного средства «Дозор»,

изготовленных по различным технологическим схемам, в условиях нагружения, имитирующего эксплуатационное.

Кроме того, представляло интерес исследование напряженного состояния цапф в условиях такого нагружения, и особенно определение значений напряжений в зоне соединения цапфы с насадкой.

Объекты испытаний. В качестве объектов исследования были использованы натурные цапфы заднего моста сварной или составной конструкции (по способу соединения непосредственно цапфы с насадкой). Варианты изготовления цапф приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Варианты изготовления цапф (* – с усиленными шлицами)

Конструкция цапф	Номер варианта	Характеристика варианта		
		Материал цапфы	Материал насадки	Примечание
Сварные	1-1	сталь 18X2H4MA	сталь 18X2H4MA	–
	1-2	сталь 18X2H4MA	сталь 18X2H4MA	с дефектами сварного шва
	1-3	сталь 18X2H4MA	сталь 12X2H4A	–
	1-4	сталь 18X2H4MA	сталь 18X2H4MA	без термообработки после сварки
	1-5	сталь 25XГТ	сталь 12X2H4MA	без термообработки после сварки
	1-6	сталь 25XГТ	сталь 25XГТ	без термообработки после сварки
	1-7	сталь 20X2H4A	сталь 25XГТ,	–
	3-1	сталь 20X2H4A	сталь 18X2H4MA	–
	3-2	сталь 18X2H4MA	сталь 18X2H4MA	с дефектами сварного шва
	3-3	сталь 18X2H4MA	сталь 18XГТ	–
	3-4	сталь 18X2H4MA	сталь 20X2H4A	–
	Составные	2-1	сталь 18X2H4MA	сталь 18X2H4MA
2-2		сталь 45	сталь 45X	3 штифта
4-1		сталь 20X2H4A	сталь 38XC	3 штифта
4-2		сталь 20X2H4A	сталь 38XC	4 штифта
4-3		сталь 20X2H4A	сталь 38XC	5 штифтов
4-4		сталь 38XC	сталь 38XC	2 ряда штифтов по 3 в каждом ряду (6 шт.)

Конструкция цапф	Номер варианта	Характеристика варианта		
		Материал цапфы	Материал насадки	Примечание
Составные	4-5	сталь 38ХС	сталь 38ХС	2 ряда штифтов по 2 в каждом ряду (4 шт.)
	4-6*	сталь 20Х2Н4А	сталь 38ХС	3 штифта
	4-7*	сталь 20Х2Н4А	сталь 38ХС	4 штифта

Сварка цапфы с насадкой осуществлялась с применением сварочной проволоки СВ08Г2С. Для снятия остаточных напряжений в сварном шве зона последнего подвергалась нагреву ТВЧ до температуры 650°С. После закалки и высокого отпуска твердость деталей находилась в пределах 285...341 НВ.

Составные цапфы изготавливали методом горячего прессования с натягом соединяемых поверхностей – 0,3 мм, т.е. сборка осуществлялась за счет разницы температур непосредственно цапфы и насадки. Кроме того, для дополнительной гарантии от проворачивания, обе части соединяли штифтами диаметром 12 мм.

Основные результаты испытаний. Испытания проводились по специально разработанной методике [3].

Результаты тензометрирования при испытаниях на изгиб с кручением приведены в таблице 2. При этом экспериментально полученные значения сравнивались с расчетными для балки переменного сечения, подвергнутой изгибу с кручением [4] (расчетные значения напряжений: при изгибе – 127 МПа, при кручении – 190 МПа).

Как следует из таблицы 2, абсолютные значения напряжений, полученных экспериментальным путем, достаточно близки к расчетным, что свидетельствует о правильности испытательной схемы [3], обеспечивающей условия нагружения, аналогичные эксплуа-

тационным. При этом их величины также существенно меньше значения предела выносливости материала цапф.

Таблица 2 – Результаты тензометрирования цапф заднего моста при изгибе с кручением

Номера цапф	Номер тензорезистора или розетки	Напряжения, МПа	
		при изгибе	при кручении
Цапфа 1	т/р No 1	+ 137	–
	т/р No 3	- 126	–
	роз. 2-2'	–	217
	роз. 4-4'	–	191
Цапфа 2	т/р No 5	- 130	–
	т/р No 7	+ 140	–
	роз. 6-6'	–	190
	роз. 8-8'	–	223

Результаты испытаний на усталость цапф различной конструкции приведены в таблице 3.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что при испытаниях на изгиб практически все цапфы, независимо от конструкции и использованных материалов, а также наличия дефектов сварного шва, выдерживают базовое количество циклов нагружения без разрушения. По-видимому, использованная схема испытаний недостаточно точно отражает характер нагружения цапф в эксплуатации.

Таблица 3 – Результаты испытаний цапф различной конструкции на усталость

Схема испытаний	Конструкция цапф	Номер варианта	Условные номера цапф	Количество циклов нагружения	Результат испытаний
Изгиб	Сварные	1-1	663-1...663-4	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-2	667-1...667-4; 668-1, 668-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-3	677-1, 677-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-4	682-1, 682-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-5	685-1, 685-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-6	686-1, 686-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
		1-7	687-1, 687-2	$2 \cdot 10^6$	выдержали
	Составные	2-1	674-1, 674-2	$3 \cdot 10^6$	выдержали
		2-2	680-1...680-4	$3 \cdot 10^6$	выдержали
Совместное действие изгиба и кручения	Сварные	3-1	689-1	489 000	разрушилась по шлицам
			689-2	514 000	разрушилась по шлицам
		3-2	694-1	700 000	разрушилась по шлицам
			694-2	$2 \cdot 10^6$	выдержала

Схема испытаний	Конструкция цапф	Номер варианта	Условные номера цапф	Количество циклов нагружения	Результат испытаний	
Совместное действие изгиба и кручения	Сварные	3-3	704-1	1 112 000	разрушилась по шлицам	
			704-2	1 690 000	разрушилась по шлицам	
		3-4	706-1, 706-2	1 480 000	разрушились по шлицам	
	Составные		4-1	688-1	350 000	разрушилась по шлицам
			4-2	688-3	418 000	разрушилась по шлицам
			4-3	688-4	443 000	разрушилась по шлицам
			4-4	690-1	790 000	разрушилась по шлицам
				690-2	1 431 000	разрушилась по шлицам
			4-5	693-1	2 · 106	выдержала
				693-2	945 000	разрушилась по шлицам
			4-6*	695-1, 695-2	2 · 106	выдержали
4-7*	696-1, 696-2	2 · 106	выдержали			

Оптимизация схемы и параметров испытаний (совместное воздействие на цапфы изгибающего и крутящего моментов) приводит к принципиальному изменению результатов испытаний на усталость.

Как видно из табл. 3, в большинстве случаев происходит разрушение цапф по шлицам от действия крутящего момента. Такие результаты свидетельствуют о том, что места соединения цапф с насадками (независимо от варианта изготовления и количества штифтов) являются менее нагруженными, чем шлицевое соединение.

Указанный вывод подтверждают данные, полученные при испытаниях составных цапф с усиленными шлицами (варианты 4-6* и 4-7*). Все испытанные цапфы выдержали без разрушения базовое количество циклов.

Выводы. Впервые реализована в лабораторных условиях методика испытаний на усталость цапф заднего моста транспортного средства «Дозор» с различными вариантами изготовления.

Установлено, что нагружение цапф одновременно изгибающим и крутящим моментами отражает условия работы деталей в эксплуатации. Данные, полученные при тензометрировании цапф в процессе статического нагружения показывают, что уровень напряжений во всех случаях существенно ниже предела выносливости материала цапф.

Результаты испытаний на усталость свидетельствуют о том, что при совместном действии изгиба и кручения разрушение цапф происходит по шлицам независимо от варианта изготовления деталей. При испытаниях деталей с усиленными шлицами все цап-

фы выдерживают заданное количество циклов нагружения.

На основе данных тензометрирования и усталостных испытаний, следует заключить, что выбранная схема испытаний цапф при одновременном действии изгибающего и крутящего моментов может служить основой разработки технологии и нормативов для проведения выборочных контрольных испытаний цапф в серийном производстве с целью периодического контроля уровня и стабильности качества их изготовления.

Список литературы: 1. Гольд Б. В. Основы прочности и долговечности автомобиля / Б. В. Гольд, Е. П. Оболенский, Ю. Г. Стефанович, О. Ф. Трофимов. – М.: Машиностроение, 1967. – 212 с. 2. Кугель Р. В. Испытания на надежность машин и их элементов. – М.: Машиностроение, 1982. – 182 с. 3. Лобанов В. К. Методика и техника исследования сопротивления усталости цапф задних мостов специальных транспортных средств / В. К. Лобанов, Г. И. Пашкова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 42. – С. 112-115. 4. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1975. – 704 с.

Bibliography (transliterated): 1. Gol'd, B. V., E. P. Obolenskij, Yu. G. Stefanovich, and O. F. Trofimov. *Osnovy prochnosti i dolgovechnosti avtomobilja*. Moscow: Mashinostroenie, 1967. – 212 p. Print. 2. Kugel', R. V. *Ispytaniya na nadezhnost' mashin i ih jelementov*. Moscow: Mashinostroenie, 1982. – 182 p. Print. 3. Lobanov, V. K., and G. I. Pashkova. *Metodika i tehnika issledovaniya soprotivleniya ustalosti capf zadnih mostov special'nyh transportnyh sredstv*. Visnik NTU «KhPI». No. 42. 2014. pp.112-115. Print. 4. Pisarenko, G.S., A.P. Jakovlev and V.V. Matveev. *Spravochnik po soprotivleniju materialov*. Kiev: Naukova dumka, 1975. – 704 p. Print.

Поступила (received) 10.10.2014

Лобанов Виктор Константинович – д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-707-60-40, e-mail: omd.kpi.kharkov.ua@mail.ru ;

Пашкова Галина Ивановна – канд. техн. наук, нач. лаб., ГП «Завод им. В. А. Малышева», тел.: (057)-739-39-49, e-mail: marketing@malyshev.kharkov.ua .

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

На основе преобразования Лапласа впервые построена математическая модель аппаратных средств программного управления продольной подачей шлифовального круга. Минимизацией квадратичного критерия качества с использованием эталонной модели аппаратных средств синтезировано устройство обработки входной информации в условиях действия помех. Построена схема имитационного моделирования и установлена эффективность разработанных аппаратных средств.

Ключевые слова: математическая модель, структурно-логическая организация, информационный подход.

Введение. Внедрение в машиностроительное производство Украины современных информационных и энергосберегающих технологий базируется на разработке аппаратно-програмных средств повышения эффективности технологических процессов и, в частности, алмазного шлифования (АШ). Применение известных одномерных средств автоматизации процессов АШ имеет цель: сократить время обработки детали и получить заданную шероховатость ее обработанной поверхности. Традиционные технологии ориентированы на поддержание одномерными аппаратными средствами режимов шлифования, которые хранит их банк данных в виде программы обработки партии деталей.

Целью статьи является разработка эффективных аппаратных средств программного задания продольной подачи шлифовального круга (ШК). Достижение поставленной цели выполняется путем решения следующих задач:

- разработка схемы структурно-логического построения;
- разработка математических моделей компонентов;
- установление полосы неопределенности входного сигнала;
- синтез устройства обработки сигнала продольной подачи ШК;
- разработка схемы имитационного моделирования.

Разработка схемы структурно-логического построения. Величина продольной подачи задает скорость движения ШК вдоль обрабатываемой поверхности детали в течение его одного прохода. Выходной величиной привода продольной подачи ШК является угловая скорость вращения. Передаточная функция привода продольной подачи ШК описывается выражением [1]

$$W_1(p) = \frac{(b_1^* p + b_0^*) p}{a_7 p^7 + a_6 p^6 + a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (1)$$

$$\text{где } b_1^* = k_y k_{\mathcal{E}} K_{\text{шшл}} K_{\text{мс}} T_{\text{дм}} k_M, \quad b_0^* = k_y k_{\mathcal{E}} K_{\text{шшл}} K_{\text{мс}} k_M, \\ a_7 = \tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}} T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} T_M,$$

$$a_6 = \tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}} T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + \\ + T_M [\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}} (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}} + T_{\mathcal{E}} T_{\text{дм}}) + \\ + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шшл}} + \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}})]$$

$$a_5 = \tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}} (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}} + T_{\mathcal{E}} T_{\text{дм}}) + \\ + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шшл}} + \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}}) + \\ + T_M [\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}} (T_{\text{мс}} + T_{\text{дм}} + T_{\mathcal{E}}) + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} \times \\ \times (\tau_{\text{мс}} + \tau_{\text{шшл}} + T_{\text{шшл}}) + (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шшл}} + \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}}) \times \\ \times (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}} + T_{\mathcal{E}} T_{\text{дм}})],$$

$$a_4 = \tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}} (T_{\text{мс}} + T_{\text{дм}} + T_{\mathcal{E}}) + \\ + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} (\tau_{\text{мс}} + \tau_{\text{шшл}} + T_{\text{шшл}}) + (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шшл}} + \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}}) \times \\ \times (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}}) T_M [\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}} + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + \\ + (T_{\text{мс}} + T_{\mathcal{E}} + T_{\text{дм}}) (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шшл}} + \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}}) + \\ (\tau_{\text{мс}} + \tau_{\text{шшл}} + T_{\text{шшл}}) (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}})],$$

$$a_3 = \tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}} + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + (T_{\text{мс}} + T_{\mathcal{E}} + T_{\text{дм}}) \times \\ \times (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шшл}} + \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}}) + \\ + (\tau_{\text{мс}} + \tau_{\text{шшл}} + T_{\text{шшл}}) (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}}) + \\ T_M [\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шшл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шшл}} + \tau_{\text{шшл}} T_{\text{шшл}} + \\ T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}} + T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + (\tau_{\text{мс}} + \tau_{\text{шшл}} + T_{\text{шшл}}) \times \\ \times (T_{\text{мс}} + T_{\text{дм}} + T_{\mathcal{E}})]$$

$$a_2 = \tau_{ms}\tau_{uun} + \tau_{ms}T_{uun} + \tau_{uun}T_{uun} + (\tau_{ms} + \tau_{uun} + T_{uun}) \times \\ \times (T_{ms} + T_{dm} + T_3) + T_{ms}T_{dm} + T_{ms}T_3 + T_{dm}T_3 + \\ + T_M(\tau_{ms} + \tau_{uun} + T_{uun} + T_{ms} + T_{dm} + T_3)$$

$$a_1 = \tau_{ms} + \tau_{uun} + \tau_{ms} + T_{uun} + \tau_{uun} + T_{uun} + 2T_M, \quad a_0 = 2.$$

Поиск полюсов выражения (1) дал следующие результаты:

```
ans = 1.0e+004 *
-2.3826
-0.1338 + 0.7726i
-0.1338 - 0.7726i
-0.02026
-0.0800 + 0.0119i
-0.0800 - 0.0119i
-0.0130
```

Анализ полученных результатов позволяют сделать такие заключения:

- условию устойчивости привода удовлетворяют все корни характеристического уравнения;
- корни четыре, пять и шесть малы по величине. Они оказывают влияние на начало переходного процесса. Седьмой корень совпал по величине с нулем передаточной функции;
- привод продольной подачи ШК без потери точности представим такой передаточной функцией

$$W_2(p) = \frac{b_0^* p}{(T_6 p + 1)(\zeta_2 \partial_7 p + 1) \left(\frac{T_7}{\zeta_2} p + 1 \right)}, \quad (2)$$

где T_6, T_7, ζ_2 – вычисляются по полученным корням.

В основу разработки аппаратных средств положен метод отработки рассогласования между измеренным значением продольной подачи ШК и ее оптимальным значением, которое хранится в банке данных процесса АШ. Структурно-логическая организация аппаратными средствами обработки данных продольной подачи ШК представлена на рис. 1.

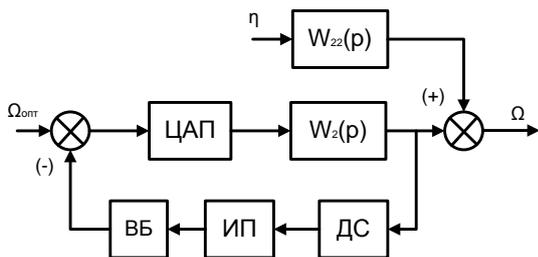


Рис. 1 – Структурно-логическая организация аппаратных средств

Разработка математической модели аппаратных средств. Выполним моделирование компонентов и анализ структурной схемы с целью получения выражения для передаточной функции. Специфика работы блоков ДС и ИП в составе аппаратных средств обработки данных продольной подачи ШК позволяет представить их пропорциональным звеном с запаздыванием [2]

$$W_3(p) = k_3 e^{-p\tau_3}, \quad (3)$$

где k_3, τ_3 – коэффициент передачи и запаздывание, причем $k_3 = 1/b_0^*$ выбирается из условия нормализации.

С учетом полосы Δ_1 нечувствительности первичного преобразователя вокруг номинальной характеристики имеем такую передаточную функцию блоков ДС и ИП

$$W_4(p) = \Delta_1 k_3 e^{-p\tau_3}. \quad (4)$$

Для последующего анализа динамики аппаратных средств обработки данных продольной подачи ШК представляет интерес установление полосы нечувствительности блоков ДС и ИП вокруг номинальной характеристики преобразования. Погрешность дискретизации находит свое количественное выражение в нестабильности выходного кода. Для оценивания метрологических характеристик блоков ДС и ИП выполнена статистическая обработка экспериментальных данных. На рис. 2 представлена гистограмма разброса выходного кода. Объем выборки составил 153 измерения. Основные статистические параметры этого распределения следующие

$$\bar{O} = 0, \quad \sigma = 0.036142, \quad A = 0, \quad E = -0.504.$$

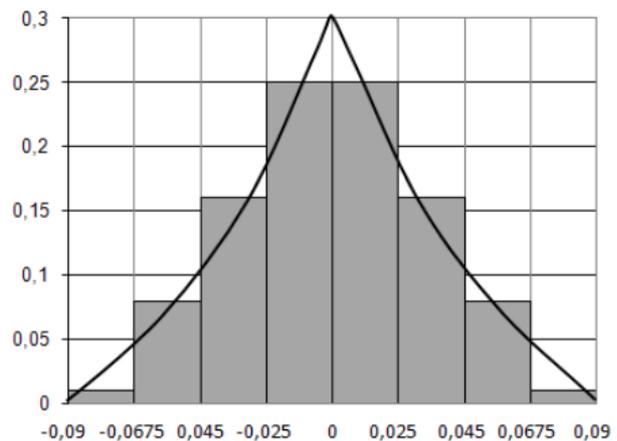


Рис. 2 – Гистограмма разброса выходного кода

Гистограмма разброса выходного кода после выполнения процедуры сглаживания описана экспоненциальным законом распределения, который по виду достаточно близкий к треугольному. Вероятность проявления выдвинутой гипотезы по критерию согласия Колмогорова составляет 0.918 при $\lambda = 0.419$. Уравнение сглаженной кривой, после применения программы *Stat graft*, имеет вид

$$f_1(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \quad \text{при} \quad x \in (-0.09, 0.09). \quad (5)$$

Воспользуемся информационным подходом при определении погрешности проведенных исследований. Для полученного закона распределения погрешности имеем

$$\ln f_1(x) = -\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma}.$$

Отсюда энтропия погрешности

$$H\left(\frac{x}{x_r}\right) = -\int_{-0.1}^{0.1} \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \left(-\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma}\right) dx = \ln\left(2\sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}}\right).$$

Следовательно, энтропийный интервал неопределенности выходного кода блоков ДС и ИП составил

$$\Delta_1 = \sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} = 0.036142.$$

Этот интервал определяет полосу нечувствительности блоков ДС и ИП вокруг номинальной характеристики преобразования. Динамика устройства обработки сигнала и экстраполятора исследована в работе [3]. Передаточная функция аппаратных средств обработки данных продольной подачи ШК после преобразований получилась в таком виде

$$W_5(p) = \frac{b_0^* \tau_r p (\tau_4 p + 1)}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (6)$$

где $a_4 = T_6 T_7^2 \tau_3$,

$$a_3 = T_6 \zeta_2 T_7 \left(\frac{T_7}{\zeta_2} + \tau_3\right) + (T_6 + \zeta_2 T_7) \frac{T_7}{\zeta_2} \tau_3,$$

$$a_2 = T_6 \zeta_2 T_7 + \frac{T_7}{\zeta_2} \tau_3 + (T_6 + \zeta_2 T_7) \left(\frac{T_7}{\zeta_2} + \tau_3\right) + \Delta_1 \tau_r,$$

$$a_1 = T_6 + \zeta_2 T_7 + \frac{T_7}{\zeta_2} + \tau_3.$$

Методика анализа частотных характеристик аппаратных средств состоит из следующих вычислительных процедур:

- создаем tf-объект по выражению для передаточной функции;
- определяем полюса с использованием команды `roots(W)` или `pole(W)`;
- определяем нули с использованием команды `roots(W)` или `zero(W)`;
- строим переходную функцию командой `step(W)`;
- строим импульсную переходную функцию командой `impulse(W)`;
- диаграмму Боде получим, используя для этого команду `bode(W)`;
- запас стойкости по амплитуде и фазе можно установить, используя для этого команду `margin(W)`;
- определяем частотный годограф Найквиста, выполнив для этого команду `nyquist(W)`;
- аналогичные результаты анализа можно получить, используя команду `ltiview(W)`, с соответствующими настройками в меню «Plot Configuration».

Результаты анализа выражения (5) представлены на рис. 3.

Продольную подачу ШК представим в таком виде

$$S_{ip}(t) = \frac{4S_{ip}}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{2k-1} \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1-t_2)\right] \sin(2k-1)\Omega t. \quad (7)$$

Продольная подача ШК представляет собой скорость перемещения исполнительного механизма. Сле-

довательно, ее будем рассматривать как производную или скорость изменения выходного сигнала канала на соответствующий привод ШС

$$S'_{np}(t) = \frac{4S_{ip}\Omega}{\pi} \sum_{k=1}^n \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1-t_2)\right] \cos(2k-1)\Omega t. \quad (8)$$

Преобразуем последнее выражение путем замены гармонических составляющих суммой экспоненциальных сигналов

$$S'_{np}(t) = \sum_{k=1}^n B_{2k-1} \left[e^{j(2k-1)\Omega t} + e^{-j(2k-1)\Omega t} \right], \quad (9)$$

$$\text{где } B_{2k-1} = \frac{2S_{ip}}{\pi} \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1-t_2)\right].$$

Для вычисления интеграла Дюамеля применим обратное преобразование Лапласа к уравнению (6). После преобразований получим

$$W_6(t) = \sum_{k=5}^8 B_k e^{-p_k t}, \quad (10)$$

$$\text{где } B_k = \frac{b_0^* \tau_r p (\tau_4 p + 1)}{4a_4 p^3 + 3a_3 p^2 + 2a_2 p + a_1} \Bigg|_{p=p_k}.$$

Расчет корней характеристического уравнения передаточной функции аппаратных средств дал такие результаты:

```
ans = 1.0e+004 *
-4.1866 + 0.3820i
-4.1866 - 0.3820i
-2.3318
-0.1339
```

Интеграл свертки на основе выражений (9) и (10) дал уравнение, которое описывает динамику выходного сигнала канала обработки данных продольной подачи ШК

$$y_{nd}(t) = \sum_{k=5}^8 B_k e^{-p_k t} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{A}_{2i-1} T_k}{\sqrt{1+T_k^2(2i-1)^2 \Omega^2}} \left[e^{j \arctan T_k (2i-1)\Omega} - e^{-j \arctan T_k (2i-1)\Omega} \right]. \quad (11)$$

Синтез устройства обработки сигнала. Для вычисления дискретной передаточной функции привода поперечной подачи ШК раскладываем выражение (2) на простые дроби

$$\frac{W_2(p)}{p} = \frac{A_4}{(p+1/T_6)} + \frac{A_5}{(p+1/\zeta_2 T_7)} + \frac{A_6}{(p+\zeta_2/T_7)}, \quad (12)$$

$$\text{где } A_4 = \frac{b_0^* T_7}{T_6 T_7 (\zeta_2^2 + 1) - \zeta_2 (T_6^2 - T_7^2)} + \frac{b_0^* \zeta_2}{(\zeta_2 T_5 - T_4)(1 - \zeta_2^2)},$$

$$A_5 = \frac{b_0^* \zeta_2}{(\zeta_2 T_7 - T_6)(\zeta_2^2 - 1)}, \quad A_6 = \frac{b_0^* T_7}{\zeta_2 (T_6^2 - T_7^2) - T_6 T_7 (\zeta_2^2 + 1)}.$$

В соответствии с таблицей z-преобразований имеем такое выражение

$$z \left\{ \frac{W_2(p)}{p} \right\} = \frac{A_4 z}{z-l_5} + \frac{A_5 z}{z-l_6} + \frac{A_6 z}{z-l_7}, \quad (13)$$

$$\text{где } l_5 = e^{-\frac{T_0}{T_6}},$$

$$l_6 = e^{-\frac{T_0}{\zeta_2 T_7}},$$

$$l_7 = e^{-\frac{\zeta_2 T_0}{T_7}}.$$

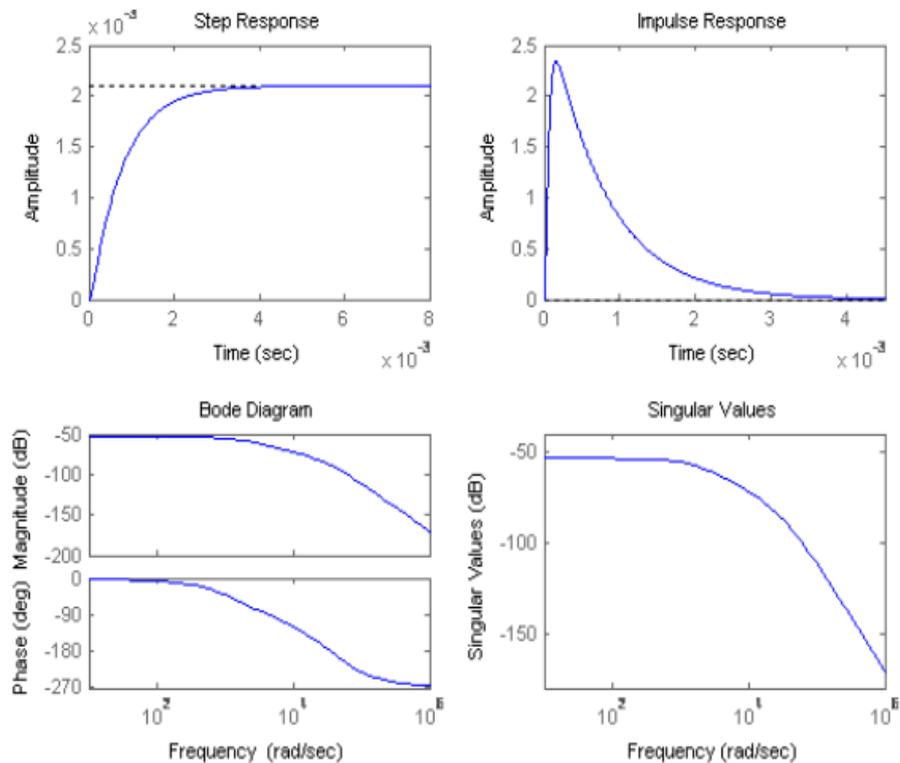


Рис. 3 – Частотные характеристики аппаратных средств обработки данных продольной подачи ШК

Дискретная передаточная функция привода после преобразований получилась в виде отношения двух степенных полиномов

$$W_7(z^{-1}) = \frac{b_1^{\circ} z^{-1} + b_2^{\circ} z^{-2} + b_3^{\circ} z^{-3}}{1 + a_1^{\circ} z^{-1} + a_2^{\circ} z^{-2} + a_3^{\circ} z^{-3}}, \quad (14)$$

где $b_1^{\circ} = A_4 + A_5 + A_6$,

$$b_2^{\circ} = -[A_4(l_6 + l_7) + A_5(l_5 + l_7) + A_6(l_5 + l_6)],$$

$$b_3^{\circ} = l_5 l_6 + l_5 l_7 + l_6 l_7, \quad a_1^{\circ} = -(l_5 + l_6 + l_7);$$

$$a_2^{\circ} = l_7(l_5 + l_6) + l_5 l_6, \quad a_3^{\circ} = -l_5 l_6 l_7.$$

Будем считать, что дискретное время запаздывания аппаратных средств по входному сигналу, равное сумме запаздываний указанных блоков, составляет $2T_0$. Соответственно, порядок математической модели составляет $d = 3$. С учетом этого запаздывания дискретная передаточная функция аппаратных средств получилась в таком виде

$$W_7(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_1^{\circ} z^{-1} + b_2^{\circ} z^{-2} + b_3^{\circ} z^{-3}}{1 + a_1^{\circ} z^{-1} + a_2^{\circ} z^{-2} + a_3^{\circ} z^{-3}} = z^{-2} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}. \quad (15)$$

Будем так же считать, что случайное возмущение приложено к механической части двигателя. Передаточная функция по возмущению исследуемых аппаратных средств описывается уравнением [2]

$$W_l(p) = \frac{k_l p}{T_l p + 1}, \quad (16)$$

где k_l, T_l – коэффициент передачи и постоянная времени механической части двигателя. Для вычисления z-преобразования передаточной функции по возмущению раскладываем ее на простые дроби

$$\frac{W_l(p)}{p} = \frac{A_7}{p} + \frac{A_8}{\left(p + \frac{1}{T_l}\right)}, \quad (17)$$

где $A_7 = k_l$, $A_8 = -k_l T_l$.

В соответствии с таблицей z-преобразований имеем такое выражение

$$z \left\{ \frac{W_l(p)}{p} \right\} = \frac{k_l z}{z-1} - \frac{k_l T_l z}{z-l_8}, \quad (18)$$

где $l_8 = e^{-\frac{T_0}{T_l}}$.

Дискретная передаточная функция по возмущению после преобразований получилась в виде отношения двух степенных полиномов

$$W_8(z^{-1}) = \frac{k_l z^{-1} [1 - T_l + (T_l - l_8) z^{-1}]}{1 - (1 + l_8) z^{-1} + l_8 z^{-2}} = \frac{C(z^{-1})}{E(z^{-1})}. \quad (19)$$

После получения выражений для дискретных передаточных функций перейдем к синтезу устройства обработки сигнала продольной подачи ШК. Его синтез в условиях действия помех выполним на основе минимизации квадратичного критерия качества и с использованием эталонной математической модели. Процедура синтеза приведена авторами к установлению параметров степенных полиномов $R_l(z^{-1})$, $H(z^{-1})$, $D(z^{-1})$ и $F(z^{-1})$, при которых основной контур устройства устойчив. Полином $R_l(z^{-1})$ определяет динамику переходного процесса при устранении ошибки рассогласования основного контура. Поскольку величиной погрешности ε_{avr} можно задать, а величина Δ_1 интервала неопределенности уже

определена в результате статистической обработки экспериментальных данных, то полином $R_1(z^{-1})$ имеет такой вид

$$R_1(z^{-1}) = \frac{\Delta_1 k_l z^{-1} [1 - T_l + (T_l - l_8) z^{-1}]}{\varepsilon_{\text{авт}}} \quad (20)$$

Параметры степенного полинома $H(z^{-1})$ определяются следующим образом

$$H(z^{-1}) = z^{-3} (h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + h_3 z^{-3}), \quad (21)$$

где

$$h_1 = \frac{\Delta_1 k_l (1 - T_l) b_1^\circ}{\varepsilon_{\text{авт}} a_1^\circ},$$

$$h_2 = \frac{\Delta_1 k_l [(1 - T_l) b_2^\circ + b_1^\circ (T_l - l_8)]}{\varepsilon_{\text{авт}} a_2^\circ},$$

$$h_3 = \frac{\Delta_1 k_l [(1 - T_l) b_3^\circ + b_2^\circ (T_l - l_8)]}{\varepsilon_{\text{авт}} a_3^\circ}.$$

Представим входной сигнал аппаратных средств функцией Хэвисайда, которая имеет амплитуду S_{np} . Соответственно этот сигнал в форме z -преобразования имеет вид

$$G_t = \frac{S_{np} z}{z - 1}. \quad (22)$$

Для установившегося режима работы устройства обработки сигнала (ошибка рассогласования равняется нулю) имеем

$$G_t H(z^{-1}) = y_t F(z^{-1}). \quad (23)$$

После преобразований получим полином $F(z^{-1})$ в таком виде

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}, \quad (24)$$

где

$$f_0 = 1, \quad f_1 = \frac{a_1^\circ + 1}{a_1^\circ}, \quad f_2 = \frac{a_1^\circ a_2^\circ + a_1^\circ + a_2^\circ}{a_1^\circ a_2^\circ}.$$

При отсутствии входного сигнала имеем

$$D(z^{-1}) U_t = -F(z^{-1}) y_t. \quad (25)$$

С учетом того, что $y_t = W_7(z^{-1}) U_t$, имеем такое уравнение

$$D(z^{-1}) A(z^{-1}) = -F(z^{-1}) B(z^{-1}).$$

Отсюда, после преобразований получен полином $D(z^{-1})$ в виде

$$D(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}, \quad (26)$$

где его коэффициенты имеют такие значения

$$g_0 = \frac{b_0^\circ}{a_0^\circ},$$

$$g_1 = \frac{b_1^\circ - \frac{b_0^\circ a_1^\circ}{a_0^\circ} + \frac{b_0^\circ (a_1^\circ + 1)}{a_1^\circ}}{a_0^\circ},$$

$$g_2 = \frac{b_2^\circ + \frac{b_1^\circ (a_1^\circ + 1)}{a_1^\circ} + \frac{b_2^\circ (a_1^\circ a_2^\circ + a_1^\circ + a_2^\circ)}{a_1^\circ a_2^\circ} - \frac{b_0^\circ a_2^\circ - a_1^\circ \left[b_1^\circ - \frac{b_0^\circ a_1^\circ}{a_0^\circ} + \frac{b_0^\circ (a_1^\circ + 1)}{a_1^\circ} \right]}{a_0^\circ}.$$

После преобразований получим передаточную функцию устройства обработки сигнала продольной подачи ШК в таком виде

$$W_9(z^{-1}) = \frac{0.04752 + 0.862z^{-1} - 0.823z^{-2}}{0.374 - 0.374z^{-1}}. \quad (27)$$

Разработка критерия для оценивания эффективности аппаратных средств. Управление продольной подачей аппаратные средства выполняют во время прямого или обратного хода ШК. Представим выходной сигнал в виде ограниченного ряда Фурье

$$v(t) = \sum_{i=1}^n A_{2i-1} \sin[(2i-1)\omega t]. \quad (28)$$

Оценим потери информации при дискретизации по времени аналогового сигнала, который описан выражением (28). Динамическая погрешность дискретизации по времени аналогового сигнала исследована в работе [1]. Там же получено такое выражение для ее описания

$$\Delta_{\text{диф}} = \int_0^T v(t) dt - T_0 \sum_{k=1}^m v(kT_0), \quad (29)$$

где m – количество интервалов дискретизации.

После преобразований выражения (29) имеем динамическую погрешность дискретизации гармонического сигнала в таком виде

$$\Delta_{\text{диф}} = T_{\text{д}} \left[\frac{1}{\pi} - \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{0.5m-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{m}\right) \right], \quad (30)$$

где T_{np} – время выполнения ШК одного прохода.

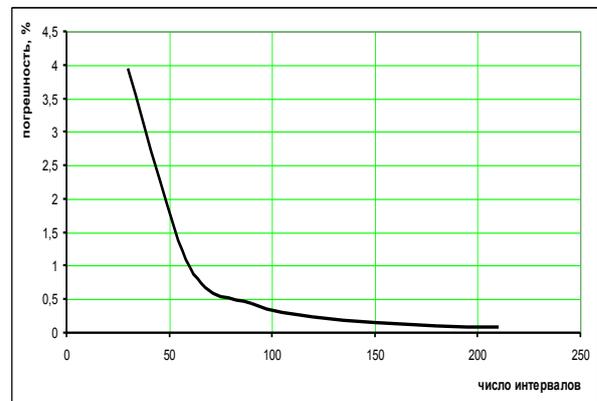


Рис. 4 – График погрешности дискретизации выходного сигнала

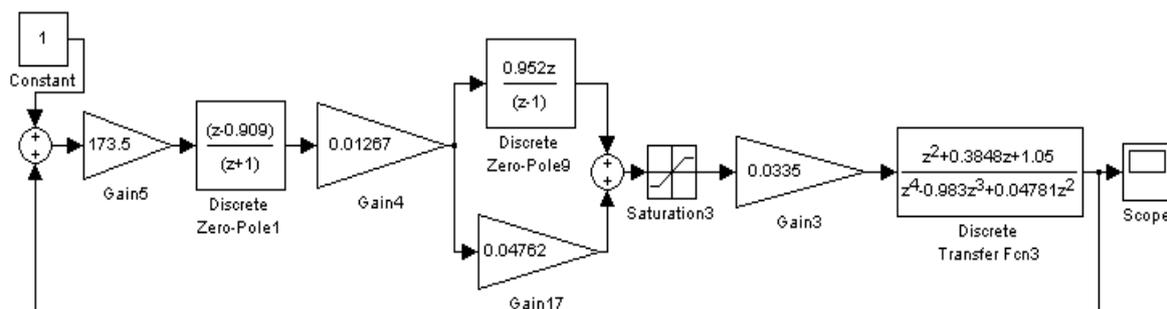


Рис. 5 – Схема имитационного моделирования процессов преобразования информации аппаратными средствами обработки данных продольной подачи ШК

После преобразований формулы (30) получим выражение для относительной погрешности дискретизации гармонического сигнала

$$\delta_{\text{дд}} = 1 - \frac{\pi}{m} \sum_{k=0}^{0.5m-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{m}\right). \quad (31)$$

Среднеквадратическая погрешность дискретизации сигнала (28) оценивалась автором с учетом вкладов гармонических составляющих. Для получения ее оценки использовалось такое выражение

$$\delta_{\text{нд}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_{2i-1}^2}{\sum_{i=1}^n A_{2i-1}^2}} \delta_{(2i-1)\text{дд}}. \quad (32)$$

Результаты расчетов среднеквадратической погрешности дискретизации представлены на рис. 4. Задавая допустимым значением погрешности, получим с помощью графика минимально возможное количество интервалов дискретизации. Время выполнения ШК одного прохода известно. Период квантования вычисляем путем деления этого времени на выбранное количество интервалов дискретизации. Быстродействие аппаратных средств должно превышать рассчитанный период квантования. Так, например, время одного прохода ШК поверхности заготовки, длина которой 0.5 м, при продольной подаче 4.0 м/мин составляет 7.5 с. При ошибке дискретизации величиной 0.035 имеем 100 интервалов. Соответственно, длительность периода квантования входной информации равна 0.075 с.

Схема имитационного моделирования. На основе выражений (15), (19) и (27) собрана схема имитационного моделирования процессов преобразования информации аппаратными средствами обработки данных продольной подачи ШК (рис. 5).

Вывод. На основе метода обработки рассогласований между измеренным значением продольной подачи ШК и ее оптимальным значением, которое хранит банк данных процесса АШ, реализовано структурно-

логическое построение аппаратных средств. В результате анализа структурно-логической схемы с использованием дискретного преобразования Лапласа впервые построена математическая модель. В результате статистической обработки экспериментальных данных установлена зона нечувствительности датчика вокруг номинальной характеристики преобразования. На основе минимизации квадратичного критерия качества с использованием эталонной модели аппаратных средств синтезировано устройство обработки сигнала продольной подачи ШК. При этом синтезе учтено запаздывание аппаратных средств. Построена схема имитационного моделирования процесса обработки данных продольной подачи ШК. Время преобразования аппаратными средствами входного сигнала в виде единичной функции Хэвисайда составило 0.06 с. Вид выходного сигнала - аperiodический. Следовательно, производительность аппаратных средств обработки данных продольной подачи ШК удовлетворяет требованиям по быстродействию.

Список литературы: 1. Єнікєєв О.Ф. Комп'ютеризована система для підвищення ефективності алмазного шліфування / О.Ф.Єнікєєв, Т.Л. Щербак // Збірник наукових праць ІПМЕ НАН України. Випуск 63. –К.: 2012. – С. 32 – 40. 2. Єнікєєв А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с. 3. Єнікєєв А.Ф. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга / А.Ф. Єнікєєв, І.С. Зыков. // Вестник Национального технического университета «ХПИ». –Харьков: No57, 2008. – С. 87 – 93.

Bibliography (transliterated): 1. Enikyeyev O.F., Shherbak T.L. *Komp'yuteryzovana systema dlya pidvyshchennya efektyvnosti almaznogo shlifuvannya*. Kiev: IPME NAN Ukrayiny. 2012. – pp. 32-40 Print. 2. Enikeev A.F. *Optimal'noe upravlenie teh-nologicheskim processom almaznogo shlifovaniya*. Kramatorsk: DGMA. 2001. – 160 p. Print 3. Enikeev A.F., Zykov I.S. *Sintez cifrovogo reguljatora poperechnoi peredachi shlifival'nogo kruga* Kharkov: NTU «KhPI». 2008. – pp. 87-93. Print.

Поступила (received) 25.03.2015

Єнікєєв Александр Фанілович – канд. техн. наук, доцент, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта (УкрГУЖТ), (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net

Євсюкова Фатима Магометдиєвна – ст. преподаватель НТУ «ХПИ», (097)-941-22-99, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru

Шішенко Леонід Афанасьєвич – канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ», (067)-426-68-07

THE EFFECT OF CUTTING TEMPERATURE ON HOLE QUALITY WHEN DRILLING CFRP/METAL STACK

The carbon fiber reinforced plastic (CFRP) are widely used in stacks with metals. That allows obtaining components with high strength and reduces weight. Holes' drilling is a basic operation of CFRP/metal and metal /CFRP stacks machining. The most common problems of CFRP/metal stacks drilling are CFRP delamination, fiber pull – out, thermal degradation and low quality of hole surface. In this study the effect of cutting temperature on the hole quality was provided. It was experimentally established that drilling of CFRP/metal stack was accompanied with a significant change of cutting temperature in the cutting zone during the transition of drill from CFRP to metal plate.

Key words: drilling, hole surface integrity, accuracy, CFRP/metal stack, drill wear, cutting temperature.

Introduction. In the last two decades composites materials have taken leading positions and exclude traditional construction materials in the aircraft building and power engineering. CFRP could be shaped in a complex form so the necessity in milling and turning operations significantly reduce. However, there is a need for assembling CFRP parts with metal one. In such a way the most widespread machining processes are: drilling, reaming, countersinking. Machining of CFRP parts, is associated with considerable difficulties due to multi component structure of these materials [1]. There are substantial problems with the quality and accuracy of the machined surface. It is well known fact that the quality of machined holes in CFRP determines the life cycle of the joints in CFRP/metal stacks [2].

State of the art. According to a study W. Xin, Y.K Parick, S. Caleb et al. (2014) researches used CFRP (7.54mm) / Ti (6.73mm) stacks. Researches studied influence of cutting conditions operation on tool wear during CFRP/Ti alloy drilling. As a tool material was chosen - uncoated WC-9% Co, drill with \varnothing 9,525 mm, flute length 38,1 mm and double point angle $2\varphi=135^\circ$. Drilling conditions are used throughout the experiment was 6000 rpm, feed rate of 0,0762 mm/rev for CFRP, and 500 rpm, feed rate of 0,0508 mm/rev for titanium alloy respectively. Drill wear was studied on the flank surface near corner and chisel edge. It was found that different cutting conditions for CFRP and titanium alloy provokes less wear of cutting tool. In experiments it was indicated that the tool life attainable in drilling of the CFRP/Ti alloy stack was about three times longer compared to that attainable in drilling of Ti alloy only. Authors concluded that effect of cutting temperature on tool wear mechanism is not yet well studied [3].

A. Poutord, F. Rossi, G. Poulachon, M'Saoubi R (2013) provided research on drilling CFRP (25.5 mm)/Ti6Al4V (20.7 mm) stack by WC \varnothing 12 mm drill, with flute length 55 mm, double point angle $2\varphi=140^\circ$. When drilling stack the adaptation of cutting conditions $V=100$ m/min, $f=0,05$ mm/rev and 10 m/min and 0,2 mm/rev for CFRP and Ti machining respectively was used. Measurement of axial force distribution along primary

cutting edge and proved that wear of chisel edge provokes delamination. It can be concluded that the major tool wear comes from the CFRP material. The wear generated by Ti6Al4V is mostly confined to cutting edge chipping on the drill corner [4].

O. Pecat, E. Brinksmeier (2014) provided the research which was focused in study influence of low frequency vibration assisted drilling (LFVAD) to the surface integrity of CFRP (10 mm)/Ti6Al4V (10 mm) compound stacks compared to conventional drilling. Research was implemented using twist drill with \varnothing 4,83 mm, double point angle $2\varphi=120^\circ$, helix angle 30° . When drilling cutting speed and feed was 15 m/min 0.075 mm/ rev respectively. LFVAD method was realized with amplitude 0,115 mm and frequency 1,5 oscillations/rev. It was concluded that thermo mechanical damages of the CFRP layer and high cutting temperatures in titanium are mainly caused by insufficient extraction of metallic Ti-chips which are reaming at the newly generated bore surface. The exit burr height in Ti6Al4V is significantly decreasing due to lower process temperatures in LFVAD [5].

Crisan L.A., Pop G.M. conducted a research on machining CFRP with WC drill bit, double point angle $2\varphi=118^\circ$ and 155° and found that the drill bit geometry influence on cutting temperature when machining CFRP. When machining with drill that has $2\varphi=118^\circ$ the temperatures registered with the IR camera were higher than 145°C , at the same time when machining with drill $2\varphi=155^\circ$ registered temperatures didn't overcome 85°C . It was found that surface roughness parameter R_a decreases with the increase of the spindle speed when processing with drill bit $2\varphi=118^\circ$. The surface roughness parameter R_a increases, up to $18\mu\text{m}$, with the increase of the feed, when processing with tool $2\varphi=118^\circ$ [6].

Despite of many studies reported on the drilling CFRP/metal stacks the fundamental understanding of cutting temperature in drilling stacks and the relationship with hole accuracy and quality is not known. There are some research which was targeted to uncover influence of cutting temperature on the hole quality when drilling CFRP but study on measuring cutting temperature during machining CFRP/metal stack has not yet done.

The purpose of current paper is to explore the influence of cutting temperature on quality of hole and surface integrity when drilling CFRP/steel stacks with carbide drill.

Problem statement. Current study is targeted to explore the change of cutting temperature in the process of CFRP/metal stack drilling in conditions of different wear rate of the drills and their influence on the holes' quality. It is well known fact that CFRP have high heat capacity and low thermal conductivity [7]. That circumstance creates favourable conditions for thermal integrity of machined surface and describes its quality. Other limitation factor is feed rate. So far that cutting parameter contributes much in formation of delamination of CFRP. That specific damage of CFRP layers reduce bearing capacity of bolted joist [2].

Nowadays researches and manufactures have already worked out guidelines for machining CFRP with cutting conditions: cutting speed rate 15 - 180 m/min and feed rate 0,02-0,15 mm/rev [3, 4, 5]. With it recommended cutting conditions for metallic materials vary for cutting speed rate 9 - 80 m/min with feed rate 0,02-0,2 mm/rev [3, 4, 5]. Such a big variety of cutting conditions for drilling CFRP/metal stack could involve rapid tool wear, low quality of the hole, low productivity. Rapid tool wear of carbide drills during machining of CFRP/metal stacks can be involved by high temperature in the cutting zone. That can lead to thermal degradation of epoxy matrix, reduce hole integrity and degrade quality and accuracy of the hole. Because of it in the current research it is proposed to investigate influence of cutting temperature when drilling CFRP/metal stack with constant cutting conditions on quality and accuracy of the hole.

Experimental setup. Workpiece materials which were used for experimental study was CFRP/metal stack. The metallic plate used in the experiment was steel 1.0114 (EN 10025-2) with a thickness of 5 mm and a hardness of 140HB, tensile strength - 400 MPa, density - 7.83 g/cm³ provided from supplier. The CFRP plate was manufactured via hand layer technique of unidirectional carbon followed by vacuum forming at 35° C for 5 hours. Vacuum bag was manufactured by Airtech application such as Securlon L-500Y, AT 199 and Ultraweave 1332. Vacuum pump provided the pressure in 0,26 · 10⁻³ Pa. Epoxy resin Lorit 285 mixed with the hardener in the ratio 5:2 was used as a matrix for carbon fiber. The mass content of carbon fiber was about 60% for the total mass of the plate. The CFRP plate had a thickness of 5 mm with an average ply thickness of 0.15mm. The average diameter of the carbon fiber was 10 μm.

Uncoated drill made of WC-9% was used in this research. The drill had macro drill geometry with the outside diameter being 10 mm and the flute length being 47 mm. The shank diameter and overall length were 10 mm and 89 mm, respectively. The drills had the standard configuration with two flutes with the helix angle of 25° and a right hand spiral and cut. The drills had the double point angle of 135° with cut chisel edge 0,5 mm thickness. For measuring cutting temperature when drilling CFRP/metal stack on the flank surface of the drill there was embedded K-type (chromel - alumel) thermocouple (Fig.1).

Drilling experiments were carried out on 16B16T1 CNC lathe machine (Fig. 2) (Sumy, Ukraine). CFRP (5 mm)/ steel (5 mm) CFRP layer was laid on the top of the steel one.

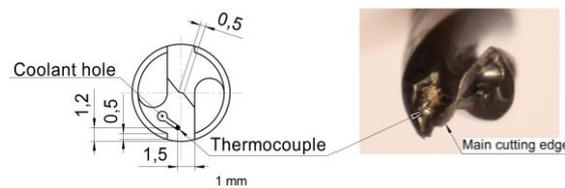


Fig. 1 – Schematic of thermocouple embedment

The chosen stack sequence of top CFRP and bottom metal is the most common material sequence for stack materials in aircraft and automobile industry. The experiment set-up (Fig. 1) consists of workpiece which was fixed in the chuck. Thermocouple which was embedded in the carbide drill was connected to temperature transducer and analog – digital converter ADC (LTR11). The measuring range of thermocouple is 0 – 1000°C measurement error to temperature transducer is 2% of the measured value. Drill was fixed in the grinded plate and clamped in dynamometer (УДМ 100) which was used for measuring axial force. Dynamometer has measurement range up to 1000 N. It was followed by signal amplifiers and the ADC (LTR212). Frequency of decartelization of measured values was 150Hz. All measuring systems were connected to personal computer.

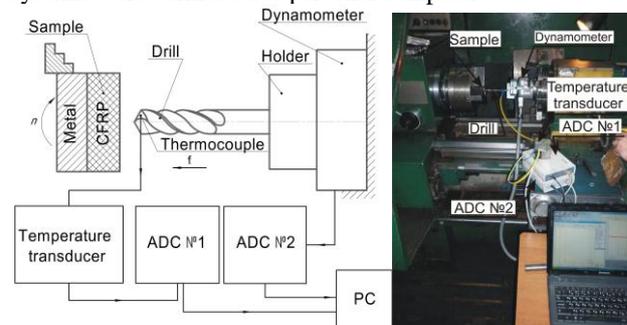


Fig. 2 – Drilling experimental set up at CNC Lathe machine 16B16T1

Drilling condition throughout the experiment was 37 m/min cutting speed and 0,02 mm/rev feed.

In the framework of this research several measurement techniques were used. Measurement of drill flank wear was implemented on optical microscope MБC-9 (Fig. 3).

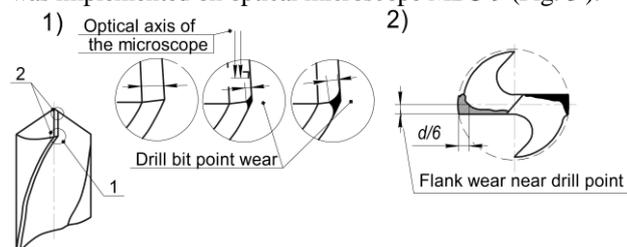


Fig.3 – Schematic of measuring flank wear of the drill on instrumental microscope

As a criterions for quality rating in CFRP plate was delamination factor (Equ.1), thermal degradation and fiber pull out absence which was measured on optical microscope KAPA 9000 with accuracy to 1 μm, surface roughness (Ra)-MitutoyoSurftest SJ 400 (Presov, Slovakia). In steel layer a criterions for quality are surface roughness and holes' accuracy. Accuracy of holes in both plates was measured with CNC coordinate measuring machine Thome Precision accurate within 2 μm.(Presov, Slovakia) (Fig. 4).

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (1)$$

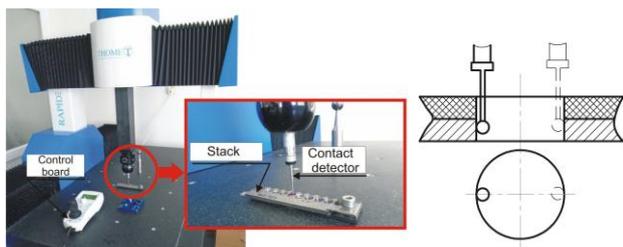


Fig. 4 – Schematic of measuring hole accuracy

Experimental results. During the experiment 49 holes were manufactured in CFRP/ steel stack, and eight check points of axial force and cutting temperature were determined (Fig.5, Fig. 6). It was found that drilling for stack can be characterized by six steps in dependence chisel edge position in the stack.

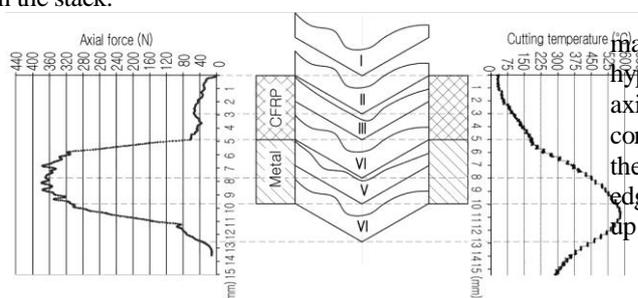


Fig. 5 – Axial force and cutting temperature during the 17th hole machining with WC drill bit ($V = 37$ m/min, $f = 0,02$ mm/rev)

It was established that tool wear influence cutting temperature and axial force. Comparison of experimental results of drilling holes 17 and 37 uncover cutting temperature trend to grow in the transition layer as well as in each stack material. Thus cutting temperature increased by 10 % in CFRP and 27% in the metal. However, the axial force increased by 43 % during drilling CFRP and 5% in the metal. Mechanical properties of CFRP are characterized by high plasticity and low hardness. This, along with low temperature degradation of CFRP and closeness of the cutting zone creates favorable conditions for setting CFRP particles on the rake surface of the drill and the build-up formation during drilling. In certain conditions, it can limit heat transfer in the tool. As build-up increase the heat flow in the tool is weakening, which is accompanied by a decrease of cutting temperature. After built-up separation the obstacle for heat flow disappear, that contributes to heat dissipation in the tool (Fig. 6), and leads to cycle changes of cutting temperature.

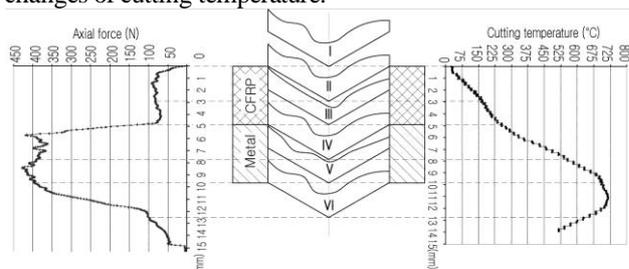


Fig. 6 – Axial force and cutting temperature during the 37th hole machining with WC drill bit ($V = 37$ m/min, $f = 0,02$ mm/rev)

Progress of flank wear was accompanied with raise of axial force when drilling CFRP and reduction during steel plate drilling (Fig. 7). That is owing to higher sensibility of CFRP to chisel edge wear in comparison with steel.

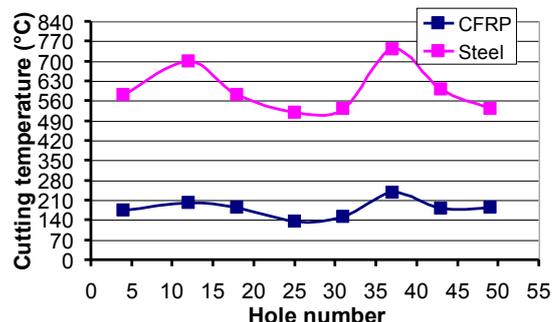


Fig. 7 – Cutting temperature vs number of holes drilled in CFRP/ steel stack

However, some axial force variation is effected by main cutting edge build-up. This effect is consistent with the hypothesis of build-up influence on the cutting edge and axial forces growth. Built-up increase rake angle that change conditions of chip formation in the cutting zone. Therefore, the stagnant zone, which was formed around the cutting edge, accompanied axial force reduction. The CFRP build-up was removed by hard steel chip from the rake surface.

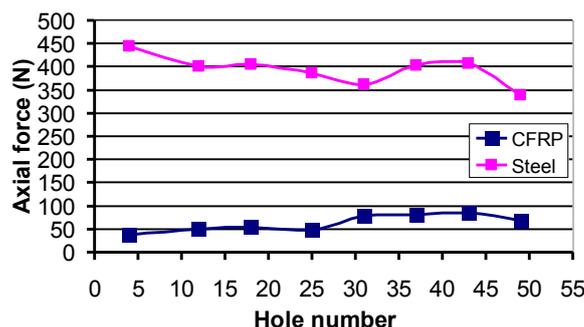


Fig. 8 – Axial force change during CFRP/steel stack drilling

Hole accuracy is much effected by cutting temperature and axial force. Built -up formation creates unfavorable conditions for chip formation and heat transfer. In such circumstances the hole accuracy decrease in CFRP part faster than in metallic one (Fig.9). Rapid reduction of hole accuracy is connected with drill bit point wear and it effects more in CFRP than in steel because fiber are cracked but not cut. It is one more reason to observe uncut fibers in CFRP (Fig. 12)

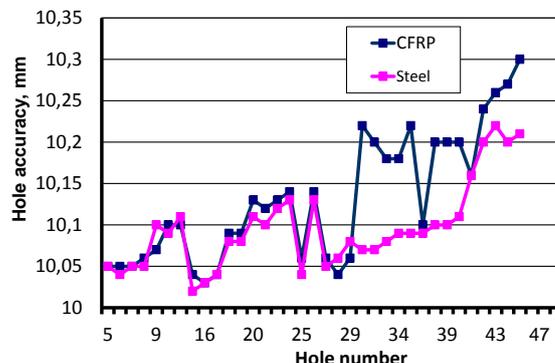


Fig 9 – Hole accuracy of CFRP/Steel per layer

Surface roughness increase due to growth number of uncut fiber (Fig.10). It can be concluded that CFRP are more sensible to drill wear than metallic materials.

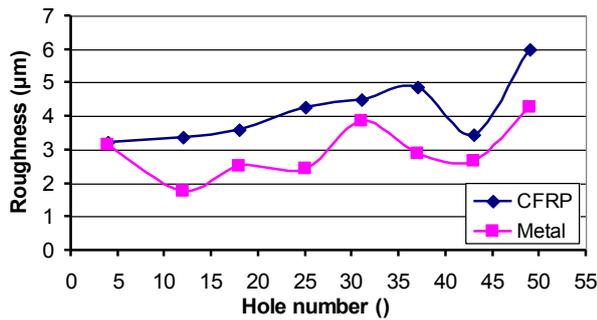


Fig. 10 - Hole roughness in CFRP and Steel part

Rapid increase of delaminated is closely connected with intensive chipping of cutting edge and point rounding (Fig. 11).

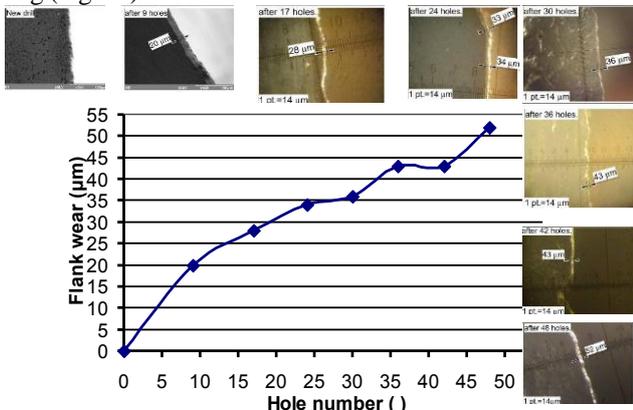


Fig. 11 – Progress of flank wear during CFRP/steel stack machining

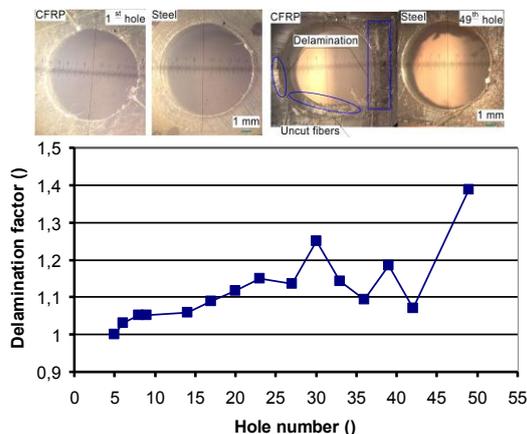


Fig. 12 – Progress of delamination when drilling stack

Conclusions. Drill bit motion in CFRP/Steel stack was characterized by six steps according to its position in hole during machining. The lowest values of cutting temperature as well as axial forces during machining CFRP with new drill was 174° C and 40 N respectively. At the same time during drilling metal axial force was 430 N and the temperature of 580 °C. Chisel edge contact with metal layer provoke rapid growth of axial force to its maximum, while cutting temperature increased as far as main cutting edge entered in material.

Simultaneous machining of CFRP and Steel provokes a rapid rise of cutting temperature in the cutting zone in comparison with the drilling CFRP only. Thus, during CFRP drilling cutting temperature rise at 8,9°C/s, while during simultaneous CFRP/ Steel cutting - 31,7°C/s.

When drilling CFRP/ Steel stack the hole accuracy reduce to 250 µm while in steel only on 150 µm due to abrasive bulk effects of rough metallic chip.

Surface roughness in CFRP changed from 3 to 6 µm, and in steel from 3 to 4.2 µm. It proves that CFRP is more sensible to drill bit point wear.

Delamination of upper layers of 49th hole growth at 30% in cooperation to 1st one.

Acknowledgment. The authors appreciate the financial support of Slovak Academic Information Agency in the framework of National Scholarship Program and also, Airttech Company and Ecolan Ingredients LLC for raw material supply.

References : 1. Jennise T.T, *Gravity Effects of Curing Angle on Laminated Composite Structures: A Review on Novel Study* Yuhazri M. Y., Sihombing H., Yahaya S. H., Nirmal U., and Megat Ahmad M. M. H. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013. – vol. 2013 , P. 1-10. Print. 2. Boldt J. A. *Solid-tool machining and drilling* : Handbook J. A. Boldt, J. P. Chanani *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, 1987 - P. 667- 672. Print. 3. Xin W., *Comparative Tool Wear Study Based on Drilling Experiments on CFRP Ti stack and its Individual Layers* W. Xin, Y. K. Parick, S. Caleb et al. *Wear*- Elsevier, 2014.- Vol. 317, P. 265-276. Print. 4. Poutord A., *Local approach of wear in drilling Ti6Al4V CFRP for stack modelling* Poutord A., Rossi F., Poulachon G., M'Saoubi R. *Procedia CIRP* 8.- Elsevier, 2013.- P. 316-321. Print. 5. Pecat O., *Low Damage Drilling of CFRP Titanium Compound Materials for Fastening* O. Pecat, E. Brinksmeier *Procedia CIRP* 13. - 2014.- P. 1-7. Print. 6. Crisan L.A., *Influence of Tool Geometry and Process Temperature on Hole Quality When Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics* Crisan L.A., Pop G.M. 11th International Symposium on Measurement and Quality Control, 2013. Print. 7. Sheikh-Ahmad J. Y., *Experimental and numerical method for determining temperature distribution in a wood cutting tool* Sheikh-Ahmad J. Y., Lewandowski C. M., Bailey J. A., Stewart J. S. *Experimental Heat Transfer*. – 2003. -Vol. 16. - P. 55-271. Print.

Поступила (received) 25.03.2015

Колесник Виталий Александрович – м.н.с. кафедры технологии машиностроения, станков и инструментов Сумский государственный университет, тел. (050) 40-64-232, e-mail: kol-vitaliy@ ukr.net.
Заец Йозеф – канд. техн. наук, декан Факультета производственных технологий, Кошецкий технический университет, Прешов, Словакия
Радченко Светлана - аспирант кафедры производственных технологий, Кошецкий технический университет, Прешов, Словакия
Адамян Марина Артуровна – магистрант, Сумский государственный университет

ІМІТАЦІЯ ПОВЕДІНКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Імітаційне моделювання виконувалося для автоматичної лінії, що містить три одиниці технологічного обладнання та обслуговується конвеєрною системою і роботами-маніпуляторами. Імітаційне моделювання має на увазі порівняння технологічних структур, в якості мети ставилося підвищення ступеня використання обладнання, враховувалося узгодження роботи ланок автоматичної лінії, поява і усунення відмов обладнання.

Ключові слова: мережі Петрі, імітаційне моделювання, деталь, мітка, алгоритм, керувані переходи, інгібіторні дуги, жвавість мережі Петрі.

Введення. Відображення взаємодії елементів системи в часі і в просторі у вигляді руху маркерів через позиції і переходи мережі Петрі відкриває можливість ставити і вирішувати нові завдання проектування та модернізації систем.

Аналіз останніх досліджень і літератури. З огляду останніх робіт слідє [1,2,4], що питанням імітаційного моделювання приділяється велика увага. При виборі засобу імітаційного моделювання керуються рядом вимог, таких як можливість перевірки роботоспроможності, відображення коректного формування та взаємодії паралельних потоків, можливість відстеження тупикових ситуацій, можливість перевірки коректності реалізації завдання в паралельному алгоритмі. Такі завдання виникають при моделюванні логістичних завдань, завдань щодо ефективного розміщення, завдань щодо оптимального використання виробничих ресурсів і багатьох подібних завдань.

Метою даної статті є розгляд питань оптимального використання виробничих ресурсів при здійсненні складних технологічних процесів.

Постановка проблеми. При формулюванні завдання про ефективне використання виробничих ресурсів важливо задати обмеження, що накладаються внутрішніми і зовнішніми обставинами, а також початкові ресурси та їх розподіл. Критерієм оптимальності є максимізація продуктивності, підвищення ступеня використання обладнання при мінімізації часу обробки і задіяних виробничих ресурсів. При вирішенні задачі повинні бути враховані особливості оброблюваних деталей, технологічні можливості верстатів і передбачені алгоритми мінімізації виробничих ресурсів.

Імітаційне моделювання проводиться в наступній послідовності:

- Опис технологічного процесу;
- Розрахунок часу виконання технологічних операцій;
- Формування логічних умов процесу;
- Складання мережі Петрі;

- Заповнення форм імітатора для матриць інцидентів і інгібіторних дуг, векторів початкової маркування, тимчасових затримок і пріоритетів переходів;

- Завдання часу і кроку імітації;

- Пуск імітаційного моделювання процесу для вихідних даних;

- Отримання матриці поточної маркування та оцінка часу руху маркерів;

- Проведення імітаційних експериментів шляхом зміни структури і параметрів моделі;

- Побудова залежностей технологічних показників від структури і параметрів системи.

Для синтезу варіантів технологічної структури елементи системи з'єднують технологічними (узгодження технологічних процесів одиниць обладнання), кінематичними (об'єднання одиниць обладнання), конструктивними (виконання одним пристроєм функцій різних одиниць обладнання) і керуючими (блокування команд управління) зв'язками. Імітаційне моделювання застосовувалося для порівняння варіантів по мінімуму питомої трудомісткості і тривалості робочого циклу при обмеженнях на час виконання i -ю одиницею обладнання j -ї операції і вартістю обладнання ΣC_i .

Одним із завдань є підвищення ступеня використання обладнання. Імітаційні експерименти проводяться з метою скорочення простоїв автономних одиниць обладнання в технологічному процесі. Безліч позицій мережі розбивають на S підмножин по числу одиниць обладнання. Для i -ї одиниці обладнання оцінюється коефіцієнт її використання в часі.

У мережі Петрі (рис.1) P_1, P_2, P_3 - обробка на технологічних системах; P_4 - робота накопичувача заготовок; P_5, P_6, P_7, P_8, P_9 - здійснення вантажно-розвантажувальних операцій роботами-маніпуляторами; P_{10} - конвеєрна система; P_{11}, P_{12}, P_{13} - робота проміжних накопичувачів (складів); P_{14} - робота накопичувача готових деталей.

Важливим питанням є узгодження роботи ланок автоматичної лінії.

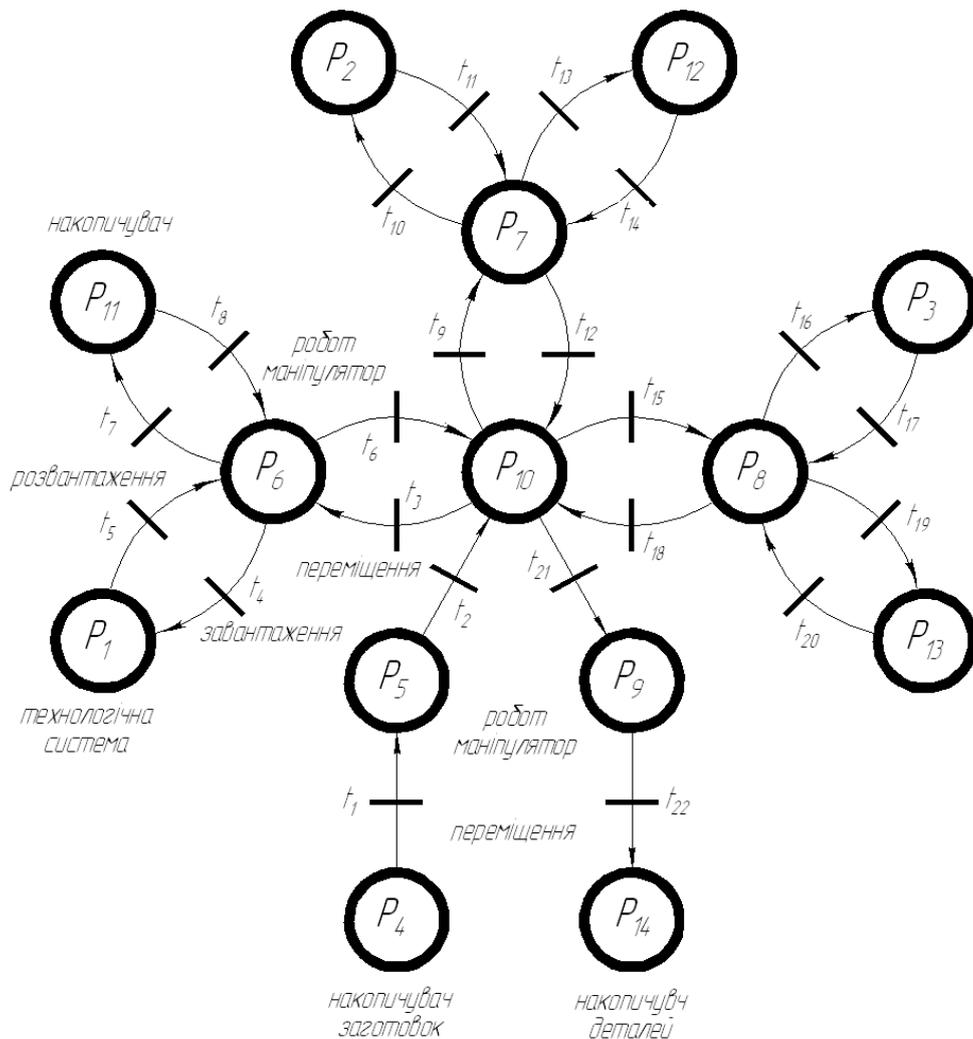


Рис.1 – Модель керування автоматичною лінією, що містить три одиниці технологічного обладнання

Розбіжність в продуктивності технологічних систем призводить до накопичення обсягів незавершеного виробництва. Визначення місць затримки маркерів перед позиціями дозволить змінювати продуктивність ділянок автоматичної лінії так, щоб між ними були відсутні проміжні склади (проміжні накопичувачі). В автоматичній лінії, що містить три технологічні системи, всі операції завантаження і розвантаження здійснюються п'ятьма роботами маніпуляторами, обслуговуючими конвеєрну систему. Виникає необхідність узгодження швидкості переміщення конвеєрної системи і часу технологічної операції на кожній з технологічних систем. Імітаційна модель розроблена у вигляді мережі Петрі з 14 позиціями і 22 переходами. В результаті імітаційних експериментів обрані співвідношення часу обробки і швидкості переміщення конвеєрної системи.

Відмова елемента автоматичної лінії є випадковою подією, а його усунення триває протягом випадкового часу. В перехід між позиціями початку P1 і закінчення P2 операції вводять інгібіторну дугу, що закриває рух маркерів на час появи та усунення відмови (рис.2).

У нормальному режимі маркери рухаються від позиції P1 до позиції P2 через перехід t1. Середнє число відмов генерується датчиком випадкових чисел ДВЧ. При цьому в позиціях P3, P4 з'являється N маркерів і перехід t1 закривається інгібіторною дугою. Одночасно маркер з позиції P5 переходить в позицію P6 усунення відмов і затримується в ній на випадковий час Z усунення відмови. Після усунення відмови маркер переходить в позицію P5 і перехід t2 відкривається для усунення наступної відмови. Усунення N відмов призводить до відкриття переходу t2 і продовження роботи.

Імітація відмов можлива також шляхом введення пріоритетів переходів (рис.3).

У нормальному режимі маркери рухаються від позиції P1 до позиції P2 через перехід t1. Відмови елементів імітуються випадковою появою N маркерів у позиції P3. Оскільки пріоритет переходу t3 вище пріоритету t1, то маркери з позиції P1 починають рухатися через позицію P4. Вони затримуються в ній на випадковий час Z усунення відмови, а потім переходять в позицію P2 нормальної роботи.

При проведенні імітаційних експериментів задають появу відмови і час її усунення, після чого визначають середній час проходження маркерів для

ряду експериментів з середніми значеннями часу невідкладної роботи і часу усунення відмови.

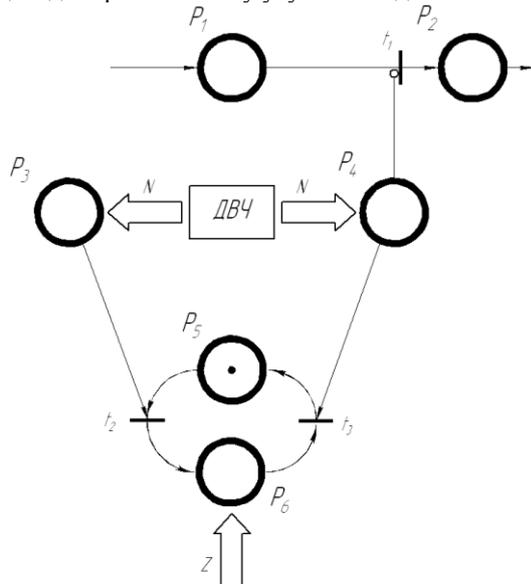


Рис.2 – Імітація появи та усунення відмов шляхом введення інгібіторної дуги.

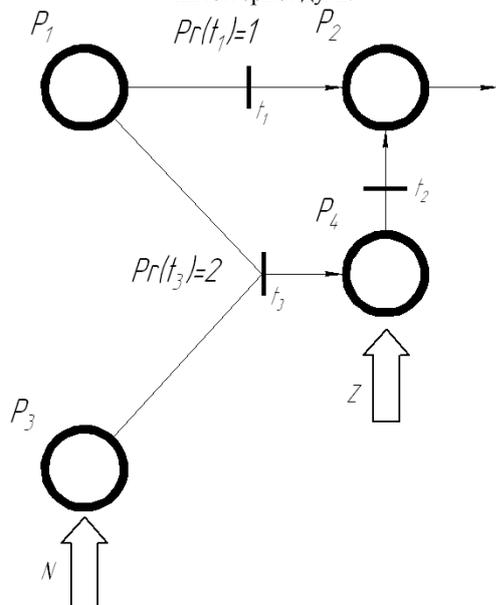


Рис.3 – Імітація появи та усунення відмов шляхом введення пріоритетів переходів.

Потім порівнюють час проходження маркерів до і після відмов.

Завдання керування в нормальних і аварійних ситуаціях полягає в забезпеченні керування при повному безлічі технологічних ситуацій. Мережу Петрі перевіряють на жвавість – можливість проходження маркерів по мережі без заходу в тупики. Побудова графа досяжності мережі дозволяє перерахувати безліч технологічних ситуацій, які розпізнаються системою керування.

Застосування імітаційного моделювання для вибору проектного рішення.

При проектуванні імітаційне моделювання може бути застосоване як з метою вибору проектного рішення, так і з метою перевірки обраного проектного рішення.

При виборі проектного рішення складається план імітаційних експериментів, в якому входом моделі є різні проектні рішення, а виходом - показники роботи об'єкта моделювання, відповідні технічному завданню. Мета експериментів - виявити залежності показників функціонування моделі від її структури і параметрів. Результати імітаційних експериментів інтерпретують як зв'язок показників системи з її структурою та параметрами. В результаті вибирають проектні рішення, які найкраще задовольняють вимогам технічного завдання.

Для перевірки проектного рішення імітують поведінку системи з перевіряємим рішенням і оцінюють ступінь досягнення і вимог технічного завдання. Проектувальник вводить у вікна мнемосхеми технологічного процесу умови роботи і характеристики обраних одиниць обладнання. Після їх перетворення в мережу Петрі і введення в імітатор з'являються дані про тривалість процесу обробки на автоматичній лінії.

Висновки

Імітація взаємодії одиниць обладнання у вигляді мережі Петрі дозволяє вибрати структуру складної технологічної системи, узгодити роботу одиниць обладнання, виявити «вузькі місця» в роботі одиниць технологічного обладнання автоматичної лінії, визначити ємності проміжних накопичувачів, оцінити рівень відмовостійкості системи, визначити вплив часу переналадження обладнання на продуктивність системи.

Список літератури: 1. Мурата Т. Сети Петри: свойства, анализ и приложения. // Тр. ТИИЭР, пер. с англ. Т. 77 No4. 1989. С.41-79. 2. Moore K., Chiang J. ALPHA/Sim Simulation Software Tutorial // Proc. Of the 1999 Winter Simulation Conference. USA: Phoenix. P. 621–625. 3. Konyukh V., Davidenko V. Petri Nets as a Tool for Mine Simulation // Mineral Resources Engineering. 1999. Vol. 8. No 4. P. 361–371. 4. Конюх В.Л. Компьютерное моделирование динамики горных работ // Горный журнал. Изв. Вузов. 2002. No6. С. 16-24. 5. Кузьмук В.В. Модифицированные сети Петри и устройства моделирования параллельных процессов // В.В. Кузьмук, О.О. Супруненко : Монография. - Киев: Маклаут, 2010. -252с.

Bibliography (transliterated): 1. Murata T. *Seti Petri: svojstva, analiz i prilozhenija* Tr. ТИИЭР, per. S angl. Т. 77 No4. 1989. pp.41-79. Print. 2. Moore K., Chiang J. *ALPHA/Sim Simulation Software Tutorial* Proc. Of the 1999 Winter Simulation Conference. USA: Phoenix. pp. 621–625. Print. 3. Konyukh V., Davidenko V. *Petri Nets as a Tool for Mine Simulation* Mineral Resources Engineering. 1999. Vol. 8. No 4. pp. 361–371. Print. 4. Konjuh V.L. *Kompjuterное modelirovanije dinamiki gornih rabot* Gornij gurnal. Izv. Vuzov. 2002. No6. pp. 16-24. Print. 5. Kuzmuk V.V. *Modificirovannye seti Petri i ustrojstva modelirovaniya paralelnyh processov* V.V. Kuzmuk, O.O. Suprunenko : Monografiya. – Kiev: Maklout. 2010. -252p. Print.

Поступила (received) 26.03.2015

Приходько Ольга Юріївна – канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru;

Сліпченко Сергій Євгенович – ст. викл. НТУ «ХПІ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: serg.slip@gmail.com.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННЕЙ РЕЗЬБЫ МЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

В статье предложена методика определения рекомендуемых областей применения способа обработки различных типов внутренних резьб (метрической, дюймовой, трапецеидальной, упорной, круглой) мерным инструментом на фрезерных станках с ЧПУ. Проведено исследование по определению величины максимального отклонения в осевом сечении резьбы, а также установлены зависимости величины максимального отклонения от основных параметров профиля резьбы. Определен параметр профиля резьбы, который оказывает наибольшее влияние на величину максимального отклонения.

Ключевые слова: внутренняя резьба, мерный инструмент, максимальное отклонение, профиль резьбы, механическая обработка.

Введение. Известные способы обработки внутренней резьбы отличаются методом формообразования винтовой линии, типом используемого оборудования и инструмента, но большинство способов основано на методе копирования, при котором профиль инструмента соответствует профилю обрабатываемой резьбы. Способы, которые позволяют производить обработку за один рабочий ход, требуют использования специального дорогостоящего оборудования и инструмента.

Анализ последних исследований и литературы. Способ нарезания резьбовыми резцами является наиболее универсальным и позволяет обрабатывать внутренние резьбы на универсальном оборудовании и на оборудовании с ЧПУ при помощи резьбовых резцов [2-5]. Профиль получаемой резьбы соответствует профилю режущей кромки инструмента. Данный способ используется преимущественно в единичном или мелкосерийном производстве, но универсальность метода позволяет применять его и в крупносерийном типе производства при невозможности применения другого, более производительного метода [1]. При увеличении шага трудоемкость способа резко увеличивается. Внутренние резьбы определенного типа могут быть обработаны резьбовым резцом с соответствующим профилем режущей части. При обработке резьбовыми резцами значительно увеличивается основное время нарезания резьбы за счет съема припуска за несколько проходов [2-5]. Способ позволяет обрабатывать одно- и многозаходные резьбы, что не позволяет больше ни один из способов.

Способ формообразования резьбы гребенчатыми резьбовыми фрезами применяется для обработки внутренней резьбы, как правило, за один проход. При этом заготовка вращается вокруг своей оси, а инструмент поступательно движется и вращается вокруг своей оси [3]. Профиль режущей части инструмента соответствует профилю нарезаемой резьбы. Обработка резьбы производится стандартным профильным инструментом – гребенчатой

резьбовой фрезой с определенной длиной режущей части и определенным шагом на специальных резьбофрезерных станках, что является ограничивающим фактором для распространения на мелких предприятиях [1].

С увеличением шага обрабатываемой резьбы увеличиваются силы резания и вибрации, что приводит к ухудшению качественных показателей резьбовых поверхностей и к необходимости увеличения количества проходов. Качественные показатели обработки резьбовой поверхности данным методом ниже, чем у метода нарезания резьбы резцами [1].

Способ формообразования резьбы профильными дисковыми фрезами применяется для обработки внутренней резьбы большой длины и шага, как правило, за один проход. При этом заготовка вращается вокруг своей оси, создавая движение круговой подачи, а инструмент движется поступательно и вращается вокруг своей оси со скоростью главного движения резания. Установка инструмента производится под углом к оси заготовки, равным углу подъема винтовой линии нарезаемой резьбы. [1-4].

Обработка резьбы данным способом производится на резьбофрезерных станках с применением стандартного или специального профильного инструмента. Один инструмент может быть использован для обработки внутренней резьбы разной длины и шага. Ограничение в применении способа составляет размер отверстия в заготовке. Данный способ применяется в среднесерийном, крупносерийном и массовом типах производства. Качественные показатели обработки резьбы ниже, чем у метода нарезания резцами.

Способ нарезания резьбы самооткрывающимися винторезными головками применяется для обработки внутренней резьбы, как правило, за один проход в крупносерийном и массовом типах производства. Обработка данным методом производится на специальных станках-автоматах [1-4]. В процес-

се обработки заготовка медленно вращается вокруг своей оси, инструмент поступательно движется и вращается вокруг своей оси со скоростью главного движения резания. В конце процесса нарезания резьбы головки сходятся, что позволяет быстро вывести режущий инструмент из отверстия заготовки.

При нарезании внутренней резьбы данным способом используется профильный инструмент [1-4]. Точность резьбы зависит от точности изготовления режущих элементов инструмента и кинематической точности оборудования. Показатели качества резьбы, обработанной винторезными головками, очень высокие, но из-за сложностей перенстройки на другой типоразмер резьбы данный способ имеет низкую степень универсальности.

Способ формообразования резьбы вихревыми головками характеризуется высокой производительностью, что объясняется его применением в крупносерийном и массовом типах производства. При нарезании резьбы данным способом также используется профильный инструмент.

Обработка резьбы осуществляется за один проход, при этом настройкой резцов в вихревой головке достигается равномерное распределение припуска на каждый резец, что существенно снижает силы резания [1, 4]. Показатели качества резьбы, обработанной вихревыми головками, очень высокие, как и у метода нарезания резьбовыми резцами, но данный метод имеет низкую степень универсальности.

Для повышения универсальности и производительности процесса обработки резьбы необходима разработка нового способа, который бы сочетал универсальность способа нарезания резьбы резьбовыми резцами и производительность способа формообразования резьбы вихревыми головками.

Новый способ фрезерования внутренней резьбы (с профилем ISO 10208 и DIN 20317) позволяет существенно сократить основное время на обработку путем съема припуска за один рабочий ход [6].

Обработка осуществляется на фрезерном станке с ЧПУ за счет использования мерной фрезы со стандартными режущими пластинами и специальной траектории движения формообразующей точки резьбы (рис. 1). Режущие пластины равномерно распределены по периферии фрезы и установлены симметрично относительно плоскости, перпендикулярной оси фрезы, и с углом при вершине равным $35^\circ \div 90^\circ$. Величина шага спирали по оси равна шагу резьбы p , а диаметр кругового движения равен сумме высоты профиля резьбы H_1 и допуска T_{H_1} на высоту профиля. После обработки резьбы мерная фреза выводится из отверстия на ускоренной подаче по обратной траектории.

Фрезерование внутренней резьбы мерным инструментом позволяет сократить основное время на изготовление резьбы и снизить вибрации, что существенно увеличивает производительность обработки внутренних резьб. Качественные показатели обработки (точность размеров и шероховатость поверхности) выше, чем при обработке резьбовыми резцами.

Ограничением применения нового способа является величина угла профиля обрабатываемой резьбы, а именно отсутствие стандартных режущих пластин с углом при вершине менее 35° , а также большой диаметр обрабатываемых резьб, что требует изготовление массивных инструментов и наличия оборудования большой мощности.

Целью данной статьи является определение области возможного применения способа нарезания внутренней резьбы мерным инструментом на фрезерных станках с ЧПУ.

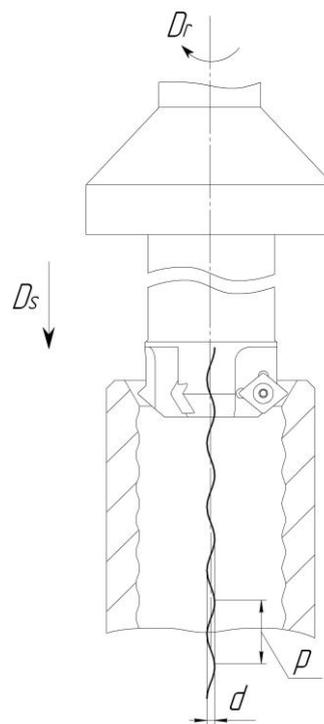


Рис. 1 – Схема процесса фрезерования круглой внутренней резьбы

Постановка проблемы. Известные способы обработки внутренних резьб предполагают нарезание резьбы за несколько проходов специальным дорогостоящим инструментом, что увеличивает основное время обработки. Применение мерного инструмента со стандартными режущими пластинами позволяет уменьшить основное время путем обработки резьбы за один рабочий ход инструмента и снизить стоимость инструмента.

Материалы исследований. Для выявления области возможного применения способа фрезерования внутренних резьб мерным инструментом на фрезерных станках с ЧПУ были рассмотрены наиболее распространенные стандартные типы резьб (метрическая, дюймовая, трапецеидальная, упорная, круглая).

В программе КОМПАС 3D были построены 3D-модели внутренних резьб в отверстии детали согласно размерам по соответствующим стандартам. Путем автоматизированного создания проекции детали из 3D-модели были получены профили резьб в осевом сечении (рис. 2). Этот полученный

профиль представляет собой замкнутый контур, состоящий из совокупности кривых 2-го и 4-го порядков. Кривые 2-го порядка являются частями окружностей, диаметр которых равен диаметру впадин внутренней резьбы, а кривые 4-го порядка – проекции частей витка резьбы в осевом сечении детали.

Полученный профиль в осевом сечении является достаточно сложным и трудоемким для получения, требующий использования специального инструмента, оборудования и сложной управляющей программы. Причем кривые 4-го порядка будут разбиваться на множество элементарных кривых 2-го и 1-го порядков, движение вдоль которых может быть запрограммировано. Причем для возможности создания управляющей программы кривые 4-го порядка будут разбиваться на множество элементарных кривых 2-го и 1-го порядков.

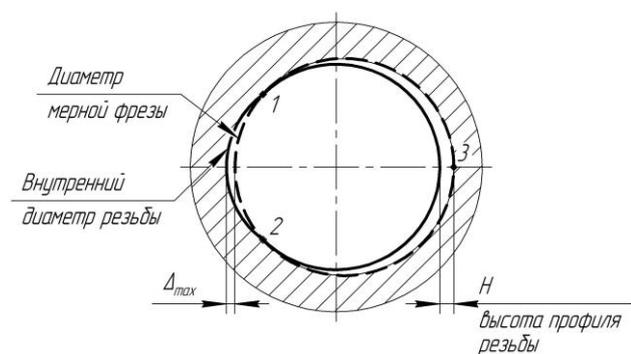


Рис. 2 – Схематический профиль резьбы в осевом сечении детали

Мерная фреза для обработки внутренней резьбы представляет собой инструмент постоянного диаметра, который при вращении вокруг своей оси и движении по спиральной траектории [6] в конкретный момент времени образует окружность, диаметр которой равен диаметру фрезы (без учета погрешностей, возникающих в процессе резания). Для упрощения управляющей программы (УП) необходимо определить окружность, максимально приближенную к требуемому профилю резьбы в осевом сечении, которая будет образовываться при вращении фрезы в конкретный момент времени.

Максимально приближенная окружность при этом и будет являться номинальным диаметром мерной фрезы. Построение диаметра окружности мерной фрезы производится по базовым точкам (рис. 2), которые находятся в местах пересечения проекции осевого сечения вершины с осевым сечением впадины резьбы (точки 1, 2) и точке 3, максимально отдаленной от оси резьбы, находящейся на максимальном диаметре впадины резьбы.

В результате построения обнаруживается несопадение максимально приближенной окружности и осевого сечения резьбы, которое возможно определить максимальным расстоянием (отклонением) между осевым сечением профиля и диаметром мерной фрезы. Максимальное расстояние между требуемым осевым сечением профиля резьбы и

проведенным диаметром мерной фрезы является отклонением Δ_{max} , которое будет являться основным критерием влияния на точность изготовления резьбы.

Максимальное отклонение Δ_{max} является основным критерием влияния на точность изготовления резьбы, а именно - его величина не должна превышать допускаемого отклонения среднего диаметра согласно стандарту.

Обработка резьбы конкретного типоразмера возможна, если максимальная величина отклонения диаметра мерной фрезы от требуемого профиля резьбы меньше допускаемого отклонения диаметра резьбы по стандарту:

$$\Delta_{max} < T_{D2}$$

Если условие не выполняется, то данный способ обработки для конкретной резьбы неприемлем. Алгебраическая разница между допуском на изготовление резьбы и величиной максимального отклонения, является резервом для назначения допуска на изготовление мерной фрезы.

Результаты исследований. Для выявления области возможного применения способа фрезерования внутренних резьб мерным инструментом на фрезерных станках с ЧПУ были рассмотрены метрическая, дюймовая, трапецеидальная, упорная и круглая резьбы.

Как правило, для конкретного типоразмера резьбы, существует основной шаг (крупный) и множество «мелких» шагов, которые всегда меньше основного, что в свою очередь, влияет на величину максимального отклонения Δ_{max} . Поэтому необходимо выявить зависимость величины максимального отклонения Δ_{max} при постоянном диаметре и разных шагах резьбы, а также при постоянном шаге и разных диаметрах, чтобы определить какой параметр профиля оказывает наибольшее влияние на величину отклонения Δ_{max} .

Параметры профиля резьбы могут иметь значения, не зависящие друг от друга, но находящиеся в пределах установленных соответствующими стандартами, что при определении диапазонов типоразмеров резьб и выдаче соответствующих рекомендаций по применению нового способа требует установления степени влияния каждого параметра на величину максимального отклонения. Метрическая резьба (профиль и отклонения согласно ГОСТ 9150-81, ГОСТ 24705-81, ГОСТ 8724-81).

Для определения области применения способа обработки мерным инструментом были рассмотрены метрические резьбы различных типоразмеров класса точности 7, получены их осевые сечения и измерены максимальные отклонения Δ_{max} для каждого из типоразмеров. По результатам построений была установлена зависимость отклонения Δ_{max} от типоразмеров метрической резьбы (рис. 3), по которой можно определить область применения нового способа для ее обработки.

Если величина отклонения Δ_{max} не превышает допуск T_{D2} , то данный типоразмер резьбы возможно

обработать мерной фрезой. На рисунке 4 указана область применения способа фрезерования внутренних резьб мерным инструментом.

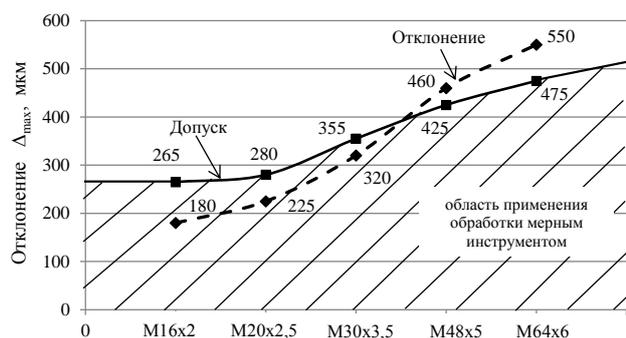


Рис. 3 – Влияние параметров резьбы на максимальное отклонение при обработке метрической резьбы

Для определения зависимости отклонения Δ_{max} от диаметра резьбы D были рассмотрены профили резьб при постоянной величине шага p для нескольких диаметральных диапазонов.

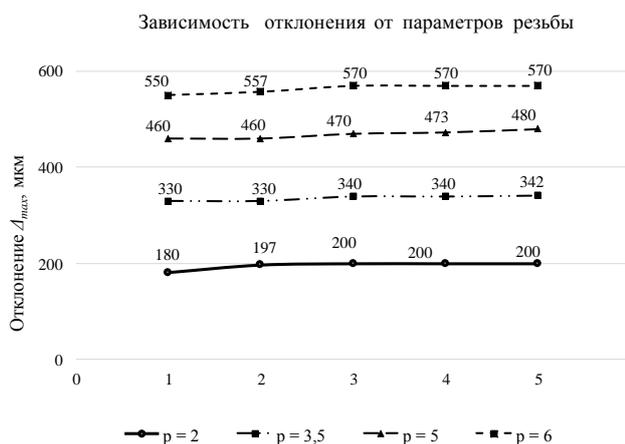


Рис. 4 – Зависимость величины отклонения Δ_{max} от диаметра резьбы D и шага p

Исходя из полученных значений величины максимального отклонения установлено, диаметр метрической резьбы D не влияет на величину отклонения Δ_{max} , т.е. резьба M16x2 и M250x2 имеют практически одинаковые отклонения и их возможно обработать мерным инструментом, а M48x5 обработать невозможно, потому что отклонение больше допустимого. Кроме того, для других типов резьб диаметр также не оказывает влияние на величину отклонения. Исходя из полученных данных, область применения мерного инструмента для обработки метрической резьбы находится в диапазоне шагов $p = 2 \div 3,5$ мм. Диаметральный диапазон ограничивается лишь конструктивными размерами проектируемого мерного инструмента.

Трапецидальная резьба (профиль и отклонения согласно ГОСТ 9484-81, ГОСТ 24737-81). Для определения области применения способа обработ-

ки мерным инструментом были рассмотрены трапецидальные резьбы различных типоразмеров класса точности 7. По результатам построений была установлена зависимость отклонения Δ_{max} от типоразмеров трапецидальной резьбы (рис. 5).



Рис. 5 – Область применения мерного инструмента при обработке трапецидальной резьбы

Как и для метрической резьбы, диаметр трапецидальной резьбы практически не влияет на величину отклонения Δ_{max} . Исходя из полученных данных область применения мерного инструмента: только резьбы с шагом $p = 2$ мм.

Упорная резьба (профиль и отклонения согласно ГОСТ 10177-82). Для определения области применения способа обработки мерным инструментом были рассмотрены упорные резьбы различных типоразмеров. По результатам построений была установлена возможная область применения мерного инструмента при обработке упорной резьбы (рис. 6).

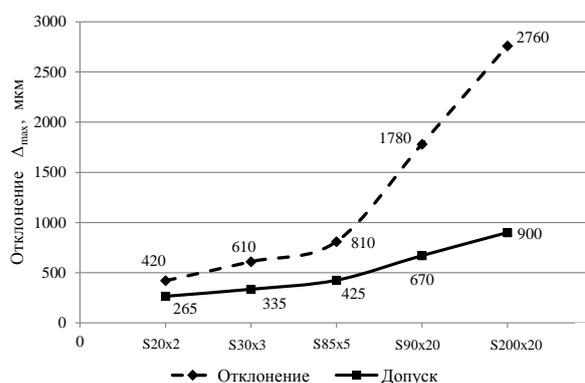


Рис. 6 – Область применения мерного инструмента при обработке упорной резьбы

Согласно данным значения Δ_{max} при всех размерах упорных резьб превышает допустимые значения T_{D2} , поэтому данный тип резьб невозможно обработать мерной фрезой.

Дюймовая резьба (профиль и отклонения согласно ГОСТ 6111-52). Для определения области применения способа обработки мерным инструментом были рассмотрены дюймовые резьбы различных типора-

змеров класса точности А. По результатам построений была установлена зависимость отклонения Δ_{\max} от типоразмеров дюймовой резьбы (рис. 7).

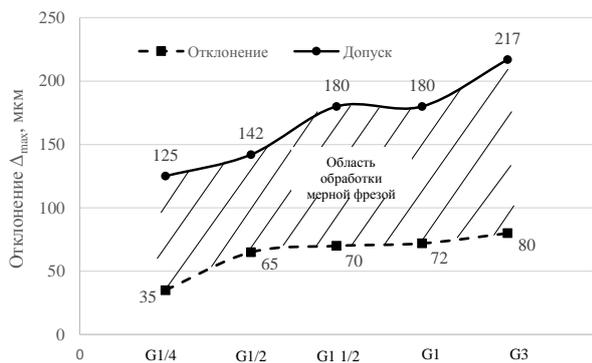


Рис. 7 – Область применения мерного инструмента при обработке дюймовой резьбы

Согласно данным значения Δ_{\max} при всех размерах дюймовых резьб не превышает допуск T_{D2} , поэтому все дюймовые резьбы возможно обрабатывать мерной фрезой.

Круглая резьба (профиль и отклонения согласно ISO 10208, DIN 20317). Для определения области применения способа обработки мерным инструментом были рассмотрены круглые резьбы с шагом $p = 12,7$ мм. По результатам построений была установлена зависимость отклонения Δ_{\max} от типоразмеров круглой резьбы (рис. 8), по которой можно определить область применения нового способа для ее обработки.

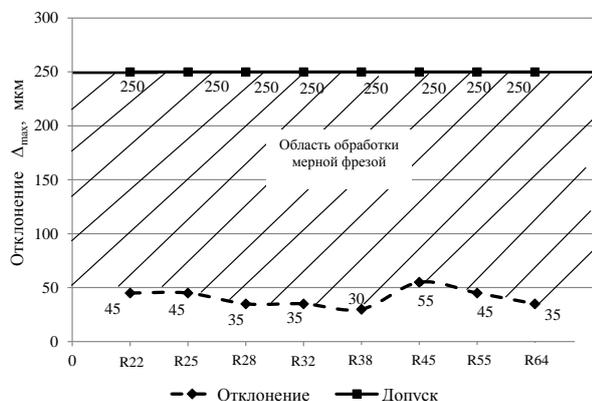


Рис. 8 – Область применения мерного инструмента при обработке круглой резьбы

Нешта Анна Александровна – аспирант кафедры технологии машиностроения, станков и инструментов Сумского государственного университета, e-mail: anna.neshta@i.ua;

Криворучко Дмитрий Владимирович – докт. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, станков и инструментов Сумского государственного университета.

Согласно данным значения Δ_{\max} при всех размерах круглых резьб не превышает допуск T_{D2} , поэтому все типоразмеры круглых резьб возможно обрабатывать мерной фрезой.

Выводы. Разработана методика для выявления области возможного применения способа фрезерования внутренних резьб мерным инструментом на фрезерных станках с ЧПУ для наиболее распространенных стандартных типов резьб (метрическая, дюймовая, трапецидальная, упорная, круглая).

Установлено, что на величину максимального отклонения наибольшее влияние оказывает шаг резьбы. С увеличением шага происходит резкое возрастание максимального отклонения. Определены рекомендуемые области возможного применения нового способа: для метрической $p = 2 \div 3,5$ мм, трапецидальной с шагом $p = 2$ мм, все дюймовые и круглые резьбы. Установлено, что упорные резьбы по ГОСТ 10177-82 не могут быть обработаны мерным инструментом, т. к. максимальное отклонение, которое теоретически возникнет при обработке, существенно превышает допуск на изготовление резьбы.

Список літератури: 1. Якухин В. Г. Изготовление резьбы / В. Г. Якухин, В. А. Ставров. – М: Машиностроение, 1989. – 192 с. 2. Ткачев А. Г. Технология машиностроения / А. Г. Ткачев, И. Н. Шубин. – Тамбов: Тамбовский государственный университет, 2009. – 164 с. 3. Жуков Э. Л. Технология машиностроения / Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, С. Л. Мурашкин. – М: Высшая школа, 2003. – 295 с. – (2). – (Производство деталей машин; т. 2). 4. Михайлов А. В. Основы проектирования технологических процессов машиностроительных производств / А. В. Михайлов, Д. А. Расторгуев, А. Г. Ширтладзе., 2010. – 336 с. – (Старый Оскол). 5. Колесов И. М. Основы технологии машиностроения / И. М. Колесов. – М: Высшая школа, 2001. – 591 с. – (3). 6. Пат. UA 103734. Спосіб обробки круглої внутрішньої різьби/ Некрасов С.С., Криворучко Д. В., Нешта А.О. МПК В23С 3/32 (2006.01), В23В 1/00. - No a201214037 заявл. 10.12.2012; 11.11.2013, бюл. No 21.

Bibliography (transliterated): 1. Jakuhin V. G., Stavrov V. A. *Izgotovlenie rez'by*, Moscow 1989. – 192 p. Print. 2. Tkachev A. G., Shubin I. N. *Tehnologija mashinostroenija*, Tambov, 2009. – 164 p. Print. 3. Zhukov Je. L., Kozar' I. I., Murashkin S. L. *Tehnologija mashinostroenija. Proizvodstvo detalej mashin*. Moscow 2003. – 295p. Print. 4. Mihajlov A. V., Rastorguev D. A., Shirladze A. G. *Osnovy proektirovaniya tehnologicheskikh processov mashinostroitel'nyh proizvodstv*, 2010. – 336 p. Print. 5. Kolesov I. M. *Osnovy tehnologii mashinostroenija*, Moscow, 2001. – 591 p. Print. 6. Nekrasov S.S., Kryvoruchko D. V., Neshta A.O. Pat.UA 103734. *Sposib obrobky kruhloyi vnutrishn'oyi riz'by*, 2013. Print.

Надійшла (received) 26.03.2015

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ЗЕРЕН

В работе получено новое теоретическое решение об определении параметров шероховатости обрабатываемой поверхности при абразивном полировании с учетом износа абразивных зерен. Установлено, что образование в процессе обработки на абразивных зернах площадок износа приводит к существенному уменьшению параметров шероховатости поверхности. Показано, что применение сферических и овализованных абразивных зерен следует рассматривать существенным фактором сглаживания микронеровностей на обрабатываемой поверхности образца в процессе абразивного полирования. Показано, что полученное решение справедливо для абразивного полирования с фиксированной скоростью радиальной подачи и с фиксированным радиальным усилием.

Ключевые слова: абразивное полирование, износ зерен, площадки износа, шероховатость поверхности

Введение. Эффективным методом финишной обработки деталей машин, обеспечивающим сглаживание микронеровностей на обрабатываемых поверхностях и получение высоких показателей шероховатости поверхности, является абразивное полирование. Однако, технологические возможности этого прогрессивного метода при обработке материалов с повышенными физико-механическими свойствами используются не в полной мере. Это затрудняет создание поверхностей деталей с высокой светоотражательной способностью, например, зеркал лазерных установок, которые изготавливаются из меди и ее сплавов, молибдена, бериллиевых и других сплавов с обеспечением высокой отражательной способности поверхностей. В связи с этим, исследование новых резервов абразивного полирования с точки зрения существенного снижения шероховатости обрабатываемых поверхностей является актуальной задачей технологии машиностроения.

Анализ последних исследований и литературы. Проблеме формообразования поверхностей и съема металла при абразивном полировании в научнотехнической литературе уделено значительно меньше внимания, чем при шлифовании. В работах [1 – 3] рассмотрены вопросы снижения шероховатости поверхности при абразивном полировании на основе анализа результатов экспериментальных исследований. Формализованная математическая теория формообразования поверхностей и съема металла при абразивном полировании в настоящее время отсутствует. Это ограничивает возможности поиска оптимальных условий обработки, позволяющих существенно уменьшить шероховатость поверхности. Поэтому актуальным является решение задачи определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании с позиции теории вероятностей с учетом реальной геометрической формы абразивных зерен, т.е. с учетом образующихся на них площадок износа.

Целью исследования является теоретическое обоснование условий существенного уменьшения шероховатости обрабатываемых поверхностей при абразивном полировании с учетом оценки влияния износа зерен на шероховатость поверхности. В связи с этим поставлена задача на основе теоретических решений, приведенных в работе [4], определить влияние на шероховатость поверхности образующихся в процессе обработки на абразивных зернах площадок износа. В работе [5] произведена такая оценка применительно к процессу шлифования. Однако процесс абразивного полирования отличается от процесса шлифования и поэтому использование полученных решений при полировании затруднено.

Материалы исследований. Для определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании использована аналитическая функция, описывающая вероятность неударенного металла с поверхности обрабатываемого образца [4], т.е. определяющая долю оставшегося на обрабатываемой поверхности металла в виде микронеровностей:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot tg \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

где 2γ – угол при вершине конусообразной части режущего зерна; n – количество абразивных зерен, участвующих в процессе резания; B – ширина образца, м; y – координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

В связи со значительным влиянием геометрической формы зерен на шероховатость обработанной поверхности, важно оценить роль образующихся в процессе обработки площадок износа на зернах на закономерности формирования шероховатости поверхности (рис 1). Для этого в зависимости (1) вместо величины y следует рассматривать величину $(x + 2 \cdot tg \gamma \cdot y)$, где x – длина площадки износа на абразивном зерне, м.

Тогда зависимость (1) опишется:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{(x + 2 \cdot tg \gamma \cdot y) \cdot n}{B}}. \quad (2)$$

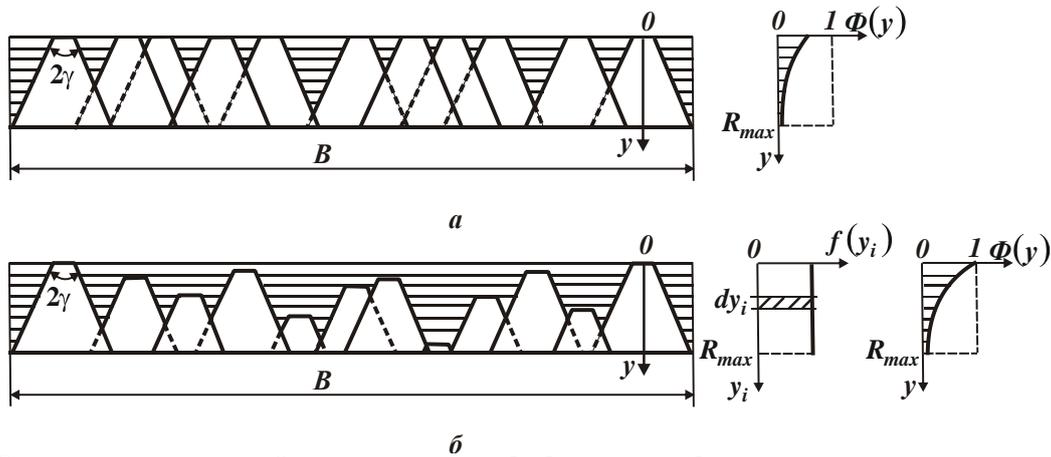


Рис. 1 – Схемы наложения проекций зерен на плоскость обрабатываемого образца: а – при скорости радиальной подачи $S_{rad}=0$; б – при скорости радиальной подачи $S_{rad}>0$

Поскольку обрабатываемый образец в радиальном направлении перемещается со скоростью радиальной подачи S_{rad} , закономерности формирования шероховатости поверхности можно описать с использованием суммарной вероятностной функции $\Phi(y)$, образованной элементарными функциями $\Phi_i(y)$, описываемыми зависимостью (2) с позиции теории вероятностей:

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = e^{-\frac{n}{B \cdot R_{max}} \int_0^y [x + 2tg\gamma \cdot (y - y_i)] dy_i} = e^{-\frac{n \cdot y}{B \cdot R_{max}} \cdot (x + tg\gamma \cdot y)}, \quad (3)$$

где $dn_i = n \cdot f(y_i) \cdot dy_i$; n – общее количество абразивных зерен, которые проконтактировали с обрабатываемым образцом за время его перемещения со скоростью S_{rad} в вертикальном направлении на величину R_{max} , равную максимальной высоте микронеровностей обрабатываемой поверхности:

$$n = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot \tau = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot \frac{R_{max}}{S_{rad}}; \quad (4)$$

k – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности инструмента, шт./м²; B – ширина образца, м; $V_{инстр}$ – скорость перемещения инструмента, м/с; $\tau = R_{max}/S_{rad}$ – время обработки, с; $f(y_i) = 1/R_{max}$ – плотность распределения высот вершин зерен, которые проконтактировали с обрабатываемым образцом и оставили на нем свои проекции.

Из условия равенства площадей F_1 и F_2 определяется положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности $y = a$ (рис. 2). Наибольшая впадина микропрофиля соответствует значению $y = 0$, а наибольший выступ микропрофиля соответствует значению $y = R_{max}$. Тогда

$$a = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \int_0^{R_{max}} e^{-\frac{n}{B \cdot R_{max}} (x + tg\gamma \cdot y^2)} \cdot dy. \quad (5)$$

Аналитически вычислить данный интеграл не представляется возможным, поэтому необходимо ис-

пользовать численные расчеты. Однако они ограничивают возможности проведения общего теоретического анализа полученного решения.

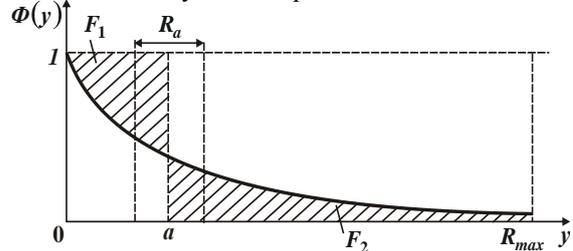


Рис. 2 – Расчетная схема параметра шероховатости поверхности R_a

В связи с этим, подинтегральную функцию следует упростить, например, с учетом того, что вследствие значительных площадок износа, образующихся на абразивных зернах, второе слагаемое будет меньше первого и им можно пренебречь. Тогда зависимости (3) и (5) примут вид:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{n \cdot x \cdot y}{B \cdot R_{max}}}; \quad (6)$$

$$a = \int_0^{R_{max}} e^{-\frac{n \cdot x \cdot y}{B \cdot R_{max}}} \cdot dy = \frac{B \cdot R_{max}}{n \cdot x} \cdot \left(1 - e^{-\frac{n \cdot x}{B}}\right). \quad (7)$$

При условии $n \cdot x > B$, что имеет место в реальном процессе абразивного полирования, второе слагаемое зависимости (7) будет меньше первого слагаемого и поэтому им можно пренебречь. Тогда зависимость (7) упрощается:

$$a = \frac{B \cdot R_{max}}{n \cdot x}. \quad (8)$$

Учитывая, что количество абразивных зерен, участвующих в процессе обработки, определяется зависимостью (4), зависимость (8) преобразуется:

$$a = \frac{S_{rad}}{k \cdot V_{инстр} \cdot x}. \quad (9)$$

параметрами: чем больше S_{rad} и меньше $k, V_{инстр}, x$, тем больше параметр a .

В случае обработки с фиксированным радиальным усилием P_y , что типично для процесса абразивного полирования, скорость радиальной подачи $S_{рад}$ определяется зависимостью [6]:

$$S_{рад} = \frac{K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр}}{\sigma \cdot F} \quad (10)$$

где $K_{рез} = P_z / P_y$ – коэффициент резания; P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; σ – условное напряжение резания, Н/м²; F – фактическая площадь контакта образца с инструментом, м².

Подставляя зависимость (10) в зависимость (9), получено:

$$a = \frac{K_{рез} \cdot P_y}{\sigma \cdot F \cdot k \cdot x} \quad (11)$$

Параметр a тем меньше, чем больше отношение $\sigma / K_{рез}$, параметры F , k , x и меньше P_y .

Параметр R_a , исходя из рис. 1, определяется зависимостью:

$$R_a = 2 \cdot F_2 = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy \quad (12)$$

Подставляя в нее зависимость (6), получено

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} e^{-\frac{n \cdot x \cdot y}{B \cdot R_{max}}} \cdot dy = \frac{2 \cdot B \cdot R_{max}}{n \cdot x} \cdot \left(e^{-\frac{n \cdot x \cdot a}{B \cdot R_{max}}} - e^{-\frac{n \cdot x}{B}} \right) \quad (13)$$

Поскольку второе слагаемое зависимости меньше первого слагаемого, то для упрощения анализа в первом приближении им можно пренебречь, тогда зависимость (13) опишется:

$$R_a = \frac{2 \cdot B \cdot R_{max}}{n \cdot x} \cdot e^{-\frac{n \cdot x \cdot a}{B \cdot R_{max}}} \quad (14)$$

С учетом зависимостей (9) и (4) имеем

$$R_a = \frac{0,735 \cdot S_{рад}}{k \cdot V_{инстр} \cdot x} \quad (15)$$

Как видно, основными условиями уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a являются уменьшение скорости радиальной подачи $S_{рад}$ и увеличение параметров k , $V_{инстр}$ и x . Поскольку пределы изменения параметров k , $V_{инстр}$ ограничены, то наибольший эффект можно достичь от увеличения длины площадки износа на абразивном зерне x .

Сравнивая зависимости (9) и (15), установлено соотношение между параметрами a и R_a :

$$R_a = 0,735 \cdot a \quad (16)$$

Результаты исследований. Как следует из зависимости (16), параметр шероховатости поверхности R_a меньше параметра a , что свидетельствует о правильности выполненных расчетов. Подставляя в зави-

симость (15) исходные данные параметров $S_{рад}$, k , $V_{инстр}$ и x , можно определить параметр шероховатости поверхности R_a . Например, для исходных данных: $S_{рад} = 0,3$ мм/мин, $k = 10$ шт./мм²; $V_{инстр} = 60$ м/мин; $x = 0,01$ мм, рассчитанное по зависимости (15) значение $R_a = 0,036$ мкм. Этим показано, что наличие площадок износа на зернах приводит к существенно уменьшению параметра шероховатости поверхности R_a , в данном случае почти в 30 раз, рассматривая исходное значение $R_a = 1$ мкм (рис. 3). Следовательно, применение сферических и овализованных абразивных зерен следует рассматривать существенным фактором сглаживания микронеровностей на обрабатываемой поверхности образца в процессе абразивного полирования.

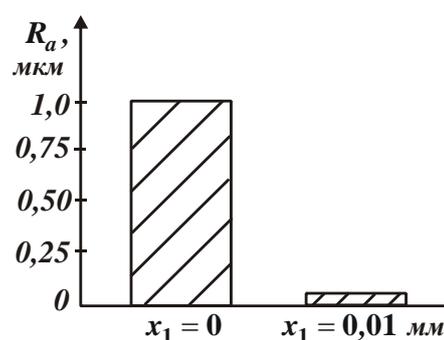


Рис. 3 – Значения параметра шероховатости поверхности R_a для $x_1 = 0$ и $x_1 = 0,01$ мм

При обработке с фиксированным радиальным усилием P_y зависимость (15) с учетом зависимости (10) примет вид:

$$R_a = \frac{0,735 \cdot K_{рез} \cdot P_y}{\sigma \cdot F \cdot k \cdot x} \quad (17)$$

В этом случае образование площадок износа на зернах приводит к уменьшению параметра шероховатости поверхности R_a по двум каналам: за счет увеличения длины площадки износа на зерне x и за счет увеличения отношения $\sigma / K_{рез}$, т.к. резание притупленными абразивными зернами, как известно, характеризуется повышенной силовой напряженностью процесса резания и соответственно увеличением условного напряжения резания σ . Из этого вытекает, что для выполнения требований по шероховатости поверхности необходимо увеличивать параметры x и σ , тогда как общеизвестно, что для обеспечения высокопроизводительной обработки необходимо эти параметры уменьшать. Следовательно, требования к назначению параметров x и σ по обеспечению наименьшей шероховатости и наибольшей производительности обработки должны быть противоположными.

Полученное теоретическое решение согласуется с известными экспериментальными данными применительно к процессу круглого наружного продольно-

го шлифования цилиндрических деталей из твердого сплава ВК8 [7]. Так, экспериментально установлено, что при шлифовании алмазным кругом на металлической связке 1А1 300x20x5 АС6 125/100 М1-10 4 (после его электроэрозионной правки, а затем обтачивания алмазным правящим карандашом) параметр шероховатости обработки R_a уменьшился с 2,2 до 0,1 мкм, т.е. примерно в 20 раз (кривая 2 на рис. 4). При этом изменение режимов шлифования и приработка круга (кривая 1 на рис. 4) не привели к существенному уменьшению шероховатости обработки. Этим показано, что образование на режущих зернах площадок износа и создание примерно одновысотного выступающего режущих зерен над уровнем связки круга путем его обтачивания алмазным правящим карандашом позволяет значительно уменьшить шероховатость обработки. Это открывает новые технологические возможности прецизионной алмазной обработки цилиндрических поверхностей.

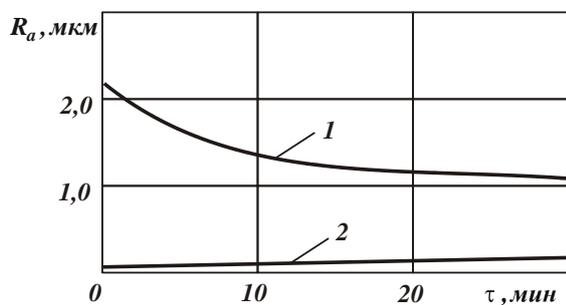


Рис. 4 – Зависимость параметра шероховатости обработки R_a от времени шлифования τ : 1 – после электроэрозионной правки алмазного круга; 2 – после создания площадок на вершинах зерен алмазного круга

Таким образом показано, что независимо от метода абразивной обработки (шлифования или абразивного полирования) создание площадок износа на режущих зернах приводит к существенному уменьшению шероховатости поверхности. Это согласуется с полученными в настоящей работе теоретическими решениями применительно к процессу абразивного полирования.

Выводы. В работе на основе вероятностного представления процесса взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом при абразивном полировании получено новое теоретическое решение об определении параметров шероховатости обрабатываемой поверхности с учетом износа абразивных зерен. Установлено, что образование в процессе обработки на абразивных зернах площадок износа приводит к существенному уменьшению параметров шероховатости поверхности. На этой основе определены основные условия эффективного осуществления про-

цесса абразивного полирования. Показано, что полученное решение справедливо для абразивного полирования с фиксированной скоростью радиальной подачи и с фиксированным радиальным усилием. Выполненные численные расчеты параметра шероховатости поверхности R_a подтвердили достоверность полученного решения, которое согласуется с известными экспериментальными данными применительно к процессу круглого наружного продольного шлифования цилиндрических деталей из твердого сплава ВК8.

Список литературы: 1. Кедров С. М. Средства повышения производительности доводки металлов / С. М. Кедров // Станки и инструмент, 1987. – №6. – С. 10-13. 2. Гребенщиков И. В. Роль химии в процессе полирования / И. В. Гребенщиков // Качество поверхности деталей машин: Сб. статей Всесоюзного научно-технического семинара. – М., 1957. – С.17-18. 3. Исаев А. И. Влияние температуры шлифования на изменение свойств поверхностного слоя деталей / А. И. Исаев, С. С. Силин // Труды МАТИ, 1969. – Вып. 38. – С. 32-36. 4. Новиков Ф.В. Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятностей / Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 44. – С. 140-149. 5. Новиков Ф.В. Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовський, В.Г. Шкурупій // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 5 (979). – С. 199-210. 6. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / Ф.В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с. 7. Прогресивні технології механічної обробки: монографія / Новиков Ф.В., Крюк А.Г., Шкурупій В.Г. та ін.; за заг. ред. докт. техн. наук, професора Новикова Ф.В. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2012. – 372 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kedrov S. M. Sredstva povysheniya proizvoditel'nosti dovodki metallov S. M. Kedrov/ Stanki i instrument, 1987. – №6. – pp. 10-13. 2. Grebenshikov I. V. Rol Khimii v protsesse polirovaniya I. V. Grebenshikov Kachestvo poverkhnosti detaley mashin: Sb. statey Vsesoyuznogo nauchno-tekhnikeskogo seminar. – Moscow, 1957. – pp.17-18. 3. Isaev A. I. Vliyaniye temperatury shlifovaniya na izmeneniye svoystv poverkhnostnogo sloya detaley A. I. Isaev, S. S. Silin Trudy MATI, 1969. –Publ. 38. – pp. 32-36. 4. Novikov F.V. Issledovaniy sherokhovatosti poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke metodami teoriy veroyatnostey F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. – Kharkov: NTU «KhPI». – 2004. – No 44. – pp. 140-149. 5. Novikov F.V. Matematychna model vyznachennya shorstkosti poverkhnii pri abrazyvnyi obrobtsi F.V. Novikov, V.V. Nezhebovskiy, V.G. Shkurupiy Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Matematychne modelivannya v tekhniiti ta tekhnologiyakh. – Kharkov: NTU «KhPI». – 2013. – No 5 (979). – pp. 199-210. 6. Novikov F.V. Fizicheskie i kinematische osnovy vysokoproizvoditelnogo almaznogo shlifovaniya: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 «Protsestry mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty» / F.V. Novikov. – Odessa, 1995. – 36 p. 7. Progresyvni tekhnologiyi mekhanichnoy obrobky: monografiya Novikov F.V., Kruik A.G., Shkurupiy V.G. ta in.; za zag. red. dokt. tekhn. nauk, profesora Novikova F.V. – Kharkov: Vyd. KNEU, 2012. – 372 p.

Поступила (received) 28.03.2015

Шкурупий Валентин Григорьевич – канд. техн. наук, доцент ХНЭУ, Харьков, тел.: (057)-3361415.

УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ СИЛЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБЫЧНОМ И ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ

В работе получены новые аналитические решения об условиях уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании с учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом. Теоретически установлено, что при прерывистом шлифовании в связи с динамическим характером взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом фактически отсутствуют упругие перемещения в технологической системе. Это способствует повышению производительности обработки. Температура резания при этом изменяется по экстремальной зависимости с увеличением длины рабочего выступа прерывистого круга, принимая минимальное значение при равенстве длины впадины и рабочего выступа круга.

Ключевые слова: прерывистое шлифование, прерывистый круг, сила резания, температура резания

Введение. При обработке высокоточных деталей гидроаппаратуры, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами, постоянно возникает проблема повышения эффективности финишной абразивной обработки, которая, как правило, осуществляется методами обработки свободным абразивом и характеризуется высокой трудоемкостью. В настоящее время появились абразивные круги с новыми характеристиками, позволяющие снизить силовую и тепловую напряженность процесса шлифования, повысить точность и качество обрабатываемых поверхностей. Перспективным направлением следует также рассматривать применение прерывистых кругов, обеспечивающих уменьшение силы и температуры резания. Однако, возможности шлифования этими кругами изучены недостаточно, что требует проведения дополнительных исследований.

Анализ последних исследований и литературы. Вопросам прерывистого шлифования в научной технической литературе уделено достаточно большое внимание [1-3]. Профессором Якимовым А.В. [1] теоретически и экспериментально раскрыта физическая сущность условий уменьшения температуры резания при прерывистом шлифовании, благодаря чему этот метод обработки получил достаточно широкое применение на практике. Однако, добиться положительных результатов от использования прерывистого шлифования с точки зрения повышения качества и производительности обработки удастся не всегда, в особенности при шлифовании труднообрабатываемых материалов. Поэтому актуальны вопросы теоретического обоснования возможностей снижения силы и температуры резания при прерывистом шлифовании.

Целью данной статьи является определение условий уменьшения силы и температуры резания при прерывистом шлифовании на основе применения новых подходов к математическому моделированию процесса шлифования.

Постановка проблемы. В работе решается задача теоретического определения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании с

учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом.

Материалы исследований. Согласно схемы шлифования прямолинейной детали, движущейся по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью $V_{дем}$, тангенциальную P_z и радиальную P_y составляющие силы резания описываются [4]:

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дем0}}{V_{сп}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{дем} - V_{дем0}) \cdot \tau; \quad (1)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дем0}}{V_{сп}} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma) + c \cdot (V_{дем} - V_{дем0}) \cdot \tau, \quad (2)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; F – площадь поперечного сечения обрабатываемого прямолинейного образца, м²; $V_{дем0}$ – фактическая линейная скорость съема материала, м/с ($V_{дем0} \leq V_{дем}$); $V_{сп}$ – скорость круга, м/с; ψ – условный угол трения зерна с обрабатываемым материалом; γ – условный (отрицательный) передний угол зерна; c – жесткость технологической системы, Н/м; f_1 – коэффициент трения связки круга с материалом.

Исходя из зависимостей (1) и (2), составляющие силы резания P_z и P_y с течением времени обработки τ неограниченно увеличиваются. Это приводит к снижению точности, качества и производительности обработки.

С учетом аналитической зависимости для определения условного напряжения резания

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}, \quad (3)$$

приведенной в работе [5], зависимости (1) и (2) примет вид:

$$P_z = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot F \cdot V_{дем0}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right) \cdot V_{сп}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{дем} - V_{дем0}) \cdot \tau; \quad (4)$$

$$P_z = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot F \cdot V_{дем0} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)} \cdot V_{кр} + c \cdot (V_{дем} - V_{дем0}) \cdot \tau, \quad (5)$$

где $\tau_{сдв}$ – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м².

Как видно, по мере износа и затупления режущих зерен круга увеличивается их отрицательный передний угол γ , что ведет к фактически неограниченному увеличению составляющих силы резания P_z и P_y . Причем, в значительно большей степени радикальной составляющей силы резания P_y , т.к. зависимость (2) содержит еще и множитель $\operatorname{tg}(\psi + \gamma)$, который более интенсивно увеличивается с увеличением угла γ , чем множитель $\frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}$. Следовательно,

исходя из такого представления процесса шлифования, в начальный период обработки в зависимостях (1) и (2) будут преобладать первые слагаемые, которые и определяют интенсивное увеличение P_z и P_y с увеличением времени обработки τ . Затем, через определенное время обработки τ вторые слагаемые могут превысить первые слагаемые и увеличение P_z и P_y будет происходить за счет увеличения вторых слагаемых. В особой мере это будет проявляться в условиях обычного абразивного шлифования при работе круга в режиме затупления.

Повысить эффективность процесса шлифования можно применением кругов с прерывистой рабочей поверхностью. В связи с прерывистым характером шлифования в начальный момент взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом технологическая система не успевает среагировать на импульс силы и получить соответствующее упругое перемещение. Это вытекает из аналитической зависимости для определения амплитуды колебаний от действия кратковременной силы резания без учета диссипативных сил [6]:

$$y = y_{см} \cdot (1 - \cos k\tau), \quad (3)$$

где $y_{см}$ – статическое перемещение в технологической системе, м; $k = \sqrt{c/m}$ – собственная частота системы, Гц; c – жесткость технологической системы, Н/м; τ – время обработки, с.

При относительно небольшом значении $k\tau < \pi/2$ амплитуда колебаний $y \rightarrow 0$. В работе [3] показано, что собственная частота упругой системы плоскошлифовального станка принимает значения $k = 0 \dots 50$ Гц. Время контакта рабочего выступа (длинной $l_{01} = 20$ мм) прерывистого круга с обрабатываемым материалом при $V_{кр} = 40$ м/с равно

$$\tau = \frac{l_{01}}{V_{кр}} = \frac{20 \text{ мм}}{40 \cdot 10^3 \text{ мм/с}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Произведение $k\tau$ для $k = 300$ Гц равно: $k\tau = 300 \text{ с}^{-1} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 0,15$. Период колебаний упругой системы станка

$$T = 2\pi = 6,28. \text{ Тогда } \frac{T}{k\tau} = \frac{6,28}{0,15} = 41,9, \text{ т.е. время кон-}$$

такта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом значительно меньше периода колебаний упругой системы станка T . Следовательно, согласно зависимости (3), величина упругого перемещения y будет значительно меньше величины $y_{см}$. Это будет способствовать более глубокому внедрению зерен в обрабатываемый материал и повышению интенсивности съема материала, что фактически исключит из зависимостей (1) и (2) вторые слагаемые, связанные с возникновением в технологической системе упругих перемещений. Следовательно, при прерывистом шлифовании реализуемы условия $V_{дем0} \rightarrow V_{дем}$, что предопределяет постоянство во времени составляющих силы резания P_z и P_y .

Необходимо отметить, что при прерывистом шлифовании вследствие более глубокого внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал их отрицательный передний угол γ будет меньше, что, согласно зависимостям (4) и (5), приведет к уменьшению составляющих силы резания P_z и P_y . Собственно этим и можно объяснить уменьшение силовой напряженности прерывистого шлифования по сравнению с обычным шлифованием. Кроме того, в условиях прерывистого шлифования, в связи с более интенсивным обновлением режущего рельефа круга и увеличением выступления режущих зерен над уровнем связки, уменьшается интенсивность трения связки и зерен с обрабатываемым материалом, т.е. уменьшаются параметры ψ и f_1 , что приводит к дополнительному уменьшению P_z и P_y .

Полученные теоретические решения согласуются с известными экспериментальными данными. Так, в работе [1] установлено, что при обычном абразивном шлифовании деталей из стали X12M абразивным кругом Э9А25СМ2К с течением времени обработки τ составляющие силы резания P_z и P_y непрерывно увеличиваются, а при прерывистом шлифовании фактически остаются постоянными. Установлено также, что удельный съем металла $K = Q/P_y$ с течением времени обработки при обычном абразивном шлифовании уменьшается, а при прерывистом шлифовании фактически остается постоянным [1]. Исходя из зависимостей (1) и (2), постоянство составляющих силы резания P_z и P_y с течением времени обработки τ при прерывистом шлифовании связано с выполнением условия $V_{дем0} \approx V_{дем}$, в результате чего вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2) фактически равны нулю и поэтому P_z и P_y не зависят от τ . При обычном абразивном шлифовании выполняется условие $V_{дем} > V_{дем0}$, что приводит к увеличению составляющих силы резания P_z и P_y с течением времени τ .

Температура резания при шлифовании θ определяется зависимостью:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = \left[\sigma \cdot V_{дем0} + \frac{f_1 \cdot c \cdot (V_{дем} - V_{дем0}) \cdot V_{кр} \cdot \tau}{F} \right] \times \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (4)$$

где $q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{F}$ – плотность теплового потока, Вт/м²;

$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_m \cdot \rho}}$ – глубина проникновения возникающе-

го при шлифовании тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К); c_m – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³.

Наличие в зависимости (4) второго слагаемого, обусловленного трением связки круга с обрабатываемым материалом, позволяет по-новому раскрыть технологические закономерности изменения температуры резания при шлифовании θ . Так, из зависимости (4) следует, что с увеличением параметров f_1 , c , $(V_{дем} - V_{дем0})$, $V_{кр}$, τ и уменьшением F температура резания увеличивается. Это ведет к снижению качества обрабатываемых поверхностей и производительности обработки и согласуется с известными экспериментальными данными.

Из зависимости (4) следует, что уменьшить температуру резания при шлифовании θ можно различными путями, например, уменьшая первое и второе слагаемые зависимости (4), а также уменьшая время обработки τ . Однако уменьшение параметров $V_{дем0}$ и τ неэффективно, т.к. это ведет к снижению производительности обработки. В связи с этим, основным условием уменьшения температуры резания при шлифовании θ следует рассматривать выполнение условия $V_{дем0} = V_{дем}$ за счет исключения в процессе шлифования трения связки круга с обрабатываемым материалом. Как отмечалось выше, это может быть достигнуто путем применения прерывистого шлифования или эффективных методов правки круга, обеспечивающих его высокую режущую способность.

Температуру резания при прерывистом шлифовании θ можно аналитически установить следующим образом. Время контакта рабочего выступа прерывистого круга (длиной l_{01}) с обрабатываемым материалом равно $\tau = l_{01} / V_{кр}$. Неудаленный материал за время прохождения впадиной прерывистого круга (длиной l_{02}) зоны шлифования удаляется последующим рабочим выступом круга с большей скоростью:

$$V_{дем0_1} = V_{дем0} \cdot \frac{(l_{01} + l_{02})}{l_{01}} = V_{дем0} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right). \quad (5)$$

Следовательно, чем больше отношение l_{02} / l_{01} , тем больше скорость $V_{дем0_1}$. Подставляя зависимость (5) в зависимость (4) без учета второго слагаемого и с учетом $\tau = l_{01} / V_{кр}$, получено

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}}. \quad (6)$$

Согласно данной зависимости, увеличение скорости круга $V_{кр}$ способствует снижению температуры резания при прерывистом шлифовании θ . Неодно-

значное влияние на θ оказывает длина рабочего выступа прерывистого круга l_{01} . В связи с этим важно установить характер изменения температуры резания при прерывистом шлифовании θ в зависимости от длины l_{01} . Для этого следует подчинить зависимость (6) необходимому условию экстремума:

$$\theta'_{l_{01}} = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} \cdot (0,5 \cdot l_{01}^{-0,5} - 0,5 \cdot l_{01}^{-1,5} \cdot l_{02}) = 0. \quad (7)$$

Откуда

$$l_{01} = l_{02}. \quad (8)$$

Для определения характера экстремума функции θ следует установить знак ее второй производной в точке экстремума, т.е. в точке $l_{01} = l_{02}$:

$$\theta''_{l_{01}} = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} \cdot 0,5 \cdot l_{01}^{-1,5}. \quad (9)$$

Как видно, в точке экстремума $l_{01} = l_{02}$ вторая производная функции θ принимает положительное значение. Это указывает на наличие минимума функции θ (рис. 1).

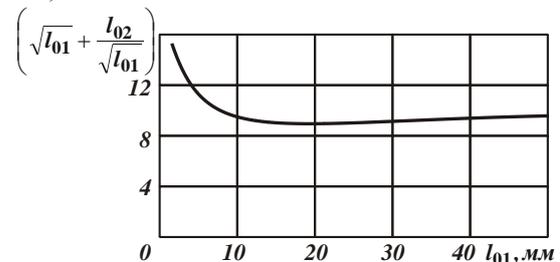


Рис. 1 – Зависимость множителя $\left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$ от длины рабочего выступа прерывистого круга l_{01} для $l_{02} = 20$ мм

Этим доказана эффективность применения прерывистого шлифования с точки зрения снижения температуры резания при шлифовании θ .

Результаты исследований. Чтобы оценить истинные технологические возможности прерывистого шлифования, необходимо зависимость (6) представить в виде:

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{(2 \cdot n) \cdot c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (10)$$

где n – количество рабочих выступов прерывистого круга для $l_{01} = l_{02}$.

После преобразований окончательно зависимость (10) выразится:

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{(0,5 \cdot n) \cdot c_m \cdot \rho \cdot \lambda}} = \frac{\theta_0}{\sqrt{0,5 \cdot n}}, \quad (11)$$

где $\theta_0 = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}$ – температура резания при обычном шлифовании сплошным кругом.

Как видно, зависимость (11) отличается от исходной зависимости (6), справедливой для обычного шлифования сплошным кругом, наличием в знамена-

теле множителя $(0,5 \cdot n)$. С увеличением этого множителя температура резания при прерывистом шлифовании θ уменьшается, что указывает на целесообразность использования прерывистых кругов. На рис. 2 показан характер изменения θ от n , установленный на основе зависимости (11).

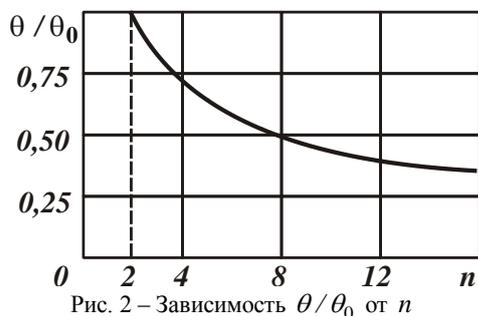


Рис. 2 – Зависимость θ/θ_0 от n

Как следует из рис. 2, с увеличением количества рабочих выступов прерывистого круга n от 2 до 8 отношение θ/θ_0 уменьшается в 2 раза, а при изменении n от 2 до 16 отношение θ/θ_0 уменьшается почти в 3 раза по сравнению с обычным шлифованием сплошным кругом. Полученные таким образом расчетные значения отношения θ/θ_0 согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [1], что свидетельствует о достоверности разработанной расчетной схемы температуры резания при прерывистом шлифовании θ .

Необходимо отметить, что полученные расчетные значения отношения θ/θ_0 справедливы при условии полного охлаждения зоны шлифования за время прерывания процесса шлифования, т.е. за время прохождения впадины прерывистого круга зоны шлифования. Однако, как установлено в работе [1], выполнить на практике данное условие достаточно сложно, т.к. обрабатываемый металл за время прерывания процесса шлифования полностью не охлаждается. Это не позволяет реализовать на практике в полной мере преимущества прерывистого шлифования. Реально удастся уменьшить температуру резания при прерывистом шлифовании θ в меньшее количество раз, чем это установлено теоретически. Так, согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [3], температура резания при шлифовании θ гарантированно может быть уменьшена на 40%. Это составляет достаточно большую величину, позволяющую в ряде случаев (при шлифовании сложнопрофильных поверхностей деталей, изготовленных из труднообрабатываемых материалов) обеспечить качественную обработку. Однако для более радикального решения проблемы снижения температуры резания и повышения качества обработки (исключения прижогов, микротрещин и других температурных дефектов) необхо-

димо обеспечить более существенное уменьшение температуры резания. Поэтому, используя полученное теоретическое решение, после проведения соответствующих исследований можно добиться уменьшения температуры резания θ более чем в 2-3 раза (согласно рис. 1).

Выводы. В работе получены новые аналитические решения об условиях уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании с учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом. Теоретически установлено, что при прерывистом шлифовании в связи с динамическим характером взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом фактически отсутствуют упругие перемещения в технологической системе. Это способствует повышению производительности обработки. Температура резания при этом изменяется по экстремальной зависимости с увеличением длины рабочего выступа прерывистого круга, принимая минимальное значение при условии равенства длины впадины и рабочего выступа круга. За счет этого температура резания может быть уменьшена в 2-3 раза по сравнению с обычным шлифованием.

Список литературы: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования [Текст] / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с. 2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности [Текст] / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с. 3. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирщев и др. – К.: Техніка, 1983. – 184 с. 4. Рябенков И.А. Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования [Текст] / И.А. Рябенков, Ф.В. Новиков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – No 43 (1086). – С. 143–147. 5. Новиков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новиков, І.О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с. 6. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: учеб. пособие [Текст] / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с.

Bibliography (transliterated): 1. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsesssa shlifovaniya [Text] A.V. Yakimov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 176p. Print. 2. Sipaylov V.A. Teplovye protsessy pri shlifovaniy i upravlenie kachestvom poverkhnosti [Text] V.A. Sipaylov. – Moscow: Mashinostroenie, 1978. – 167 p. Print. 3. Upravlenie protsesssom shlifovaniya [Text] A.V. Yakimov, A.N. Parshakov, V.I. Svirshchv i dr. – Kiev: Texnika, 1983. – 184 p. Print. 4. Rybenkov I.A. Otsenka vliyuy intensivnosti treniya svyazki kruga s obrabatyvaemym materialom na effektivnost protsesssa shlifovaniya [Text] / I.A. Rybenkov, F.V. Novikov Visnik NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Innovatsiyni tekhnologiy ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgiy. – Kiev: NTU «KPI», 2014. – No 43 (1086). – pp. 143–147. Print. 5. Novikov F.V. Teoretychni osnovy mekhanichnoy obrobky vysokotochnykh detaley : monografiya F.V. Novikov, I.O. Ryabekov. – Kharkov : Vyd. KhNEU, 2013. – 352 p. Print. 6. Kachestvo i proizvoditelnost abrazivno-almaznoy obrabotki: ucheb. Posobie [Text] A.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov i dr. – Odessa: OGPU, 1999. – 212 p. Print.

Поступила (received) 28.03.2015

Новиков Федор Васильевич – док. техн. наук, проф. ХНЭУ, Харьков, тел.: (057)-695562, e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

Рябенков Игорь Александрович – канд. техн. наук, ведущий инженер-технолог ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков, тел.: (057)-7596631, e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

проф. ХНЭУ, Харьков, тел.: (057)-695562, e-mail:

ведущий инженер-технолог ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков,

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ РАСКАТКИ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКА

Проведено компьютерное моделирование процесса горячей раскатки, применяемого при изготовлении подшипникового кольца с учетом и без учета влияния охлаждения. Рассматривается динамическая связанная контактная термоупруго-пластическая краевая задача при больших деформациях и наличие влияния скоростей деформирования. Для этого высокоскоростного процесса деформирования учитывалась зависимость физико-механических свойств материала от уровня скоростей деформаций и температур. Решение нестационарной задачи теплопроводности проводилось для случая воздушного охлаждения и принудительного жидкостного охлаждения. Моделирование процесса проводилось специализированным конечно-элементным программным комплексом Deform 3D в модуле "Ring-rolling". Анализ полученных полей температур и эквивалентных напряжений показал, что наличие принудительного жидкостного охлаждения приводит к перераспределению температур в кольце и к более высоким значениям эквивалентных напряжений, что более реально отображает физическую картину процесса горячей раскатки подшипникового кольца.

Ключевые слова: кольцо подшипника, горячая раскатка, Deform 3D, контактная задача, большие деформации, метод конечного элемента.

Введение. Долговечность транспортных средств и технологических машин напрямую зависит от долговечности их узлов, в частности, подшипников, от характеристик которых часто зависит работоспособность машины. Наиболее уязвимым элементом подшипника является внешнее подшипниковое кольцо, которое может быть получено с использованием технологии горячей раскатки. Моделирование этого технологического процесса с учетом связанности термомеханических физических полей является актуальной задачей. Решение нестационарной краевой задачи теплопроводности и связанной краевой контактной термоупругопластической задачи с учетом больших деформаций позволяет определить распределение температурного поля и полей напряжений и деформаций на всем временном промежутке процесса раскатки подшипникового кольца и получить необходимые параметры изделия.

Анализ последних исследований и литературы. Разработка имитационного подхода к моделированию процесса горячей раскатки заготовки подшипниковых колец дает возможность оптимизировать и улучшить характеристики изготавливаемой детали. В последние годы с этой целью были использованы специализированные конечно-элементные программные комплексы ANSYS, ABAQUS / Explicit, Deform 3D и др. [1].

В последние годы моделированию горячей раскатки кольца посвящено много научных публикаций [2-9]. Так в статье [5] для горячей прокатки кольца с помощью метода конечных элементов и исследуется влияние трения в оправке на процесс раскатки. Выбору модели, определяющей состояние материала, учету температурного поля, трения в контакте, наличия смазочно-охлаждающей среды при моделирова-

нии рассматриваемого процесса посвящены работы [3 – 8].

Целью данной статьи является совершенствование создания модели описывающей процесс горячей раскатки кольца и исследование влияния охлаждения на выходные параметры процесса.

Математическая постановка задачи. Численное решение методом конечного элемента (МКЭ) на базе независимого подхода Лагранжа-Эйлера краевой нестационарной задачи теплопроводности и трехмерной связанной нелинейной термоупруго-пластической контактной задачи с учетом больших деформаций и скоростей деформаций позволяет определить все параметры напряженно-деформированного состояния подшипникового кольца при горячей раскатке. Независимый подход Лагранжа-Эйлера заключается в том, что движение сетки напрямую не зависит от деформирования материала, и задается независимо таким образом, чтобы оптимизировать вычислительный процесс с позиции сокращения времени вычислений.

Разрешающие уравнения включают закон сохранения массы, энергии и момента количества движения в виде:

$$\dot{\rho} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i}, \quad (1)$$

$$\rho \dot{e} = \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \rho r - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}, \quad (2)$$

$$\rho \dot{v}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i^B, \quad (3)$$

где $\rho, \dot{\rho}$ - плотность и скорость изменения плотности, v_i, \dot{v}_i - скорости и ускорения материальной точки, $x_i(x_j)$ - декартова координата ($i, j = 1, 2, 3$), $e = e(\rho, \theta)$ - удельная внутренняя энергия, σ_{ij} - компоненты тензора напряжений Гука, r - внутренние распределенные источники тепла, q_i - компоненты вектора теплового потока, f_i^B - компоненты вектора объемных сил, θ - температура.

Скоростная форма физические уравнений имеет вид:

$$\sigma_{ij}^T = C_{ijkl} D_{kl}, \quad (4)$$

где тензор скоростей напряжений :

$$\sigma_{ij}^T = \dot{\sigma}_{ij} + \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \sigma_{ij} - \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \sigma_{jk} - \frac{\partial v_j}{\partial x_k} \sigma_{ik}, \quad (5)$$

где $\dot{\sigma}_{ij}$ - тензор скоростей Гука, C_{ijkl} - тензор физической связи напряжения-деформации 4-го порядка, D_{kl} - тензор скоростей деформаций:

$$D_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_l} + \frac{\partial v_l}{\partial x_k} \right) \quad (k, l = 1, 2, 3) \quad (6)$$

С учетом гипотезы не сжимаемости материала в области пластических деформаций уравнение виртуальной работы включает виртуальную работу внутренних и внешних сил:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta e_{ij} dV - \int_V \rho a_i \delta u_i dV - \int_V \rho (v_j - v_j^g) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \delta u_i dV = \delta W^{ext} \Big|_{t+\Delta t}, \quad (7)$$

где δu_i - вариация приращения виртуальных перемещений, а знак $\Big|_{t+\Delta t}$ означает выполнение уравнения (10) в момент времени $t + \Delta t$, V - объем, занимаемый областью.

Тензор деформаций:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

где u_i - перемещение.

Виртуальная работа внешних сил задается выражением:

$$\delta W^{ext} = \int_V \rho f_i^B \delta u_i dV + \int_S f_i^S \delta u_i dS, \quad (8)$$

где f_i^S - компоненты вектора поверхностных сил, S - поверхность тела, на которой действуют поверхностные усилия.

Для высокоскоростного деформирования характерна зависимость физико-механических свойств материала от уровня скоростей деформаций и температур. При больших пластических деформациях вследствие малости упругих деформаций скорость полной деформации приближенно представляется через скорость пластической деформации, а тензор скоростей деформаций включает упругую (e), пластическую (p) и температурную (θ) составляющие:

$$D_{ij} = D_{ij}^e + D_{ij}^p + D_{ij}^\theta, \quad (9)$$

Пластическое деформирование материала подчиняется ассоциированному закону теории течения в скоростной форме:

$$D_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (10)$$

где $\dot{\lambda}$ - параметр пластичности, F - пластический потенциал, задаваемый в виде (пластическое состояние соответствует $F(\sigma_{ij}, \sigma_y) = 0$):

$$F(\sigma_{ij}, \sigma_y) = f(\sigma_{ij}) - \sigma_y, \quad (11)$$

где $f(\sigma_{ij})$ - функция пластичности, σ_y - функциональная зависимость для текущего предела текучести, зависящего от эквивалентной деформации, эквивалентной скорости деформации и температуры, представляемая в виде определяющего соотношения (уравнения):

$$\sigma_y = \sigma_y(\bar{\epsilon}_p, \dot{\bar{\epsilon}}_p, \theta), \quad (12)$$

где $\bar{\epsilon}_p$ - эквивалентная (эффективная) пластическая деформация, $\dot{\bar{\epsilon}}_p$ - скорость эквивалентной пластической деформации, θ - температура.

При решении контактной задачи учитывается проскальзывание, когда

$$|\tau_t| > \mu_s |p_n|. \quad (13)$$

где $p_n = \sigma_n = f_{cn}$ и $\tau_t = f_{ct}$ - контактное давление и касательное усилие в точке контакта, μ_s - коэффициент трения покоя.

$$f_{cn}^I = H^I f_{cn}^K, \quad f_{cn}^J = H^J f_{cn}^K \quad (14)$$

Уравнение нестационарной теплопроводности можно представить виде [10]:

$$\rho c \dot{\theta} + \rho c (v_i - v_i^g) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} - \frac{\partial (\lambda^* \frac{\partial \theta}{\partial x_i})}{\partial x_i} = \dot{q}_v, \quad (15)$$

где c - теплоемкость, λ^* - коэффициент теплопроводности, \dot{q}_v - скорость тепловыделения объемных источников тепла.

Задача теплопроводности решается при наличии на границах области конвективного теплообмена с окружающей средой:

$$q_{s_2} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{s_2} = n^* (\theta_s - \theta^*) \Big|_{s_2} \quad (16)$$

и наличии источника тепла на границе:

$$q_s \Big|_{s_3} = q_{s_3} \quad (17)$$

где $S_1 - S_4$ - границы области, θ_s, θ_0 - соответственно температуры на границе области и окружающей среды, n^* - коэффициент конвективного теплообмена.

Для решения нелинейной контактной задачи применяется итерационный метод Ньютона-Рафсона.

Численная реализация задачи горячей раскатки колец. В работе представлен расчет напряженно-деформированного состояния подшипникового кольца при горячей раскатке выполненного при помощи специализированного программного комплекса Deform 3D с использованием модуля "Ring-rolling". Использован метод конечных элементов с применением метода явного интегрирования по времени системы связанных уравнений термоупругопластической задачи, полученных на основе инкрементального независимого подхода Лагранжа-Эйлера

Расчетная схема процесса горячей раскатки кольца подшипника из стали ШХ15, созданная в CAD - системе Pro/Engineer представлена на рис. 1.

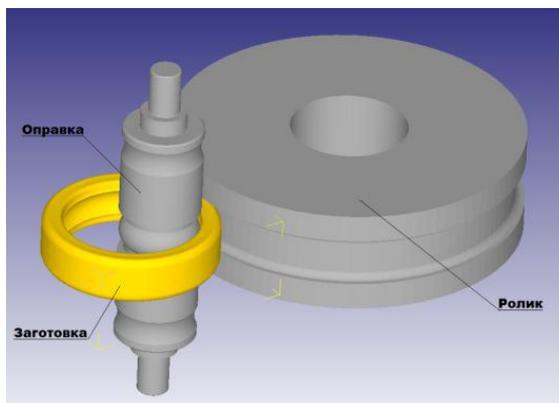


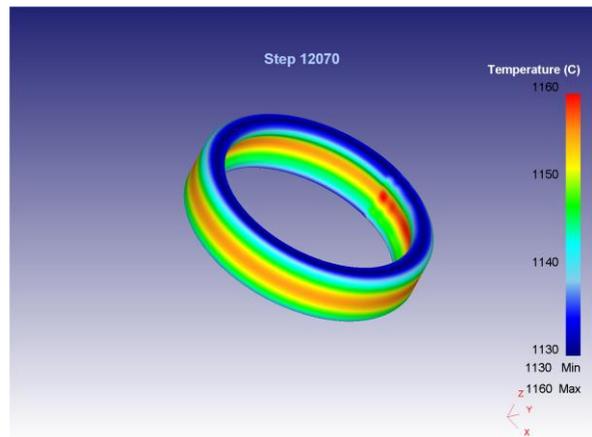
Рис. 1 - Расчётная схема

Конечно-элементная модель подшипникового кольца состоит из 52000 восьмиузловых, гексаэдральных элементов. Исходные геометрические размеры приведены в работе [5]. Модель материала взята из базы данных Deform и представляется собой таблично заданное семейство кривых деформирования для диапазона температуры от 800 до 1200 градусов. Исходная температура кольца составляет 1100 °С

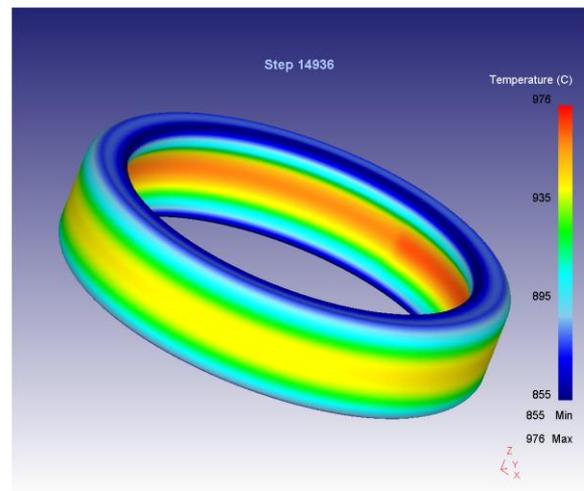
При решении поставленной задачи были получены распределения полей температур, эквивалентных деформаций, скоростей эквивалентных деформаций, эквивалентных напряжений, перемещений.

На рисунке 2 (а, б) представлено распределение поля температур в заготовке в конце процесса раскат-

ки: а)- воздушное охлаждение, б) – жидкостное принудительное охлаждение.



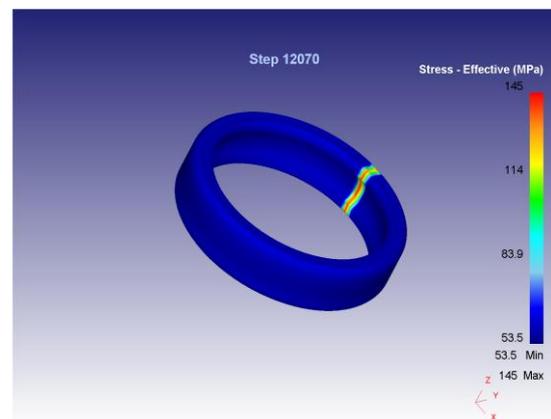
а



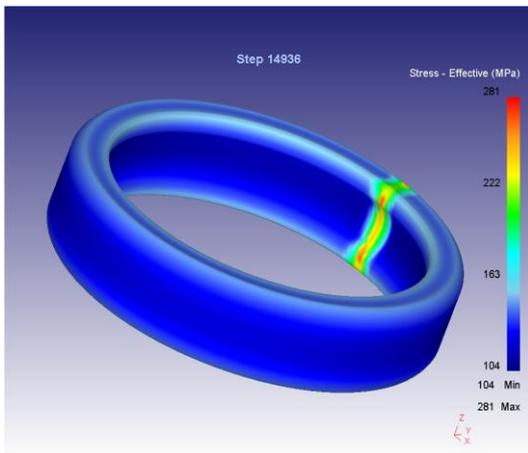
б

Рис 2 – Температурное поле кольца подшипника: а- воздушное охлаждение, б – жидкостное принудительное охлаждение

На рисунке 3 (а, б) представлено распределение поля эквивалентных напряжений: а) воздушное охлаждение кольца в процессе раскатки, б) жидкостное принудительное охлаждение.



а



б

Рис. 3 – Распределение поля эквивалентных напряжений: а - воздушное охлаждение кольца в процессе раскатки, б - жидкостное принудительное охлаждение

При сравнении уровней эквивалентных напряжений наблюдается, что учет конвективного теплообмена при решении задачи нестационарной теплопроводности дает большие уровни градиентов температуры, что приводит к более высоким уровням термонапряжений.

Выводы. В данной работе была предложена усовершенствованная модель технологического процесса горячей раскатки подшипникового кольца. Рассматривалось два режима раскатки: с воздушным охлаждением кольца и жидкостным принудительным охлаждением. С помощью программного комплекса Deform 3D. были получены поля напряжений, деформаций, температур. Их анализ показал, что при учете жидкостного принудительного охлаждения происходит перераспределение полей температур и напряжений, причем уровень значений температур снижается, а уровень значений эквивалентных напряжений кольца в 2 раза превышает уровни напряжений с воздушным охлаждением, что отображает более физическую картину процесса горячей раскатки подшипниковых колец и учет данного фактора является необходимым. Для создания максимально реалистичной и эффективной имитационной модели процесса горячей раскатки кольца подшипника, необходимо учитывать все факторы, которые влияют на напряженно-деформированное состояние кольца в процессе производства.

- Список литературы:** 1 Scientific Forming Technologies Corporation. DEFORM 3D Version 6.1 (sp2) User's Manual/Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. – 415p. 2.Wang, M., Yang, H., Sun, Z.-C., Guo, L.-G.: Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 16(6), 1274-1280 (2006). 3. S.G. Xu, K.J. Weinmann, D.Y. Yang and J.C. Lian, Simulation of the Hot Ring Rolling Process by Using a Thermo-Coupled Three-Dimensional Rigid-Viscoplastic Finite Element Method, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol 119 (No. 4A). Nov. 1997. P 542 – 549. 4. Автономова Л.В., Грозенок Е.Д. Имитационное моделирование процесса холодной раскатки колец подшипника с учетом температурного фактора // ВЕЖПТ. 2014. №7 (70). С.4-8. 5. Симсон, Э. А. Холодная раскатка заготовок подшипниковых колец [Текст] / Е. А. Симсон, В. В. Овчаренко, В. И. Демидов, И. Д. Прево, С. А. Назаренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2011. – № 52. – С. 156–160. 6. Wagoner R. H. Metal forming analysis / R. H. Wagoner, J. - L. Chenot. – Cambridge University Press, 2001. – 367 p. 7. Davey K. A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation / K. Davey, M. J. Ward // International Journal Mechanical Science. – 2002. – V. 44. – P. 165-190. 8. Hu Y.-K. ALE finite element formulation for ring rolling analysis. / Y.-K. Hu, W. K. Lin // International Journal of Numerical Methods in engineering. – 1992. – V. 33. – P. 1217-1236. 9. Yan F. L. Planning feed speed in cold ring rolling. / F. L. Yan, L. Hua, Y.-Q. Wu // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – V. 47. – P. 1695-1701. 10. Hsu T. R. The finite element method in thermomechanics / T. R. Hsu. - Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1986. - 546 p.

- Bibliography (transliterated):** 1. Scientific Forming Technologies Corporation. DEFORM 3D Version 6.1 (sp2) User's Manual/Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. – 415p. Print. 2.Wang, M., Yang, H., Sun, Z.-C., Guo, L.-G.: Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 16(6), 1274-1280 (2006). Print. 3. S.G. Xu, K.J. Weinmann, D.Y. Yang and J.C. Lian, Simulation of the Hot Ring Rolling Process by Using a Thermo-Coupled Three-Dimensional Rigid-Viscoplastic Finite Element Method, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol 119 (No. 4A). Nov. 1997. pp 542 – 549. Print. 4. Avtonomova L.V., Grozenok E.D. Imitacionnoe mode-lirovanie processa holodnoj raskatki kolec podshipnika s uchetom temperaturnogo faktora VEZhPT. 2014. №7 (70). pp.4-8. Print. 5. Simson, E. A. Holodnaja raskatka zagotovok podshipnikovyh kolec [Tekst] E. A. Simson, V. V. Ovcharenko, V. I. Demidov, I. D. Prevo, S. A. Nazarenko *Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivsk'ij politehnicnij institut»*. Kharkov: NTU «KhPI» – 2011. – No 52. – pp. 156–160. Print. 6. Wagoner R. H. Metal forming analysis R. H. Wagoner, J. - L. Chenot. – Cambridge University Press, 2001. – 367 p. Print. 7. Davey K. A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation K. Davey, M. J. Ward *International Journal Mechanical Science*. – 2002. – Vol. 44. – pp. 165-190. Print. 8. Hu Y.-K. ALE finite element formulation for ring rolling analysis. Y.-K. Hu, W. K. Lin *International Journal of Numerical Methods in engineering*. – 1992. – Vol. 33. – pp. 1217-1236. Print. 9. Yan F. L. Planning feed speed in cold ring rolling. F. L. Yan, L. Hua, Y.-Q. Wu *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47 – pp. 1695-1701. Print. 10. Hsu T. R. The finite element method in thermomechanics T. R. Hsu. - Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1986. - 546 p. Print.

Поступила (received) 28.03.2015

Автономова Людмила Владимировна – канд. техн. наук, ст. научн. сотр. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Грозенок Евгений Денисович – аспирант каф. сопротивления материалов НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: Ev.grozenok@gmail.com

Симсон Эдуард Альфредович – академик ИАНУ, доктор техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78

Л.В. Автономова, Э.А. Симсон, Д.С. Ягудин

ОЦЕНКА КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Исследовано напряженно-деформированное состояние обрабатывающего инструмента при динамическом нагружении. Рассматривается динамическая упруго-пластическая краевая задача для двух вариантов локализации ударного нагружения на конструкцию: удар рабочего фронтального и наклонного навесного элемента инструмента о препятствие. Численно контактная задача решалась методом конечного элемента на программном комплексе ANSYS. Анализ полей распределения эквивалентных напряжений в обрабатывающем инструменте при действии ударного нагружения показал, что в навесном рабочем элементе и в несущей конструкции возникают пластические деформации, которые не допустимы. С целью улучшения прочностных характеристик обрабатывающего инструмента предложено изменить геометрию его навесного рабочего элемента.

Ключевые слова: конструктивная прочность, обрабатывающий инструмент, ударное воздействие, упруго-пластическое деформирование, несущая конструкция, метод конечных элементов.

Введение. При проектировании обрабатывающего инструмента, предназначенного для обработки различных физических сред и представляющего собой составную конструкцию сложной геометрической формы с навесными рабочими элементами, оценка прочности является актуальной задачей, т.к. при динамических перегрузках возможно возникновение опасных зон разрушения. Навесные рабочие элементы инструмента в виде трехмерного каркаса могут быть подвержены ударному воздействию. Для определения напряженно-деформированного состояния обрабатывающего инструмента необходимо рассматривать упруго-пластическую мульти-контактную задачу. При решении краевой нестационарной упругопластической задачи учитывается, что отдельные части инструмента изготовлены из разнородного материала. Таким образом учитываются разные пределы текучести при учете билинейного кинематического упрочнения материалов. В качестве критерия прочности используются максимальные эквивалентные напряжения.

Анализ исследований и литературы. Наиболее нагруженным элементом при эксплуатации обрабатывающих систем для сравнительно низких скоростей нагружения является обрабатывающий инструмент. При этом может происходить его многократное пластическое деформирование, приводящее к малоцикловому усталостному разрушению [1]. Основным фактором, влияющим на этот процесс, являются характер нагружения. Наиболее опасным является периодическое ударное нагружение. Расчетам на прочность при ударном воздействии на различные конструкции посвящено достаточно много публикаций [2-7]. Исследованиям

ударного процесса для круглой пластины посвящена работа [2]. В работах [6-7] исследуется пластическое деформирование коробчатой конструкции при ударе ее жестким шаром. Особый интерес представляет решение мульти-контактных задач при ударном воздействии.

Целью данной статьи является изучение напряженно-деформированного состояния специализированного инструмента для обработки различных физических сред при ударном воздействии. В статье рассмотрены различные варианты локализации динамического воздействия и предложены рекомендации по устранению зон пластических деформаций.

Математическая постановка проблемы. Исследования нацелены на определение максимальных эквивалентных напряжений при ударе инструмента цилиндрическим телом. Система уравнений, которая описывает процесс взаимодействия движущегося упругого объекта с препятствием при ударе включает в себя уравнения кинематики (движения тел, закон сохранения импульса), механики контактного взаимодействия и пластического деформирования. При построении феноменологической расчетной схемы используются следующие упрощения:

- 1) материалы, используемые для отдельных элементов конструкции, имеют различные механические свойства;
- 2) динамический расчет проводится при низкой скорости движения инструмента (не учитываются волновые процессы);

В соответствии с принятыми допущениями математическая модель, которая описывает деформирование рассматриваемой системы, включает у

себя следующие уравнения и условия:

- 1) Закон сохранения импульса;
- 2) Уравнение баланса энергии;
- 3) Квазистационарные условия деформирования ;
- 4) Система уравнений пластического деформирования (физические уравнения);
- 5) Уравнение состояния материала.

Параметры, определяющие процесс нагружения в области контактного взаимодействия могут быть описаны уравнением удара твердого тела по пластине (по Тимошенко) [2]:

$$v_0 t - (1/m) \int_0^t \int_0^{t_2} P(t_1) dt_1 = \varpi + \alpha, \quad (1)$$

где $v_0 t$ – перемещение, v_0 – скорость и m – масса шара, $P(t)$ – усилие в зоне контакта ϖ – перемещение и α – сжатие контактной зоны, причем $\alpha = kP^{2/3}$, $k = [2r^{1/2} E / 3(1-\nu^2)]^{2/3}$, где r – радиус шара.

Для пластического деформирования выбрано соотношение для билинейного упрочнения

$$\sigma_i > \sigma_i^* \left\{ 1 - \varpi(\varepsilon_i) \left[1 + (\partial \varepsilon_i / \partial t) / D \right]^{1/n} \right\}, \quad (2)$$

где $\varpi(\varepsilon_i) = 1 - cN\sigma_i / (E\varepsilon_i)$.

Обобщенное уравнение закона Гука для областей упругого деформирования:

$$\sigma_{ij} = E^* (\varepsilon_i + \nu^* \varepsilon_j) / (1 - \nu^2); \quad \tau_{ij} = G^* \gamma_{ij}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} E^* &= (\sigma_i / \varepsilon_i) / (1 + m\sigma_i / \varepsilon_i), \\ \nu^* &= (1/2 - m\sigma_i / \varepsilon_i) / (1 + m\sigma_i / \varepsilon_i); \quad G^* = \sigma_i / 3\varepsilon_i; \\ m &= (1 - 2\nu) / 3E \end{aligned} \quad (4)$$

дает значение прогиба в локальной зоне контакта и анализ напряженно деформированного состоянию в целом.

Уравнения в перемещениях:

$$(\lambda + \mu) \partial(\operatorname{div} u) / \partial x_i + \mu \Delta u_i = \rho \partial^2 u / \partial t^2, \quad (5)$$

где u – вектор перемещений, λ, μ – коэффициенты Ляме, ρ – плотность материала.

Начальные условия: $u = 0$, $\partial u / \partial t = v_0$; граничные: $u|_x = f_1[p(x_i, t)]$, $\partial u / \partial x_i|_x = f_2[p(x_i, t)]$. В результате решения системы уравнений можно определить нелинейный тензор деформаций

$$\varepsilon_{ij} = \partial u_i / \partial x_j + (\partial u_i / \partial x_j) * (\partial u_j / \partial x_i) \quad (6)$$

и соответствующих скоростей деформаций $\partial \varepsilon_i / \partial t$.

Уравнение состояния $\sigma_i(\varepsilon_i, \partial \varepsilon_i / \partial t)$ имеет вид:

$$\sigma_i = \sigma_s \left\{ [1 + (\varepsilon_i / a)]^{1/n} + \varepsilon_i / \varepsilon_s - [1 + (\partial \varepsilon_i / \partial t) / b]^{1/n} \right\}^m \quad (7)$$

где a, b, m, n, k – экспериментальные коэффициенты.

Компоненты тензоров напряжений определяются из уравнений динамической теории деформаций :

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_0 + 2\sigma_i(\varepsilon_i, \partial \varepsilon_i / \partial t) * (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_0) / 3\varepsilon_i \\ \tau_{ij} &= \sigma_i(\varepsilon_i, \partial \varepsilon_i / \partial t) * \gamma_{ij} / 3\varepsilon_i, \end{aligned} \quad (8)$$

где средние значения шаровых напряжений $\sigma_0 = \sigma_{ij} / 3$ и деформаций $\varepsilon_0 = K\sigma_0$.

Для реализации поставленной задачи использован программный комплекс Pro/ENGINEER, в котором построенная геометрическая объемная 3D модель обрабатывающего инструмента интегрируется в последующем в программный комплекс ANSYS Workbench. Расчет проводится в пакете Explicit Dynamics.

На рис.1 представлена 3D модель обрабатывающего инструмента.

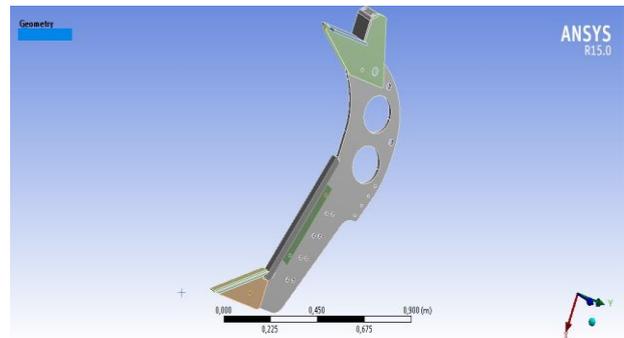
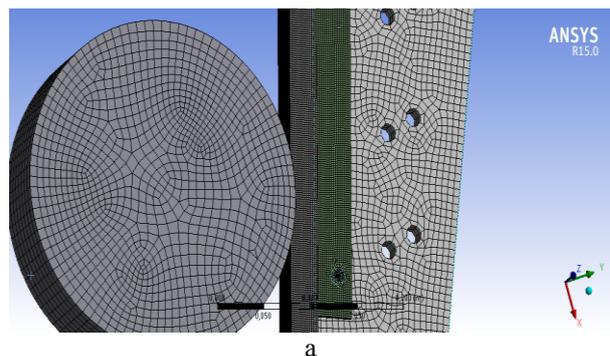


Рис. 1 – 3D модель обрабатывающего инструмента

Решение динамической упруго-пластической краевой задачи проводится для двух вариантов локализации ударного нагружения :

- 1) Удар фронтального навесного элемента о препятствие конечной массы;
- 2) Удар наклонного навесного элемента о препятствие конечной массы.

На рис. 2 (а, б) представлены конечно-элементные трехмерные модели для рассматриваемых двух вариантов удара обрабатывающего инструмента о препятствие.



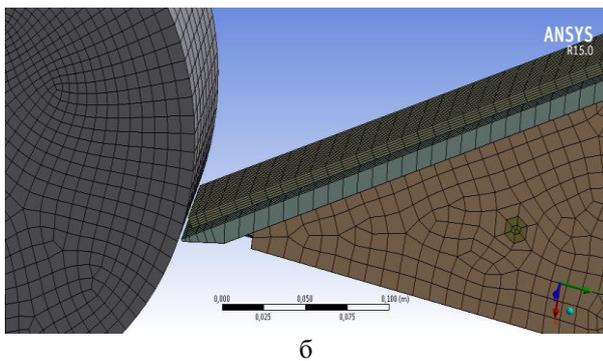


Рис. 2 – КЭ модель: а – для варианта 1, б – для варианта 2

Механические свойства материалов элементов обрабатывающего инструмента приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Механические свойства материалов

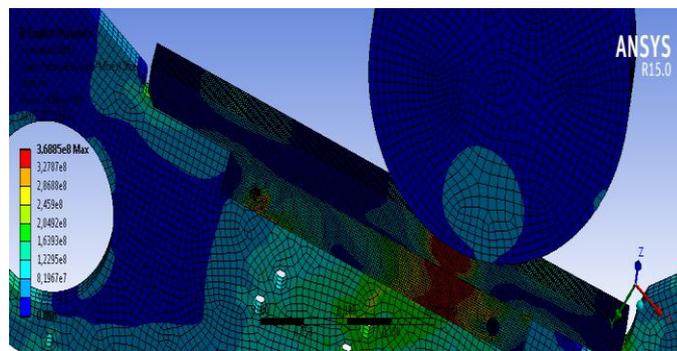
Параметр	Модуль упругости, Па	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Модуль сдвига, МПа	Предел прочности, МПа	Плотность, кг/м ³
Материал 1	2.1*10 ¹¹	0.3	345	540	610	7850
Материал 2			280	450	530	

Результаты расчетов. Полученные результаты расчета напряженно-деформированного состояния составной конструкции обрабатывающего инструмента демонстрируют возникновение различных зон пластического деформирования в зависимости от локализации столкновения. В случае удара фронтальной навесной пластины наблюдается распространение значительных пластических напряжений в пластине и всей несущей конструкции, что свидетельствует о нарушении прочности обрабатываемого инструмента. Поэтому с целью устранения зон пластического деформирования была увеличена толщина защитной навесной пластины до 30 мм, которая позволяет обеспечить упругое состояние конструкции при ударе, в том числе, в месте крепления инструмента. Распределение эквивалентных напряжений в этом варианте показано на рис. 3: а) – в рабочем элементе, б) – в защитной пластине, в) – в несущей конструкции.

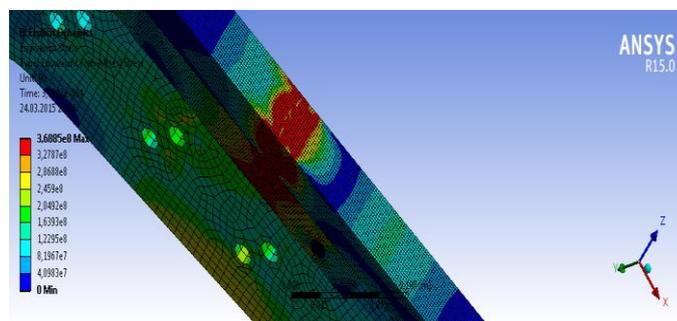
Для второго варианта ударного взаимодействия опасность возникновения пластических деформаций в инструменте отсутствует (см. рис. 4). В несущей конструкции область распространения пластических деформаций возникает в зоне изгиба (см. рис 5).

Поле распределения эквивалентных напряжений в пластине-накладке представлено на рис. 6. Пластические деформации в этой пластине появляются в зоне удара, однако их значение сравнительно невелико, и не приводит к существенным повреждениям и потере работоспособности обрабатывающего оборудования.

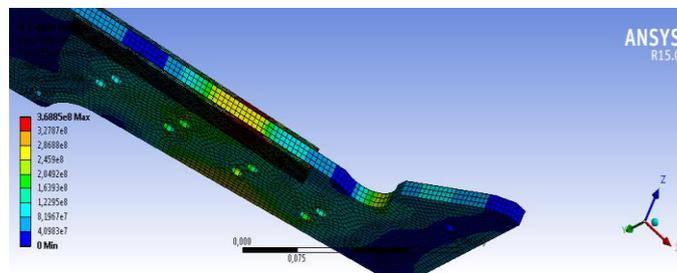
Выводы. Решение динамической контактной задачи при помощи программного комплекса ANSYS Workbench позволило исследовать напряженно-деформированное состояние обрабатывающего инструмента при ударном взаимодействии с преградой конечной массы (рис. 3-6). Полученные первоначальные поля распределения эквивалентных напряжений свидетельствуют о возникновении существенных пластических деформаций в несущей конструкции. Показано, что в случае удара навесного рабочего инструмента о преграду конечной массы, возникает риск возникновения пластических деформаций в зоне изгиба несущей конструкции. С целью улучшения прочностных характеристик обрабатывающего инструмента предложено изменить геометрию его навесного рабочего элемента.



а



б



в

Рис. 3: - Распределение эквивалентных напряжений при ударе фронтального навесного элемента: а – в рабочем элементе, б – в защитной пластине, в – в несущей конструкции

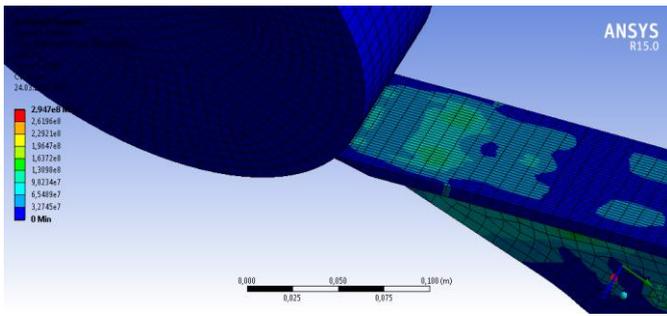


Рис.4 –Распределение эквивалентных напряжений при ударе наклонного навесного элемента

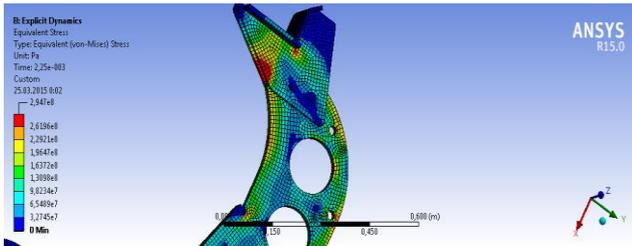


Рис. 5 - Распределение эквивалентных напряжений в зоне изгиба несущей конструкции

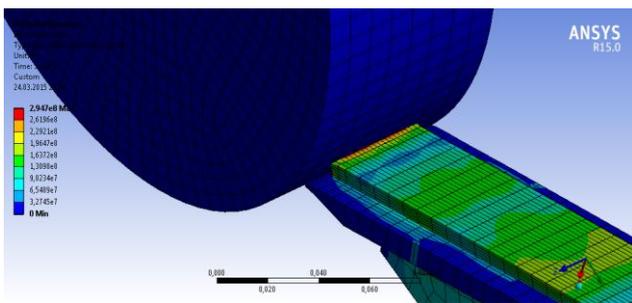


Рис. 6 – - Распределение эквивалентных напряжений в пластине.

Т.к. несущая конструкция должна иметь больший рабочий ресурс, чем навесные рабочие элементы, следовательно, предполагается, что в последних при уда-

ре могут допускаться незначительные пластические деформации, т.к. при дальнейшей эксплуатации они могут быть заменены.

Список литературы: 1.Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести / Г.С. Писаренко, Н.С. Можаровский // Киев, Наукова думка, 1981, 496 с. 2.Воробьев Ю.С., Чернобрыко М. В. Скоростное деформирование элементов конструкций в упругопластической стадии / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрыко // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій 2010, вип.14, с. 87-92. 3. Н. Fransplass, M. Langseth, O.S. Hopperstad Numerical study of the tensile behaviour of threaded steel fasteners at elevated rates of strain / International Journal of Impact Engineering, Volume 54, April 2013, Pages 19-30. 4.Леванов А.Н., Колмогоров В.Л., Буркин С.П. и др. Контактное трение в процессах / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин // ОМД, Москва, 1976./ 352 с. 5. Степук О.В., Автономова Л.В., Бондар С.В. Особливості деформування П-подібної тонкостінної конструкції при ударі / Степук О.В., Автономова Л.В., Бондар С.В. //Вісник НТУ «ХП». Серія: . – X. : НТУ «ХП», 2013. – No . – С.5 . 6. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел / Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.7 Деформування П-подібної тонкостінної конструкції з ребрами жорсткості при ударі кулею / О.В. Степук, Л. В. Автономова, С.В. Бондар//Вісник НТУ «ХП». Серія: . – X. : НТУ «ХП», 2014. – No7 . – С.5 . – Библиогр.: 8 назв.

Bibliography (transliterated): 1.Pisarenko G.S., Mozharovskij N.S. *Uravneniya i kraevye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti*/ G.S. Pisarenko, N.S. Mazhorovskij Kiev, Naukova dumka, 1981, 496 p. Print. 2.Vorob'ev Ju.S., Chernobryvko M. V. *Skorostnoe deformirovanie jelementov konstrukcij v uprugoplasticheskoj stadii* Ju.S. Vorob'ev, M.V. Chernobryvko Problemi obchisljuval'noji mehaniki i micnosti konstrukcij. Kiev, 2010, Publ.14, pp. 87-92. Print. 3. H. Fransplass, M. Langseth, O.S. Hopperstad *Numerical study of the tensile behaviour of threaded steel fasteners at elevated rates of strain* International Journal of Impact Engineering, Volume 54, April 2013, pp 19-30. Print.. 4.Levanov A.N., Kolmogorov V.L., Burkin S.P. i dr, *Kontakt-noe trenie v processah* A.N. Levanov, V.L. Kolmogorov, S.P. Burkin OMD, Moscow, 1976. 352 p. 5. Stepuk O.V., Avtonomova L.V., Bondar S.V. *Osoblivosti deformuvannja P-podibnoi tonkostinnoi konstrukcii pri udari* Stepuk O.V., Avtonomova L.V., Bondar S.V. /Visnik NTU «HPI». Serija: . – Kharkov. : NTU «KhPI», 2013. – No . – pp.5 . Print. 6. Korobejnikov S.N. *Nelinejnoe deformirovanie tverdyh tel* Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000. Print. 7. *Deformuvannja P-podibnoi tonkostinnoi konstrukcii z rebrami zhorstkosti pri udari kuleju* O.V. Stepuk, L. V. Avtonomova, S.V. Bondar Visnik NTU «KhPI». Serija: . – Kharkov. : NTU «KhPI», 2014. – No7 . – pp.5 . – Bibliogr.: 8 nazv. Print.

Поступила (received)28.03.2015

Автономова Людмила Владимировна – канд. техн. наук, ст. научн. сотр. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78;
Симсон Эдуард Альфредович – академик ИАНУ, доктор техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78;
Ягудин Дмитрий Сергеевич – аспирант, магистр. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: dmitriy.yagudin27@gmail.com.

С.С. Добротворский, С.С.Гнучих, Л.Г. Добровольская

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ДВУХСЛОЙНЫХ ТИТАНОВОАЛЮМИНИЕВЫХ ПАКЕТОВ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛЬНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ САЕ СИСТЕМ

Для повышения прочности и ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости машин, в современном машиностроении необходимо увеличение числа тонкостенных деталей, имеющих многослойную (сендвич) структуру. Многослойные структуры, как правило, позволяют получить изделия с характеристиками, превосходящими свойства отдельных входящих в них материалов. Однако обработка таких многослойных структур представляет определенные трудности, так как в структуру могут входить материалы с совершенно различной степенью обрабатываемости, в частности, титан и алюмомагниевого сплав. На наш взгляд, преодолеть эти противоречия можно путем использования высокоскоростных методов обработки. Однако исследования по этим вопросам крайне ограничены. В данной работе предлагается решать эту проблему путем моделирования процессов высокоскоростного деформирования сендвич-пакетов с использованием метода конечных элементов.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, титан, алюминий, САЕ системы.

Введение. Для повышения прочности и ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости машин, в современном машиностроении необходимо увеличение числа тонкостенных деталей, имеющих многослойную (сендвич) структуру. Многослойные структуры, как правило, позволяют получить изделия с характеристиками, превосходящими свойства отдельных входящих в них материалов. Однако обработка таких многослойных структур представляет определенные трудности, так как в структуру могут входить материалы с совершенно различной степенью обрабатываемости, в частности, титан и алюмомагниевого сплав. Оптимальные технологические режимы механической обработки этих материалов отличаются на 1-2 порядка. На наш взгляд, преодолеть эти противоречия можно путем использования высокоскоростных методов обработки, которые в определенной мере уравнивают шансы на хорошую обрабатываемость различных материалов сендвич-пакетов и сендвич-структур.

Анализ последних исследований и литературы. Из обзора работ зарубежных и отечественных авторов установлено [1], что мировые тенденции поиска повышения производительности и качества механообработки состоят в резком повышении скоростей обработки. В традиционных областях механообработки, таких как фрезерование, точение скорости обработки с обычных поднялись до высокоскоростных. Нормой становится наличие на фрезерных обрабатывающих центрах шпинделей, имеющих 40 000 об/мин и более. Классические модели процессов резания при таких условиях не совсем адекватно описывают происходящие процессы.

Процесс резания необходимо рассматривать с учетом позиций высокоскоростного ударного взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом. Аналогичная проблема возникает в случае необходимости получения из листового сендвич-пакета изделия сложной формы путем многократного ударного контактного воздействия твердосплавного или деформирующегося инструмента.

Целью данной статьи является исследование степени деформации двухслойного металлического пакета из титана и алюминия при ударном воздействии деформирующегося инструмента методом имитационного моделирования с использованием САЕ систем.

Постановка проблемы. В настоящей работе мы рассматриваем двухслойный пакет, состоящий из плоских пластин титана и алюминия переменной толщины. Он подвергается высокоскоростному воздействию стального пробойника. Нам необходимо определить допустимую степень величины деформации пакета, при которых отсутствует его катастрофическое разрушение. Максимальное давление, возникающее при соударении метаемой среды с твердой поверхностью, можно оценить по формуле [2]:

$$p = \rho_0 C_0 v \left(1 + k \frac{v}{C_0} \right),$$

где ρ_0 , C_0 – плотность метаемой среды и скорость звука в ней; v – скорость частиц метаемой среды; k – постоянная, характеризующая увеличение скорости волны при ударном сжатии.

© С.С. Добротворский, С.С.Гнучих, Л.Г. Добровольская, 2015

При определении давления при соударении потока частиц со стальной преградой используется линейное уравнение ударной адиабаты[3]:

$$D = a + bu,$$

где D – скорость ударной волны, u – массовая скорость, a и b – значения коэффициентов ударной адиабаты веществ.

Уравнение сохранения импульса:

$$P = p_0 D u.$$

Подставляя уравнение ударной адиабаты в уравнение сохранения импульса, получаем:

$$P = p(a + bu) \cdot u.$$

Распишем уравнение сохранения импульса для стальной преграды и ударника:

$$P_{Fe} = p_{Fe}(a + bu) \cdot u;$$

$$P_{yd} = p_{yd}(a + b(u - w)) \cdot (u - w),$$

где u – массовая скорость частиц ударника, w – массовая скорость в стальной преграде.

Использование этих зависимостей дает предостережение о физических процессах происходящих при ударном взаимодействии. Однако они не позволяют выполнить точные расчеты. В связи с этим возникает необходимость привлечения более точных методик расчета основанных на методе конечных элементов.

Материалы исследований. Для решения задачи определения степени деформации сэндвич-пакета при высокоскоростном воздействии на него инструмента, решено использовать компьютерное проектирование и моделирование образов исследуемых технологических объектов на базе вычислительных логических алгоритмов с применением метода конечных элементов с среде CAE-модуля ANSYS.

В пакете ANSYS Движение сплошной среды может быть описано используя: закон сохранения массы, закон сохранения импульса, закон сохранения энергии, модели материала, начальных условий, граничных условий.

Математическая модель движения сплошной среды, описанная с использованием перечисленных выше уравнений, численно решается в ANSYS, используя явное интегрирование по времени и различные методики решения.

Для Лагранжевых формулировок в настоящее время в системе ANSYS плотность в любой момент может быть определена из текущего объема зоны и ее первоначальной массы

$$\frac{p_0 V_0}{V} = \frac{m}{V}.$$

Частные дифференциальные уравнения, которые выражают закон сохранения импульса связывают ускорение и тензор напряжений σ_{ij} .

$$p\ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z};$$

$$p\ddot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z};$$

$$p\ddot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}.$$

Сохранение энергии выражается через:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} +$$

$$+ 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx})$$

Эти уравнения решаются в явном виде для каждого элемента в модели, основанной на входных значениях в конце предыдущего шага по времени. Малое время приращения используются для обеспечения стабильности и точности решения.

В корректном моделировании, масса, импульс и энергия должны быть сохранены.

При интегрировании применяются метод центральных разностей. Ускорения оцениваются для t :

$$\{a_t\} = [M]^{-1} ([F_t^{ext}] - [F_t^{int}]),$$

где $\{a_t\}$ – вектор ускорения $[M]$ – матрица масс, $\{F_t^{ext}\}$ вектор приложенных внешних сил, $\{F_t^{int}\}$ вектор внутренних сил:

$$F_t^{int} = \sum \left(\int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + F^{hg} \right) + F^{contact},$$

где F^{hg} – сила hourglass-сопротивления, $F^{contact}$ – сила контакта.

Затем вычисляются скорости и перемещения:

$$\{v_{t+\Delta t/2}\} = \{v_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\} \Delta t;$$

$$\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \{v_{t+\Delta t/2}\} \Delta t;$$

$$\Delta t_{t+\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t});$$

$$\text{и } \Delta t_{t-\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t - \Delta t_{t+\Delta t}).$$

Геометрия обновляется добавлением приращений перемещений к исходной геометрии $\{x_0\}$:

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\}.$$

Для упрощения обращения матриц требуется диагональная матрица масс. Уравнения становятся несвязанными и могут решаться напрямую (явно)

Не требуется обращения матрицы жесткости. Все нелинейности (включая контакт) учитываются в векторе внутренних сил. Основное время занимает вычисление вектора внутренних сил. Для устойчивости решения требуются очень малые шаги. Переменные интегрируются по времени, основываясь на значениях, полученных на предыдущем временном шаге. Явная схема решения проста в реализации.

Результаты исследования. Поиск области существования оптимальных деформации сэндвич-пакета осуществляли с помощью многочисленных экспериментов с изменением толщины пластин (мм), сравнивая их с поведением одинарных плас-

тин. В статье проведено сравнительное исследование величины деформации листовых материалов титана и алюминия. На рисунке 1 представлены результаты моделирования деформации листового титана при разных толщинах пластины.

степени подвержен деформации по сравнению с титаном. На рисунке 3 представлен сэндвич-пакет алюминий– титан 1-6 мм и 1-9 мм. На рисунке 4 представлен сэндвич-пакет алюминий– титан 2-6 мм и 2-9 мм.

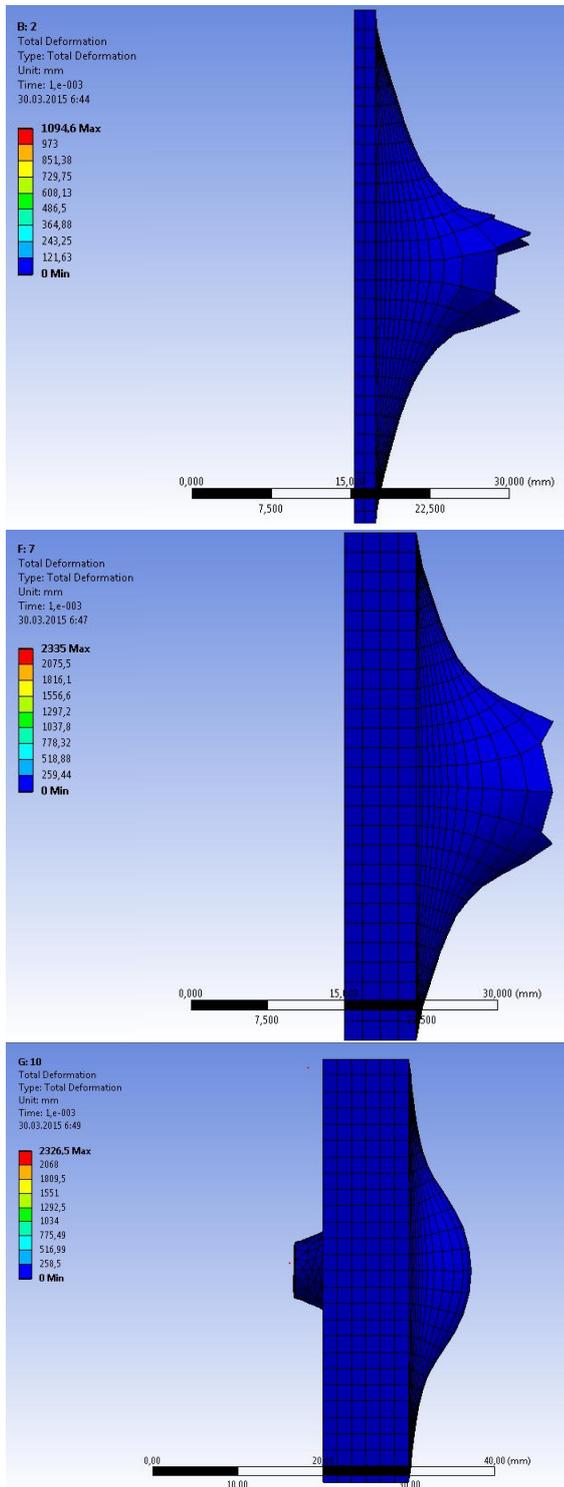


Рис. – 1 Деформация Алюминия при толщине 2 мм, 7 мм, 10 мм.

На рис. 2 представлены результаты моделирования деформации листового алюминия. Результаты моделирования показывают что алюминий в большой

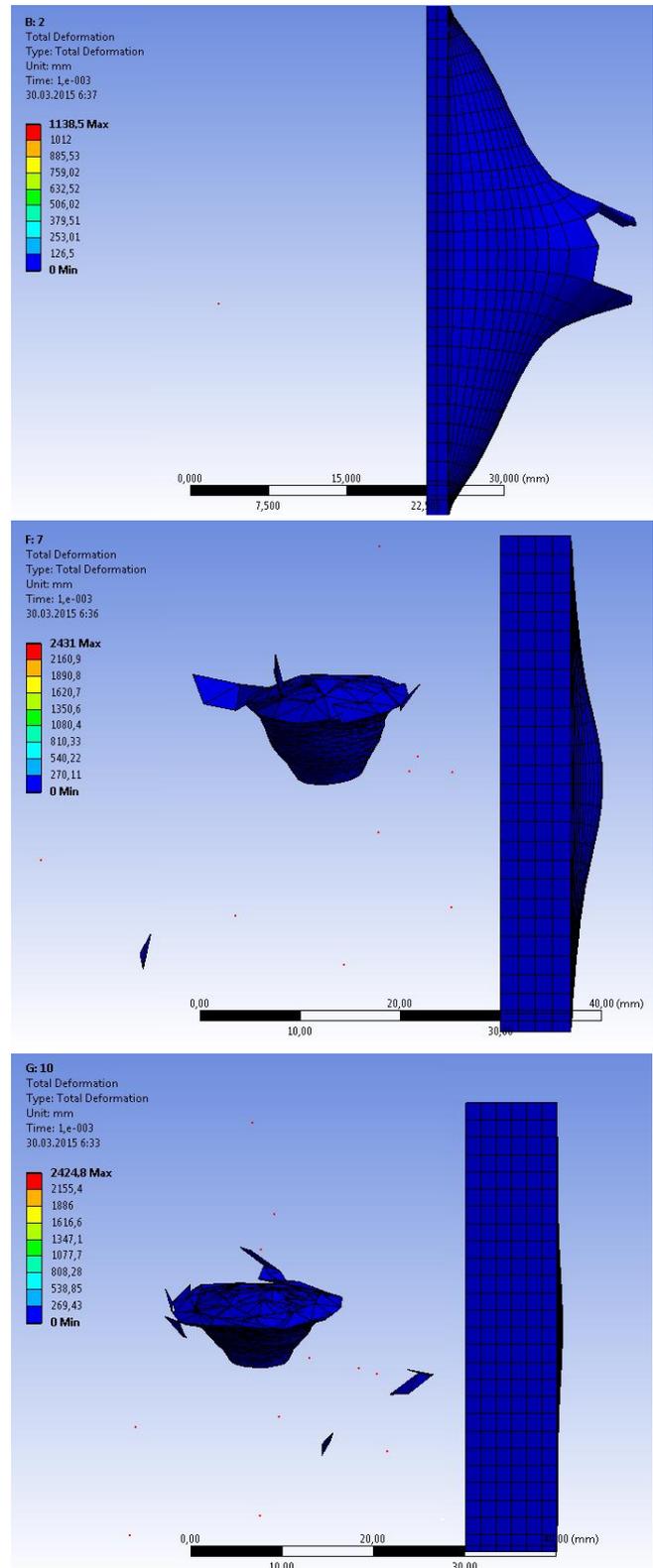


Рис. – 2 Деформация Титана при толщине 2 мм, 7 мм, 10 мм.

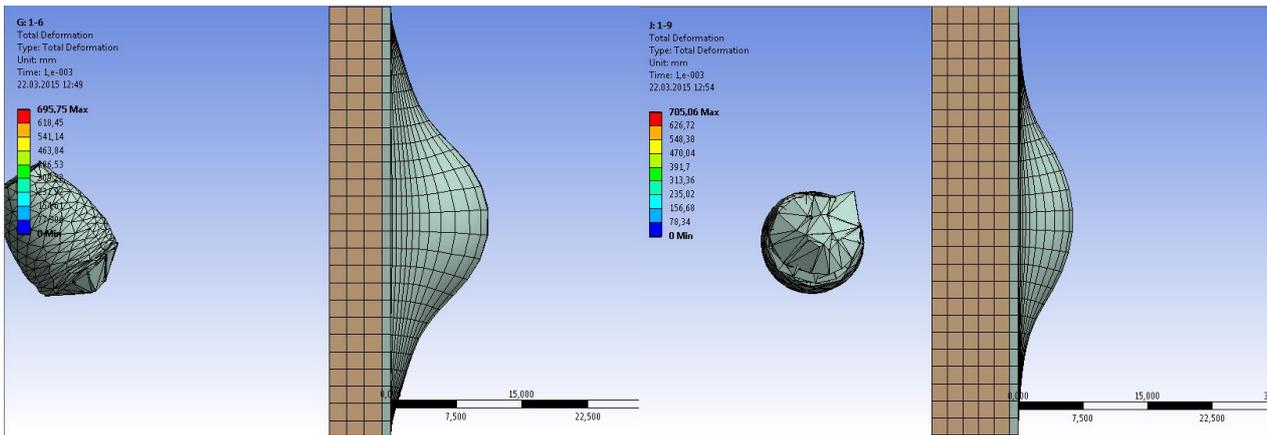


Рис. – 3 Деформация сендвич-пакетов при толщине 1-6 мм,1-9мм.

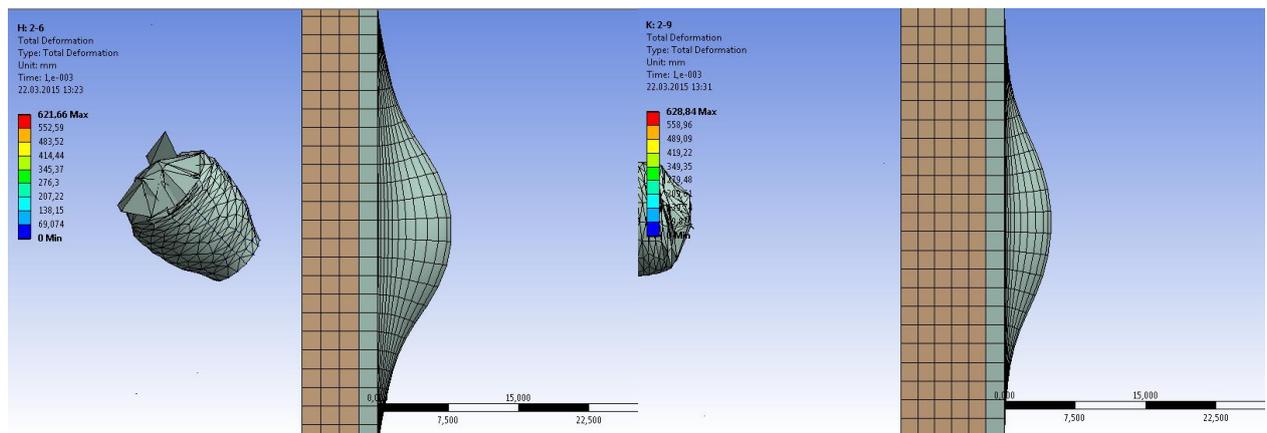


Рис. – 4 Деформация сендвич-пакетов при толщине 2-6 мм,2-9мм.

Выводы. Результаты моделирования позволяют сделать заключение что ударная прочность изделий из чистого листового материала меньше чем сендвич-пакетов титан-алюминий.

Таким образом исследование сендвич-пакетов из различных по свойствам материалов является перспективным научным направлением, а также имеет практическую ценность, так как позволяет получить изделия с характеристиками, превышающими характеристики исходных материалов при меньшем весе и размере.

Список литературы: 1. Добротворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мялица // Сборник научных трудов "Вестник НТУ «ХПИ» : Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.5542. – С. 25-31. 2 Драгобецкий В.В. Совершенствование свойств инструментальных материалов методами взрывной обработки / Драгобецкий В.В Пирогов В.В. Наумова Е.А.// Вісник

СевНТУ. Вип. 107: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. 3. Петров Е.В. Воздействие на стали потока тугоплавок частиц, Разогнанных энергией взрыва: автореферат ... кандидата технических наук: 02.02.11 / Петров Евгений Владимирович.– Черноголовка, 2011.– 21 с.

Bibliography (transliterated): 1. Dobrotvorskiy S.S., Basova E.V., Dobrovol'skaja L.G., Mjalica A.K. *Povyshenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitel'nogo proizvo-dstva v sovremennyh usloviyah.* Kharkov: NTU «KhPI», 2014. pp. 25-31. Print. 2. Dragobetskiy V.V. *Sovershenstvovaniye svoystv instrumental'nykh materialov metodami vzryvnoy obrabotki* Dragobetskiy V.V Pirogov V.V. Naumova Ye.A. *Visnik SevNTU. Vip. 107: Mashinopriladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2010. Print 3. Petrov E.V. Vozdeystviye na stali potoka tugoplavkikh chastits, Razognannykh energiyey vzryva: avtoreferat ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 02.02.11 Petrov Yevgeniy Vladimirovich.– Chernogolovka, 2011.– 21 p. Print*

Поступила (received) 29.03.2015

Добротворский Сергей Семенович – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: sdbro@mail.ru;

Гнучих Сергей Сергеевич – магистр НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25 e-mail: gny4ix@mail.ru;

Добровольская Людмила Георгиевна – канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25.

Г.И. Костюк, Е.В. Миргородская, О.М. Мелкозёрова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОБЪЕМА НАНОКЛАСТЕРА И ГЛУБИНЫ ЕГО ЗАЛЕГАНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНОВ РАЗНЫХ ЭНЕРГИЙ, СОРТОВ И ЗАРЯДОВ НА МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Приведены особенности обработки отверстий комбинированным осевым инструментом. Предложен алгоритм выбора структуры комбинированного осевого инструмента для реализации технологического процесса обработки совокупности отверстий, основанный на анализе их конструктивно-технологических характеристик и увеличении концентрации технологических переходов. Предложена математическая модель, позволяющая описать структуру комбинированного осевого инструмента и принцип работы его ступеней.

Ключевые слова: обработка отверстий, комбинированный осевой инструмент, технологический процесс, концентрация операций.

Введение. Применение магниевых сплавов для создания деталей авиационной и ракетной техники выдвигает ряд важных требований к их поверхностному слою: высокая износостойкость и контактная прочность, (что связано с необходимостью получения высокой микротвердости), ударной и усталостной прочностью, а также коррозионной стойкостью, (что связано с необходимостью получения высоких физико-механических характеристик поверхностного слоя). При реализации НС в достаточно большом слое и при соответствующем выборе плотности ионного тока для каждого сорта, что позволит прогнозировать глубину слоя и эксплуатационные характеристики детали. Всё это позволит обеспечить детали авиационной техники из магниевых сплавов высокими прочностными свойствами и достаточной работоспособностью.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения») «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Анализ последних исследований и литературы. На основе многих исследований наноструктур [1–18] показана возможность конструирования поверхностного слоя детали за счет наноструктур, но научных основ такого конструирования еще не создано. Видно, что имея возможность создавать слои из наноструктур требуемых физико-механических характеристик и на необходимой глубине может существенно

продвинуть эти исследования и решить вопрос о наноструктурах в поверхностном слое, обеспечивающих существенное повышение работоспособности деталей. Ясно, что зная размер зерна, который будет получаться в соответствующем слое, можно прогнозировать изменение физико-механических характеристик поверхностного слоя по глубине, а, следовательно, выбирать слои, которые обеспечат конструирование слоя по требуемым характеристикам. Всё это говорит о своевременности и актуальности проводимых исследований и дает пути создания сложных композитных наноструктурных слоев, имеющих высокую работоспособность и достаточно высокие физико-механические характеристики, причем по глубине они будут изменяться с учетом возможности соответствующих слоев наноструктур.

Целью данной статьи является определение технологических режимов потоков ионов различных сортов, энергий и зарядов для получения наноструктур.

Постановка проблемы. Проведенный анализ исследований по получению наноструктур в конструкционных материалах, результаты которых приведены в обзорах работ [1–18]. Показано, что теоретических работ, за исключением [1–2], по получению наноструктур практически нет, а значит и отсутствуют научные основы получения технологических параметров потоков ионов для прогноза и научного подхода к определению технологических параметров для получения слоев наноструктур требуемой толщины с целью повышения работоспособности деталей и режущего инструмента.

Материалы исследований. На основе моделирования [1] тепловых и термомеханических процессов в зоне действия ионов определили зону материала, где выполняются условия для образования наноструктур: температуры лежат в диапазоне 500–1500 К, скорости их нарастания больше 10^7 К/с и температурные напряжения в диапазоне 10^7 – 10^9 Па, что ускоряет процесс образования наноструктур. Из условия наиболее удачного заполнения наноструктурами объ-

ема и плотность тока выбрана равной первой критической [3].

Результаты исследований. В настоящей статье рассматривается объем наноструктурированного кластера и глубина его залегания в магниевом сплаве, что позволит обеспечить высокий ресурс деталей из магниевых сплавов. Величина объема наноструктур при единичном действии иона на магниевый сплав дает возможность прогнозировать требуемую плотность ионного тока в потоке для полного заполнения слоя, где возможно образование для этого иона соответствующего сорта, энергии и заряда. Так, на рис. 1–9 представлены зависимости объема нанокластера и глубин его залегания от зарядового числа z и энергии E для ионов: В, С – рис. 1; N, Al – рис. 2; V, Cr – рис. 3, аналогичные зависимости для ионов O, Fe – рис. 4; Ni, Co – рис. 5; Y, Zr – рис. 6; Mo, Hf – рис. 7; Ta, W – рис. 8; Pt – рис. 9.

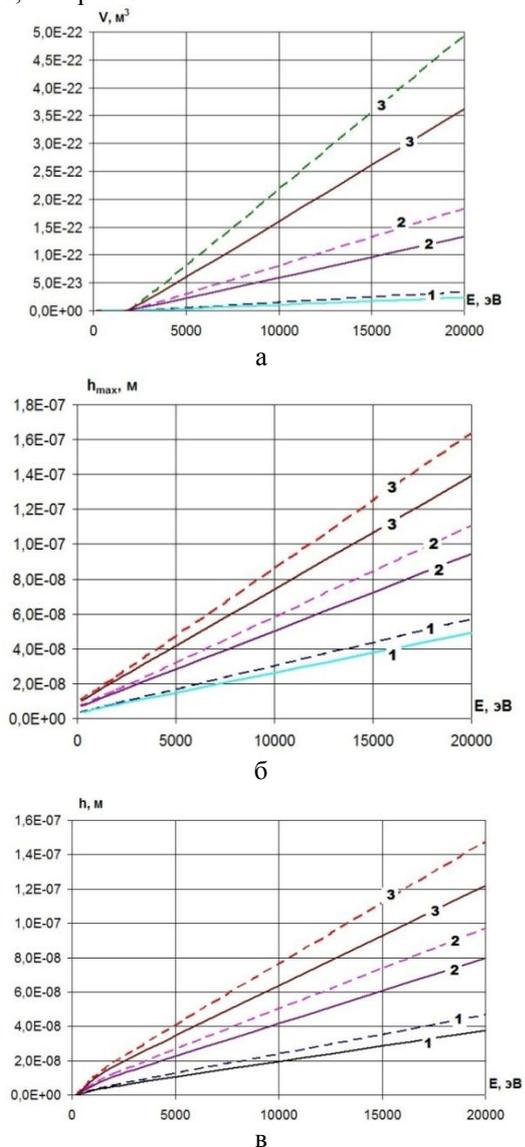


Рис. 1 – Объем нанокластера – V (а), максимальная – h_{max} (б) и минимальная – h (в) глубина его залегания в зависимости от энергии ионов бора (–) и углерода (–) на магниевый сплав (1- $Z=1$, 2- $Z=2$, 3- $Z=3$)

Видно, что с ростом энергии ионов и их зарядов реализуется существенный рост объемов, также влия-

ет и заряд для ионов бора и углерода (рис. 1а) и на глубину залегания объемов НС (рис 1б, в).

Для случая действия ионов азота и алюминия на магниевый сплав определяющее влияние оказывает энергия и заряд иона (рис. 2а), причем глубина его залегания растет существенно с ростом энергии и заряда ионов. Максимальная глубина на которой существует нанокластер составляет $1,2 \cdot 10^{-7}$ м, тогда как минимальная $2,32 \cdot 10^{-9}$.

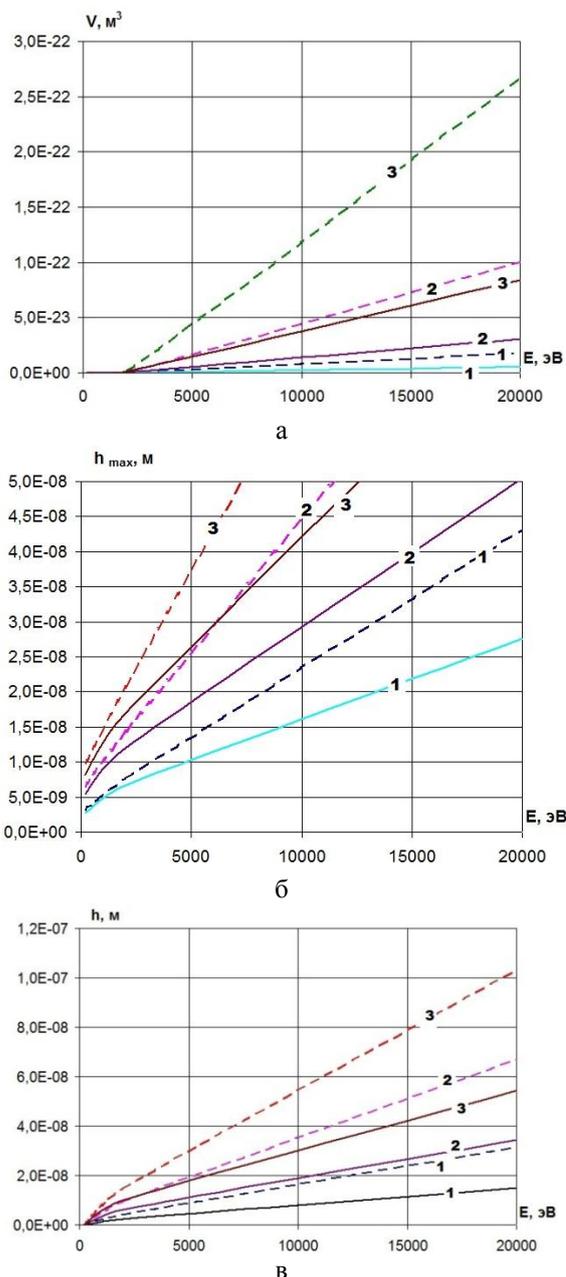


Рис. 2 – Объем нанокластера – V (а), максимальная – h_{max} (б) и минимальная – h (в) глубина его залегания в зависимости от энергии ионов азота (–) и алюминия (–) на магниевый сплав (1- $Z=1$, 2- $Z=2$, 3- $Z=3$)

Аналогичные зависимости для случая действия ионов ванадия и хрома представлены на рисунке 3. Видно, что энергия, также и заряд иона влияют существенно (рис. 3а), тогда как переход от ванадия к хрому прак-

тически не изменил характера и численного значения величин.

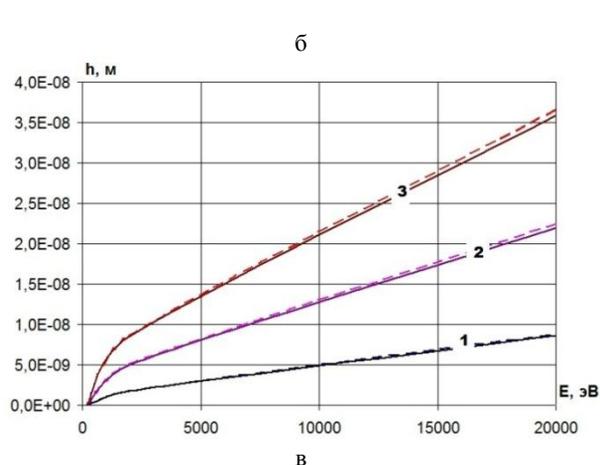
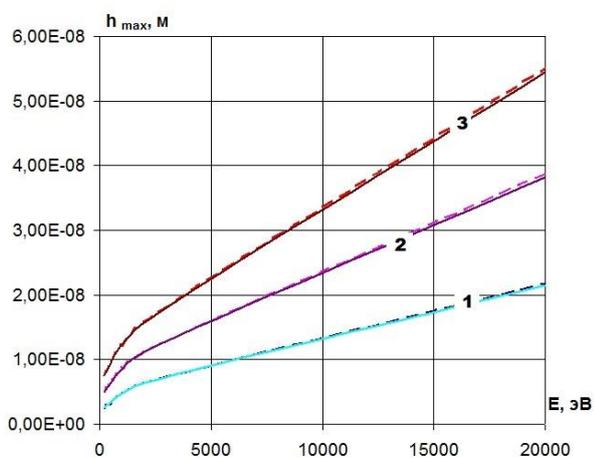
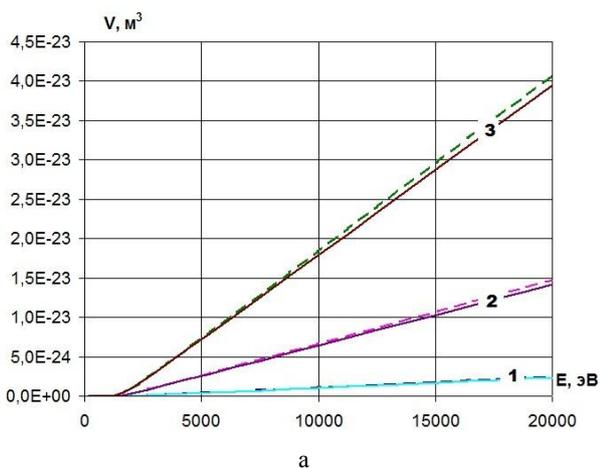


Рис. 3 – Объем нанокластера – V (а), максимальная – h_{\max} (б) и минимальная – h (в) глубина его залегания в зависимости от энергии иона ванадия (---) и хрома (—) на магниевый сплав (1- $Z=1$, 2- $Z=2$, 3- $Z=3$)

То же самое наблюдается и для глубин залегания НК, причем на глубину залегания существенно влияет энергия и заряд иона. В случае действия ионов кислорода и железа объем нанокластера также существенно зависит от энергии и заряда (рис. 4а), и глубины залегания нанокластера (максимальная и минимальная) – (рис. 4б,в).

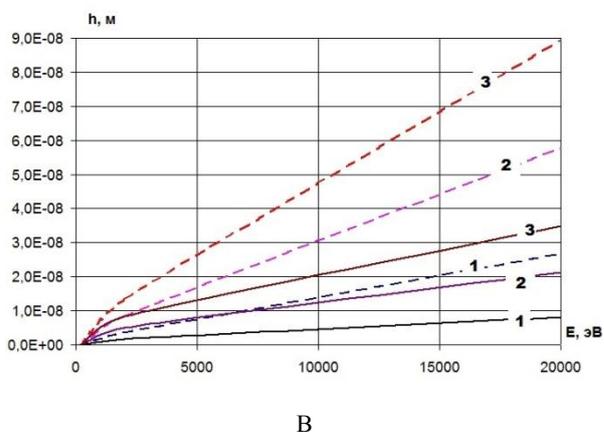
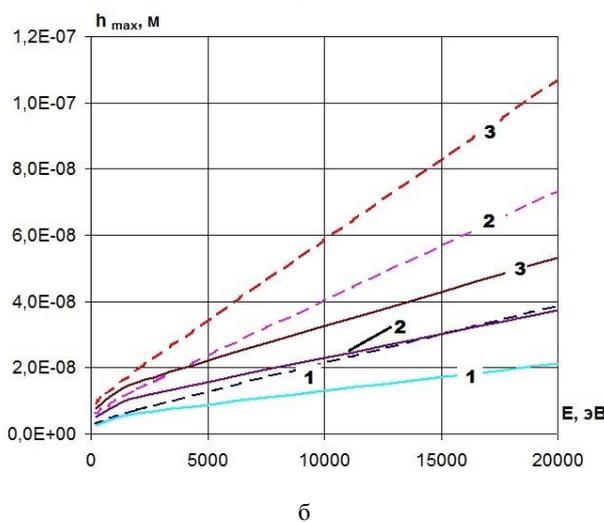
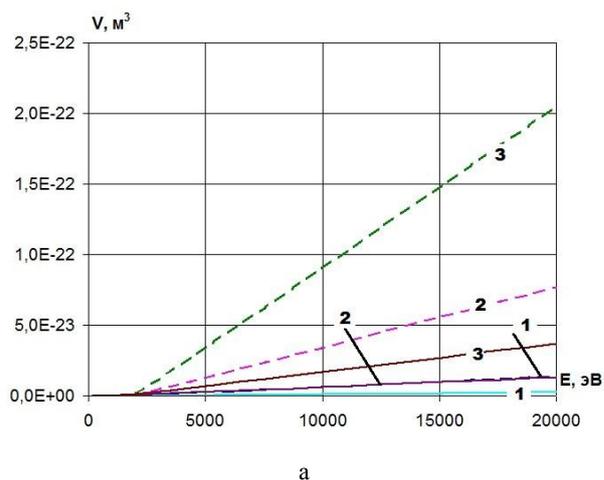
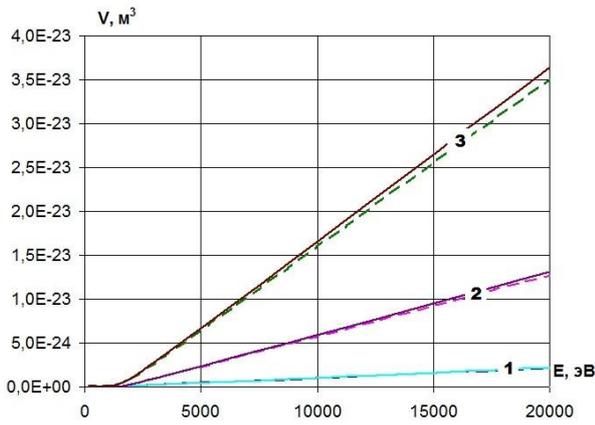
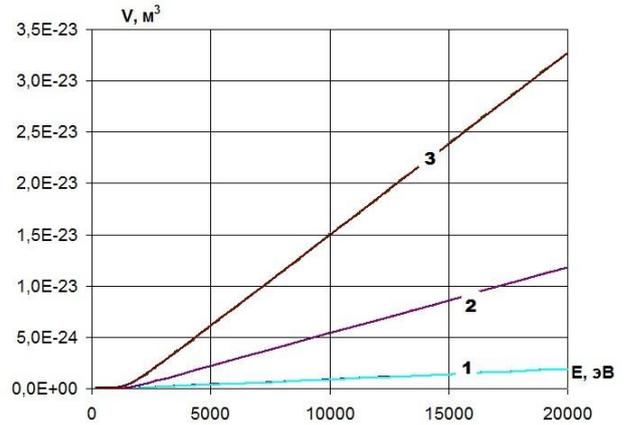


Рис. 4 – Объем нанокластера – V (а), максимальная – h_{\max} (б) и минимальная – h (в) глубина его залегания в зависимости от энергии иона кислорода (---) и железа (—) на магниевый сплав (1- $Z=1$, 2- $Z=2$, 3- $Z=3$)

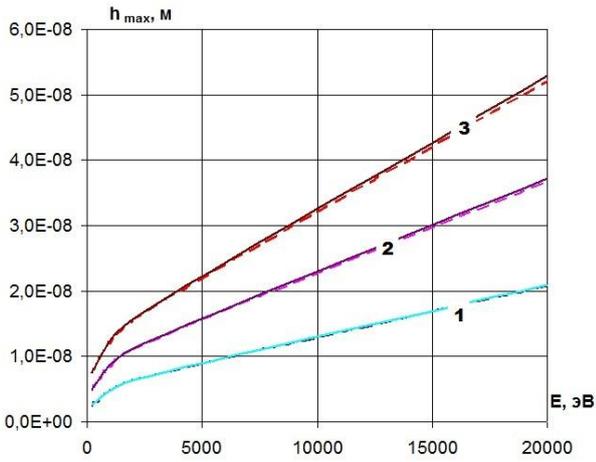
Действие ионов никеля и кобальта позволяет получать нанокластеры довольно значительных размеров, причем их величина существенно зависит от энергии и заряда иона. Такое же влияние испытывают и максимальная и минимальная глубины залегания НК (рис. 5б, в), но переход от никеля к кобальту практически не меняет ни объема нанокластера, ни глубины его залегания.



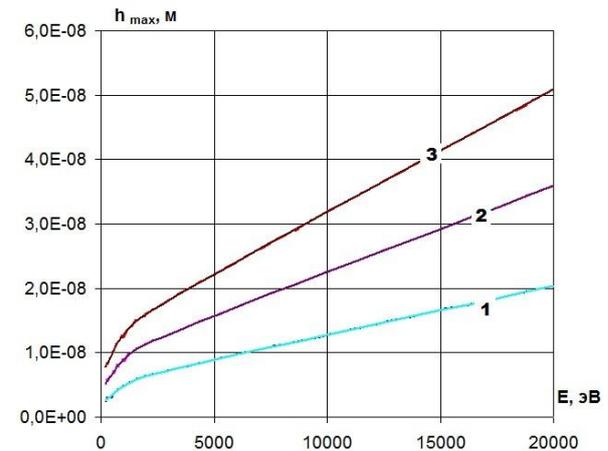
а



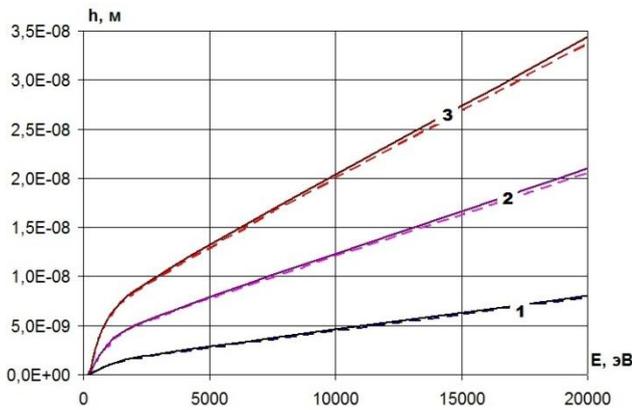
а



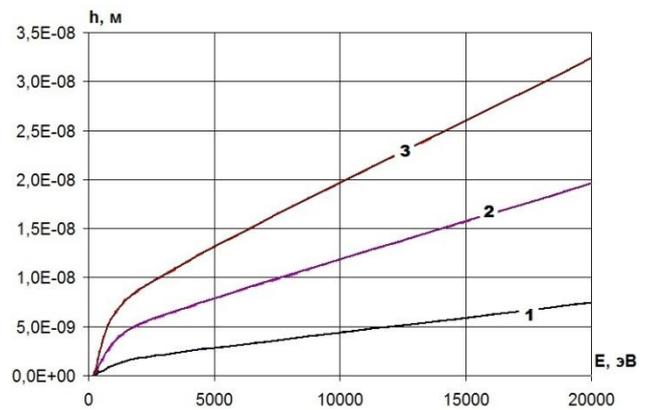
б



б



в



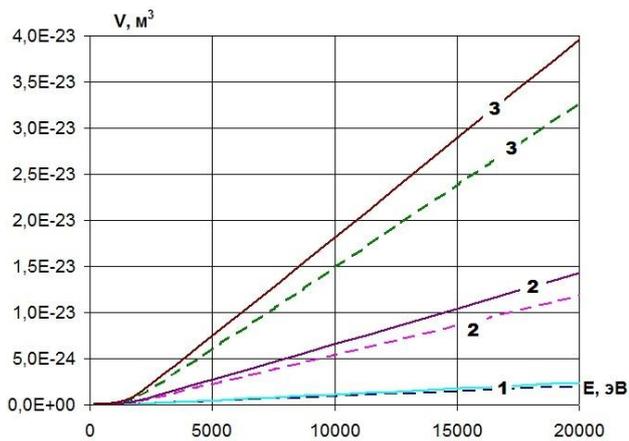
в

Рис. 5 – Объем нанокластера – V (а), максимальная – h_{\max} (б) и минимальная – h (в) глубина его залегания в зависимости от энергии иона никеля (--) и кобальта (--) на магниевый сплав (1- $Z=1$, 2- $Z=2$, 3- $Z=3$)

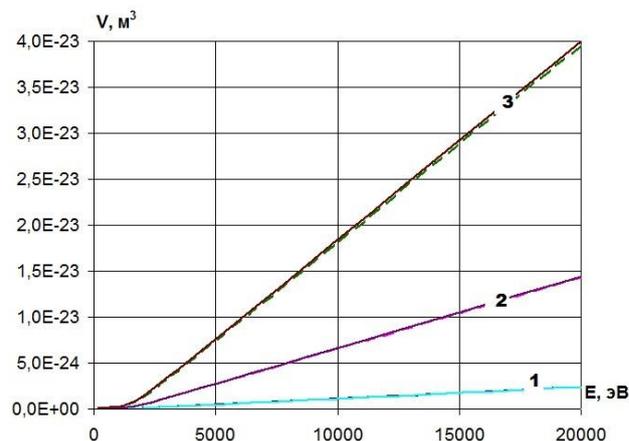
Рис. 6 – Объем нанокластера – V (а), максимальная – h_{\max} (б) и минимальная – h (в) глубина его залегания в зависимости от энергии иона иттрия (--) и циркония (--) на магниевый сплав (1- $Z=1$, 2- $Z=2$, 3- $Z=3$)

Аналогичные зависимости для случая действия ионов иттрия и циркония представлены на рисунке 6, также наблюдается определяющая зависимость объема (рис. 6а) и глубин его залегания (рис. 6б, в) от энергии и заряда иона, тогда как переход от иона иттрия к иону циркония эти зависимости не изменяет.

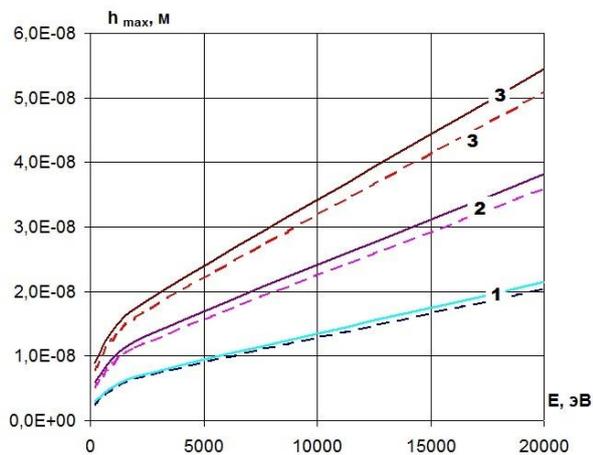
В случае действия ионов молибдена и гафния на магниевый сплав объем (рис. 7а) и глубина залегания (рис. 7б, в) нанокластера существенно зависят от энергии и заряда иона. В этом случае для этих ионов величины разные.



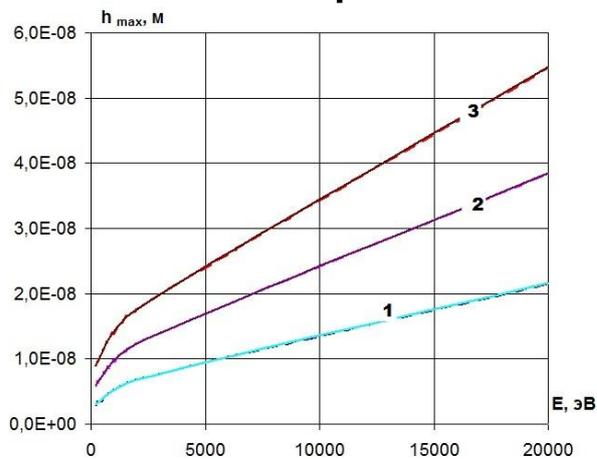
а



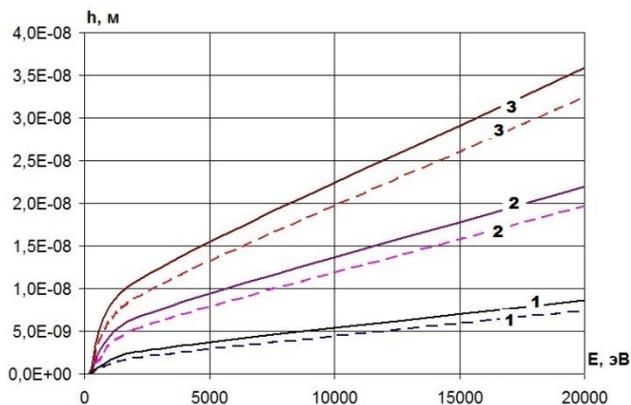
а



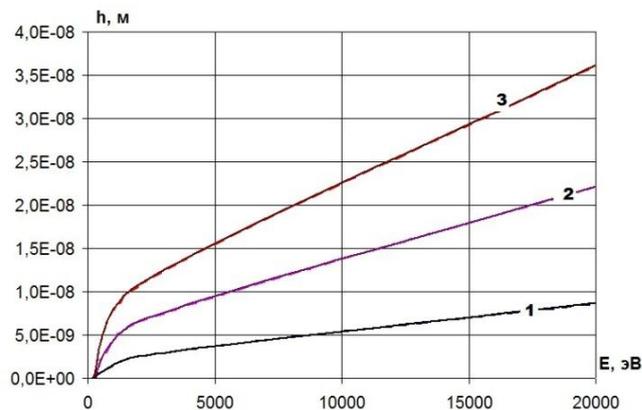
б



б



в



в

Рис. 7 – Объем нанокластера – V (а), максимальная – h_{\max} (б) и минимальная – h (в) глубина его залегания в зависимости от энергии ионов молибдена (--) и гафния (--) на магниевый сплав (1-Z=1, 2-Z=2, 3-Z=3)

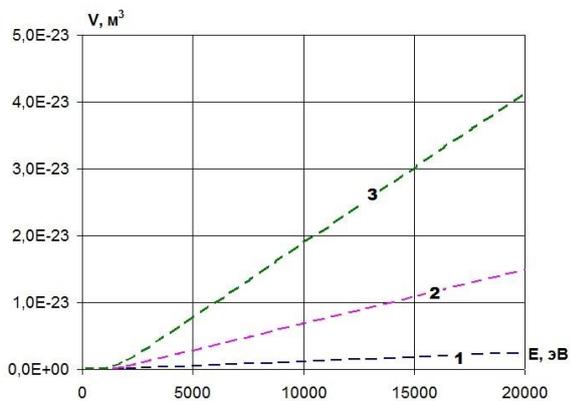
Тогда как для случая действия тантала и вольфрама влияние сорта иона практически отсутствует, а замечено определяющее влияние энергии и заряда иона (рис. 8).

Рис. 8 – Объем нанокластера – V (а), максимальная – h_{\max} (б) и минимальная – h (в) глубина его залегания в зависимости от энергии ионов тантала (--) и вольфрама (--) на магниевый сплав (1-Z=1, 2-Z=2, 3-Z=3)

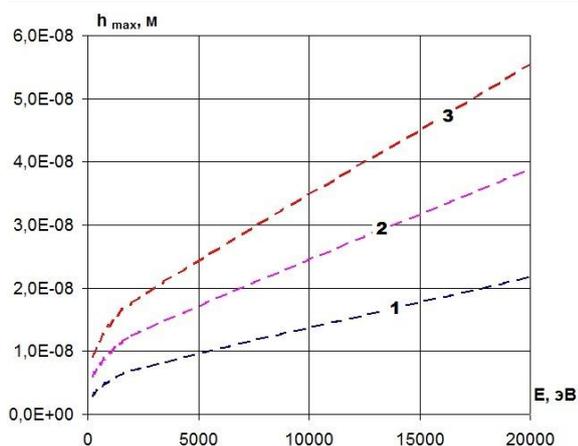
При действии платины на магниевый сплав также отмечается высокое влияние энергии и заряда иона на величины объема и глубины его залегания (рис. 9).

Полученные зависимости будут необходимы для определения потребной плотности тока соот-

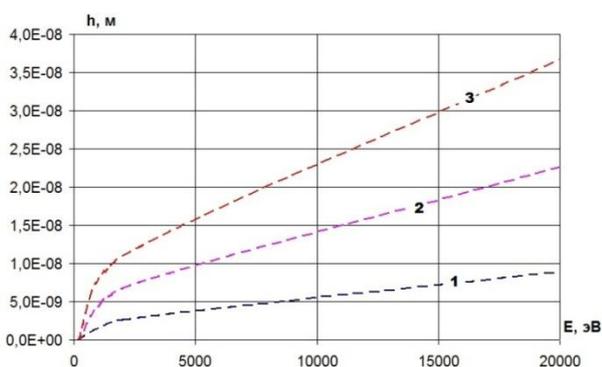
ветствующего сорта, заряда и энергии для полного заполнения слоя наноструктурами, а, выбрав необходимые энергии, заряды и сорта ионов для получения наноструктур в основном требуемой толщины, аналогично проводим оценки требуемых плотностей токов в каждом слое.



а



б



в

Рис. 9 – Объем нанокластера – V (а), максимальная – h_{\max} (б) и минимальная – h (в) глубина его залегания в зависимости от энергии ионов платины (---) на магниевый сплав (1-Z=1, 2-Z=2, 3-Z=3)

Зная объем, занимаемый наноструктурой при соответствующих энергиях, сортах и зарядах ионов

и диапазон глубин, на которых этот объем находится, очевидно можно оценить плотность ионного тока.

Тогда по известным диапазонам глубин залегания зон, где образуются наноструктуры, выбираем энергии, сорта и зарядности ионов для полного заполнения объема по глубине, т.е. так, чтобы они дополняли друг друга. Далее определяем плотность тока каждого из сортов иона и заряда, чтобы максимально заполнить необходимый объем поверхностного слоя детали наноструктурами (желательно, чтобы окончание первого слоя было началом второго, окончание второго – началом третьего слоя, и так далее). Тогда для любого i-го слоя плотность тока определяется как

$$j_i = \frac{h_{i2} - h_{i1}}{V_{HCi}} z_i e,$$

где h_{i1} и h_{i2} – начальная и конечная координаты зоны, где реализуются наноструктуры для i-го иона; V_{HCi} – объем зоны, где образуются наноструктуры; z_i – зарядовое число i-го иона; e – заряд электрона.

Зная j_i , V_{HCi} , h_{i1} , h_{i2} и z_i и выбрав E_i , мы можем сформировать необходимое количество потоков ионов, позволяющих получить наноструктурированный слой требуемой толщины, а с учетом технической задачи формирования немонотонных разноразрядовых потоков ионов можно решить задачу по технологическим параметрам ионной обработки.

Выводы.

1. Показана принципиальная возможность конструирования поверхностного слоя в магниевом сплаве за счет создания наноструктур различного состава и физико-механических характеристик

2. Видно, что определяющее влияние на объем нанокластера оказывает энергия иона и его заряд, в то же время влияет и масса иона, правда не так существенно.

3. Глубина залегания нанокластера достигает десятых долей микрометра, то есть слой материала испытывающего существенные изменения довольно значительный, а если учесть и возможность диффузии ионов и даже аномальной диффузии, то можно получить слои с измененными характеристиками уже в пределах нескольких микрометров.

4. Видно, что для ряда пар ионов при действии на магниевый сплав сорт иона не оказывает влияние на зависимости объема нанокластера и глубины его залегания от энергии и заряда. Такими парами являются: «ванадий-хром», «никель-кобальт», «иттрий - цирконий», «тантал-вольфрам».

Список литературы: 1. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с. 2. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с. 3. Костюк,

Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с. **4.** Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с. **5.** Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокртия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с. **6.** Костюк, Г.И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с. **7.** Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с. **8.** Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с. **9.** Костюк, Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с. **10.** Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с. **11.** Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с. **12.** Хаякава, С. Ядерно-физический аспект: в 2 кн. [Текст] / С. Хаякава. – М.: Мир, 1973. – Кн. 2. – 701 с. **13.** Готт, Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст] / Ю.В. Готт. – М.: Атомиздат, 1978. – 271 с. **14.** Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А.И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с. **15.** Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с. **16.** Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – No 2. – С. 119 – 130. **17.** Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, No 1. – С.50 – 56. **18.** Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // ЖТФ. –2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.

Bibliography (transliterated): 1. Kostyuk, G.I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskkiye kharakteristiki nanostruktur [Tekst]: monogr.* G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. - 472 p. Print. 2. Kostyuk, G.I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy [Tekst]: monogr.* G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. - 648 p. Print. 3. Kostyuk, G.I. *Fiziko-tekhnicheskkiye osnovy nanoseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Tekst]* G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo AINU, 2002. - Kn.1: Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennyykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy. - 596 p. Print. 4. Kostyuk, G.I. *Fiziko-tekhnicheskkiye osnovy nanoseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Tekst]* G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo AINU, 2002. - Kn. 2: Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya. - 482 p. Print. 5. Kostyuk, G.I. *Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost'* [Tekst]: *ucheb.posobiye* G.I. Kostyuk. - Kharkov.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. - 406 p. Print. 6. Kostyuk, G.I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy [Tekst]: *ucheb.posobiye** G.I. Kostyuk. - Kharkov.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2008. - 552 p. Print. 7. Kostyuk, G.I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: monogr.-sprav.* G.I. Kostyuk. - Kharkov.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. - 633 p. Print. 8. Kostyuk, G.I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: sprav.* G.I. Kostyuk. - Kiev: Vid-vo AINU, 2003. - 412 p. Print. 9. Kostyuk, G.I. *Fiziko-tekhnicheskkiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva [Tekst]: *ucheb.posobiye** / G.I. Kostyuk. - Kharkov.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2006. - 614 p. Print. 10. Grechikhin, L.I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologiy [Tekst]* L.I. Grechikhin. - Moscow: UP «Tekhnoprint», 2004. - 397 s. Print. 11. Akse- nov, I.I. *Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy [Tekst]* / I.I. Akse- nov. - X.: Izd-vo NII «XFТИ», 2005. - 211 s. Print. 12. Khayakava, S. *Yaderno-fizicheskiy aspekt: v 2 kn. [Tekst]* / S. Khayakava. - Moscow: Mir, 1973. - Kn. 2. - 701 p. Print. 13. Gott, YU.V. *Vzai- modeystviye chastits s veshchestvom v plazmennyykh issledovaniyakh [Tekst]* / YU.V. Gott. - M.: Atomizdat, 1978. - 271 p. Print. 14. Gusev, A.I. *Nanokristallicheskiye materialy: metody polucheniya i svoystva [Tekst]* / A.I. Gusev. - Yekaterinburg: Izd-vo RAN, Ural'skoye otd-niye, 1998. - 302 p. Print. 15. Gusev, A.I. *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii [Tekst]* / A.I. Gusev. - M.: Fizmatlit, 2005. - 416 p. Print. 16. Reshetnyak, Ye.N. *Sintez uprochnyayushchikh nanostruk- turnykh pokrytiy [Tekst]* / Ye.N. Reshetnyak, A.I. Strel'nitskiy // *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki.* - 2008. - No 2. - pp. 119 - 130. Print. 17. Andriyevskiy, R.A. *Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Tekst]* / R.A. Andriyevskiy // *Fizika metallov i metallovedeniye.* - 2003. - Vol. 91, No 1. - pp.50 - 56. Print. 18. *Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnykh plenok boridov tanala [Tekst]* / A.A Goncharov, P.I. Ignatenko, V.V. Petukhov i dr. // *ZHTF.* -2006. - Vol. 76, Publ. 10. - pp. 82 - 87. Print.

Поступила (received) 30.03.15

Костюк Геннадий Игоревич – док. техн. наук, проф. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Миргородская Екатерина Викторовна – инженер НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06; e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Мелкозерова Ольга Михайловна – канд. техн. наук, ассист. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НАРОСТОУТВОРЕННЯ ТА ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ЗА ДОПОМОГОЮ РЕОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

В даній статті розглянуто вплив зношення ріжучого інструмента (при змінні радіуса заокруглення ріжучої кромки) на силу різання і температуру в зоні стружкоутворення при різних швидкостях різання, а також вплив висоти наросту на температуру та силу різання також при різних швидкостях різання. Данні отримані на базі методу кінцевих елементів за допомогою програмного продукту DEFORM 2D.

Ключові слова: наростутворення, знос ріжучого інструмента, метод кінцевих елементів, температура, сила різання.

Вступ. Одним і найбільш важливим показником експлуатації різального інструменту є його працездатність, визначальна стан, при якому ріжучий інструмент виконує свою роботу, маючи знос робочих поверхонь, менший критичного значення. Забезпечити максимізацію працездатності, значить підвищити зростання продуктивності праці, заощадити дорогий матеріал, енергію і трудоу ресурси. Працездатність різального інструмента може бути підвищена завдяки такій зміні поверхневих властивостей інструментального матеріалу, при якому контактна поверхня інструмента буде найбільш ефективно чинити опір абразивного, адгезійними, корозійно-окислювальному та інших видів зносу як при кімнатній, так і при підвищеній температурі. Так само інструментальний матеріал повинен володіти достатнім запасом міцності при стисненні, вигині, додатку ударних навантажень

Ріжучий інструмент в процесі різання впливає на оброблений матеріал і викликає утворення стружки і формування нової поверхні, однак сам при цьому піддається впливу з боку оброблюваного матеріалу і інтенсивно зношується. Ріжучі інструменти працюють в надзвичайно важких умовах дії величезних тисків на поверхнях контакту і високої температури.

Механізм зносу інструменту при різанні металів складний і включає в себе абразивний, адгезійний і дифузійний знос. Питомий вплив кожного з них залежить від властивостей матеріалу, інструменту, деталі і умов обробки (насамперед швидкості різання).

При обробці різанням заготовок із пластичних металів на передній поверхні інструмента може утворюватися шар металу, який називають наростом.

Більшість дослідників (Я.Г. Усачов, О.М. Розенберг, М.М. Зорев, М.Ф. Полетика та ін.) відзначають подвійну – позитивну і негативну роль наросту у процесі різання. З одного боку, нарост захищає найбільш уразливу частину інструменту – різальну кромку і прилеглі до неї ділянки передньої та задньої поверхонь від зношування, теплових перевантажень і надмірних контактних напружень. Крім того, збільшуючи передній

кут, тобто, зменшуючи кут різального клину, нарост поліпшує напружено-деформований стан процесу. Проте, тут слід зауважити, що одночасне значне збільшення радіуса округлення кромки наросту спричиняє зворотній процес. З іншого боку, нульові значення заднього кута і періодичні зриви частинок тіла наросту та їх відхід через задню поверхню різко погіршують характеристики якості обробленої поверхні: шорсткість, точність та фізико-механічні властивості [3].

Нарост істотно впливає на процес різання і якість обробленої поверхні заготовки, тому що при його наявності змінюються умови стружкоутворення. Нарост може позитивно впливати на процес різання. Він змінює форму передньої поверхні інструмента, що призводить до збільшення переднього кута, а отже, до зменшення сили різання. Внаслідок високої твердості нарост здатний різати метал. Він віддаляє центр тиску стружки від різальної кромки, внаслідок чого зменшується зношування різального інструмента по передній поверхні.

Аналіз останніх досліджень та літератури.

З огляду технічної літератури, можна зробити висновок, що дослідженням процесу наростутворення та, ще у більшій мірі, зношенню ріжучого інструмента, приділяється велика увага. На сьогодні, дані дослідження, раціонально проводити за допомогою методу кінцевих елементів.

Метою даної статті є дослідження впливу зношування інструмента та наростутворення на температурні та силові характеристики процесу різання на базі методу кінцевих елементів.

Виклад основного матеріалу.

На практиці найчастіше спостерігається одночасне знос інструмента по задній і передній поверхні [1]. Очевидно, що при цьому відбувається заокруглення ріжучого леза інструмента. Для даного виду зношення проведено ряд моделювань в програмі Deform 2D з метою дослідження впливу радіуса заокруглення ріжучої кромки на температуру та силу різання в зоні стружкоутворення.

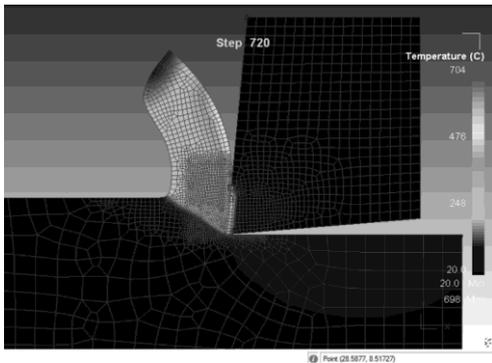


Рис. 1 - Модель оброблення заготовки без радіуса заокруглення

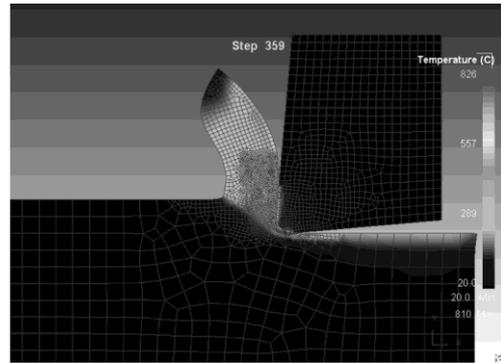


Рис. 2 - Модель оброблення заготовки з радіусом заокруглення

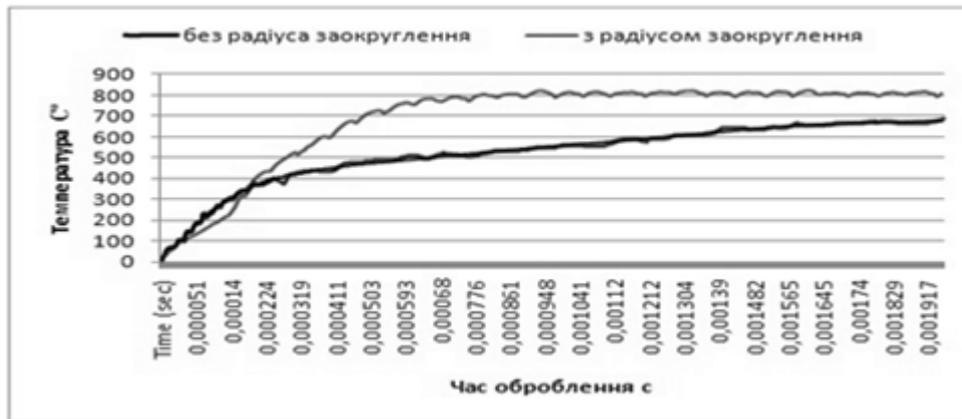


Рис. 3 - Графік залежності температури, в зоні стружкоутворення, від радіуса заокруглення ріжучої кромки при режимах-подача $S=0,25\text{ мм}$; швидкість різання $V=120\text{ мм/хв}$, при обробленні сталі 40 (визначений на основі аналізу імітаційних реологічних моделей в системі Deform 2D)

Аналізуючи графік, наведений на рис. 3, можна зробити висновок про те, що при одночасному зношуванні інструмента по задній та передній поверхні, радіус заокруглення ріжучої кромки має суттєвий вплив на величину температури в зоні різання, а саме: при обробленні сталі 40 температура збільшується на 10-15%

Зношування різального інструмента призводить не тільки до зниження точності розмірів і геометричної форми оброблених поверхонь. Робота інструментом зі значним радіусом заокруглення викликає зростання сили різання [3]. Відповідно, збільшуються складові сили різання, які викликають підвищену деформацію заготовки та інструмента, що зменшує точність і змінює форму оброблених поверхонь заготовок. На рис. 4 наведені графік залежності сил різання від величини зношування ріжучого інструмента.

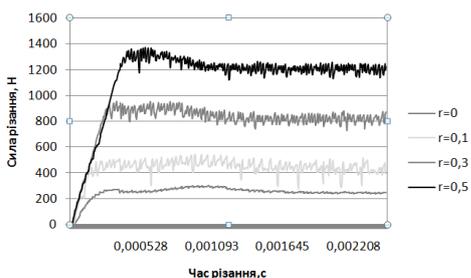


Рис. 4 - Графік залежності сил різання від радіуса заокруглення ріжучої кромки при обробленні сталі 40.

Аналізуючи графік, наведений на рис. 4, можна зробити висновок про те, що радіус заокруглення, який виникає при зношуванні різця, суттєво впливає на силу різання, а саме: сили різання зростають вдвічі після виникнення зносу інструмента з утворення радіуса при вершині ріжучої кромки. Також видно, що на кривих $r_2=0,1$; $r_3=0,3$ та $r_4=0,5$ (мм) відбувається збільшення коливання сили, що, в свою чергу, призводить до зростання коливань інструмента

Процес виникнення наростоутворення схематично можна представити наступним чином. При визначених температурах і високих тисках в зоні різання, хімічно чисті поверхні стружки і інструмента підлягають адгезійному прихопленню: відбувається міцне приєднання контактного шару стружки до передньої поверхні інструмента і виникнення загальмованого шару. Обтікання даного шару стружкою сприяє виникненню нових загальмованих шарів метала, які нарастають один на одного, доки нарост не досягає розмірів, максимально можливих при даних умовах.[2]

На рис. 5 наведено графік залежності температури від часу оброблення при різних розмірах наросту.

З графіка (рис. 5) можна зробити висновок, що наростоутворення невеликих розмірів не має суттєвого впливу на температуру в зоні різання.

Проте, при виникненні наросту, який за розмірами буде наближений до максимального, в певних умовах різання, температура буде збільшувати своє значення.

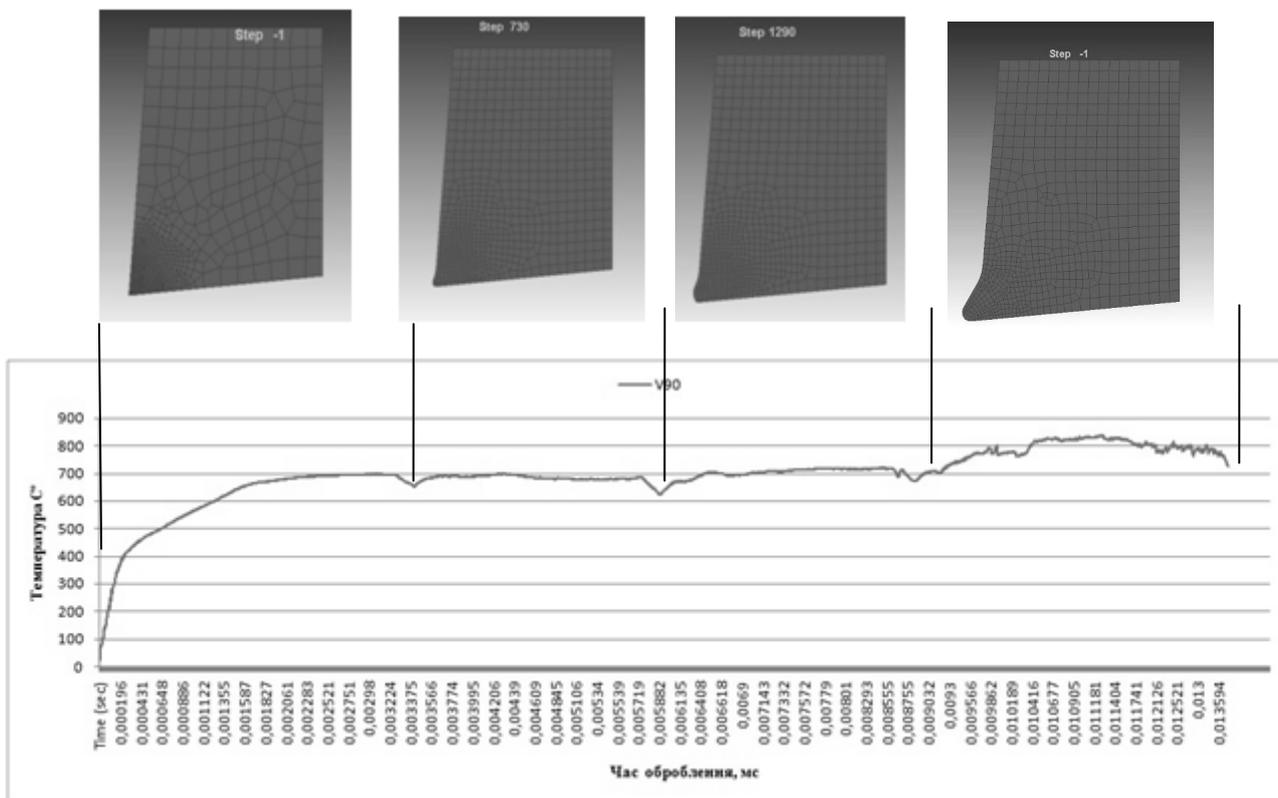


Рис. 5 - Графік залежності температури від часу оброблення при різних величинах наросту під час оброблення сталь 40 (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=90$ мм/хв) визначена на основі аналізу реологічних імітаційних моделей в системі Deform 2D

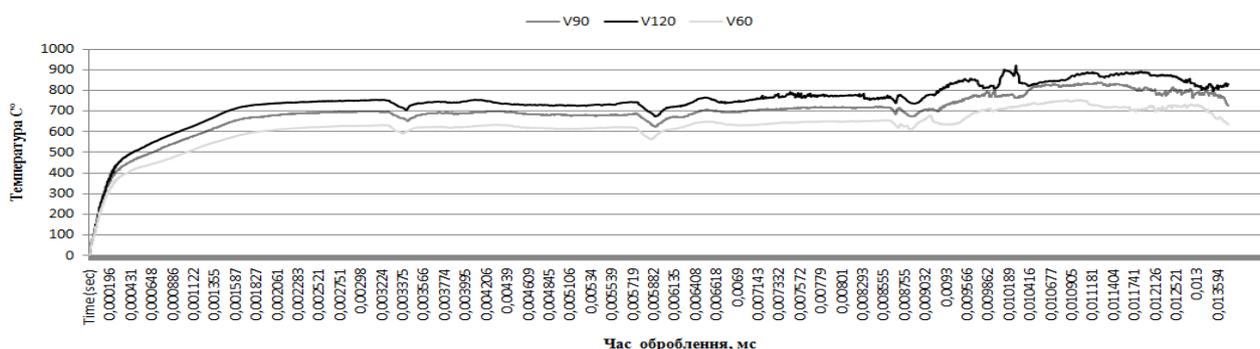


Рис. 6 - Графік залежності температури від часу оброблення при обробленні сталь 40 (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V_1=60$ м/хв, $V_2=90$ м/хв, $V_3=120$ м/хв)

Для порівняння температур при різних швидкостях різання а саме $V_1=60$ м/хв, $V_2=90$ м/хв, $V_3=120$ м/хв наведено графік (рис. 6).

Аналізуючи графік, наведений на рис. 6, можна зробити висновок про те, що швидкість різання впливає на температуру в зоні стружкоутворення, а саме при збільшенні швидкості різання від 60м/хв до 90м/хв різниця температури збільшується на 10%. Аналогічна картина спостерігається при зміні швидкості від значення 90 м/хв до значення 120 м/хв.

Виникнення наросту змінює умови роботи інструмента. Оскільки нарост виконує функцію ріжучого клина, інструмент працює фактично з переднім кутом γ_ϕ , значно більшим, від кута заточування

γ , причому чим більша висота нароста, тим більша різниця γ_ϕ і γ . Тому фактичне збільшення переднього кута зменшує деформації ріжучого шару і сили різання [3]. На рис. 7 наведені графіки залежності сили різання від величини наросту різального інструмента при обробленні конструкційної сталі 40 (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=60$ мм/хв).

Аналізуючи даний графік, можна зробити висновок, що нарост не суттєво впливає на силу різання при обробленні сталі 40. Це пояснюється тим, що (як було наведено вище) він виконує функції ріжучого елемента при чому з відмінним від початкового значення кута різання, який, в свою чергу, зменшує силу різання.

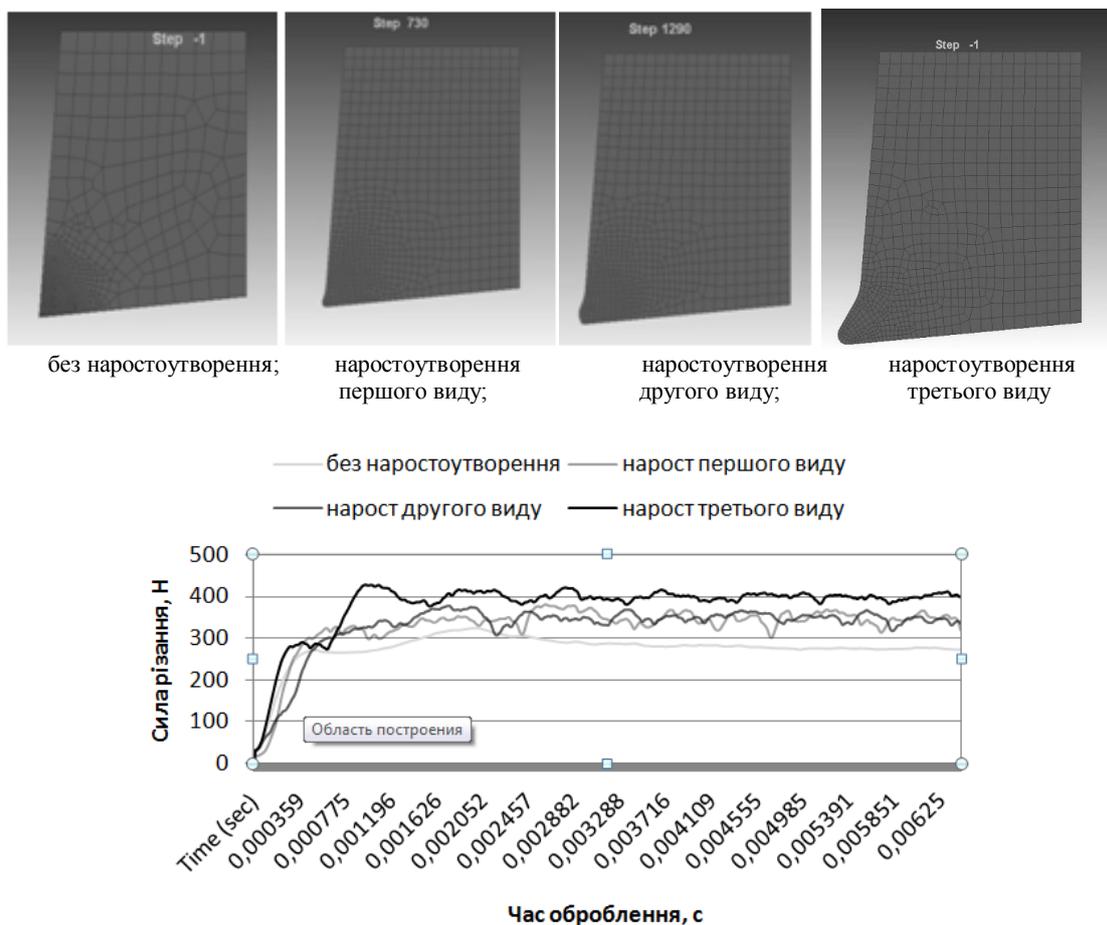


Рис. 7 - Графіки залежності сили різання від величини наросту різального інструмента при обробленні конструкційної сталі 40, визначені на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D.

Аналізуючи даний графік, можна зробити висновки, що нарост не суттєво впливає на силу різання при обробленні сталі 40. Це пояснюється тим, що (як було наведено вище) він виконує функції ріжучого елемента при чому з відмінним від початкового значення кута різання, який, в свою чергу, зменшує силу різання.

Висновки.

Проаналізувавши вплив зношування інструмента та наростоутворення, які виникають на ріжучому лезі під час оброблення сталі 40, на реологічні властивості матеріалів, можна зробити висновки, що зношування інструменту має суттєве значення на формування силових та температурних характеристик в зоні різання. Ріжучі інструменти працюють в надзвичайно важких умовах дії високих тисків на поверхнях контакту і високої температури. Тому при вирішенні задач, пов'язаних з імітаційним моделюванням процесів різання вкрай важливо враховувати динамічні процеси зношування та наростоутворення на лезі різального інструменту.

Список літератури: 1. Старков В.К. Физика и оптимизация реза-

ния материалов / В.К. Старков.- М.: Машиностроение, 2009.-640 с. 2. Ступницький В.В. Дослідження залежності напружено-деформованого стану заготовки від переднього кута різального клина на основі реологічного моделювання процесу різання/ В.В. Ступницький, А.М.Кук // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць.- Вип.9.- Харків: вид-во НТУ «ХП», 2014. - с. 98-110. 3. Ступницький В.В. Моделювання напружено-деформованого стану матеріалу в зоні різання для структурно-параметричної оптимізації технологічної операції токарного оброблення / В.В. Ступницький // "Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні".- Львів: Вид-во НУ«ЛП», No713, 2011.- с. 45-49.

Bibliography (transliterated): 1. Starkov V.K. *Physics and optimization of cutting materials*. K. Starkov.- Moscow: Publishing Office «Engineering», 2009.-640 p. 2. Stupnytskyy V.V., A.M.Kuk. *Investigation of the stress-strain state of the workpiece from the front angle of the cutting wedge based on rheological modeling of cutting. Modern technologies in engineering.*- Kharkov: Publishing Office NTU «KHPI», Vol.9, 2014. - pp. 98-110. 3. Stupnytskyy V.V. *The modeling of the stress-strain state of the material in the cutting zone for structural and parametric optimization of the operation lathe processing. Optimization of production processes and technical control in engineering and instrument-making.*- Lviv: Publishing Office NTU «LP», No713, 2011. pp. 45-49

Поступила (received) 31.03.2015

Ступницький Вадим Володимирович – канд. техн. наук, доц. НУ «ЛП», Львів, тел.: (067)-748-16-73, e-mail: stupn@i.ua;

Долиняк Ярослав Віталійович— аспірант, НУ «ЛП», Львів, e-mail: yaroslavdol@i.ua.

В.Т. Лебедь, Н.В. Тарельник, О.Н. Лашкарев, Ропьяк Л.Я.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СОСТАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Приведен анализ проблем и существующих методов повышения надежности неподвижных соединений. Для повышения качества крупногабаритных составных изделий предложена технология нанесения в области торцов охватываемых деталей на контактирующие поверхности сопрягаемых деталей, методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) комбинированного покрытия: мягкого, например, из бронзы, и твердого - сплавы группы ВК (или ТК). Прогнозируется повышение работоспособности крупногабаритных составных изделий (зубчатых колес, прокатных валков, универсальных шпинделей) до 24% при промышленной реализации технологии нанесения комбинированных покрытий на посадочную поверхность охватываемой детали.

Ключевые слова: метод, повышение надежности, неподвижные соединения, крупногабаритные составные изделия, технология нанесения комбинированных покрытий, посадочная поверхность, охватываемая деталь.

Введение. Профильная номенклатура ряда заводов тяжелого машиностроения [1], в своей основе базируется на изготовлении горнорудного, металлургического, прокатного, кузнечно-прессового и подъемно-транспортного оборудования.

Значительная часть выпускаемой продукции (до 30% объема) - это крупногабаритные изделия, которые в большинстве своем изготавливают в составном варианте.

Технологические процессы изготовления и реинжиниринга крупногабаритных составных изделий (КГСИ) базируются на одной из основных операций - сборке охватывающих и охватываемых деталей, соединение которых обеспечивается гарантированным натягом (рис. 1, выделенная колонка). К таким изделиям, подлежащим процессам реинжиниринга, относятся крупногабаритные зубчатые колеса, прокатные валки, универсальные шпиндели [2].

Изучение и анализ состояния изделий после отработки ресурса рядом типоразмеров рассматриваемым изделий показывают, что до 20 % вывода изделий из эксплуатации связано с недостаточной надежностью фиксации охватывающей детали на охватываемой, что в ряде случаев влечет проворачивание (рис. 2,а), смещение (рис. 2,б) охватывающих деталей относительно охватываемых, например, в крупногабаритных составных прокатных валках (КГСПВ).

Постановка задачи. Повышение качества сопрягаемых соединений КГСИ является одной из важнейших задач в обеспечении надежности и долговечности данного класса изделий. Эта проблема решалась путем создания ряда дополнительных конструктивных, технологических и других видов и средств фиксации.

Процесс сборки неподвижных поверхностей КГСИ осуществляется нагреванием (охлаждением) охватывающей (охватываемой) детали с ее последу-

ющим соединением с охватываемой (охватывающей) деталью [3].

Материалы исследований. Исходя из анализа стоимости изготовления и реинжиниринга КГСИ и их надежности (рис. 3) следует, что при высокой базовой надежности и небольших затратах на модернизацию влияние снижения надежности на увеличение общих затрат значительно меньше, чем при низкой стоимости проектирования и изготовления, и больших затратах на модернизацию оборудования.



а



б

Рис. 1 – Схемы проворота и смещения банджа относительно оси КГСПВ: а – проворот; б – смещение

Таблица 1. Характер распределения затрат по всему производственному циклу изготовления КГСПВ

	Жидкий металл	Пр-во отливки	Изг. поковки	Терм. обр-ка	Мех. об-ка черновая	Терм. обр-ка	Сборка	Мех. об-ка чистовая
Отн. уд. затраты	1,0	2,0	0,8	0,2	0,4	0,2	0,1	0,3

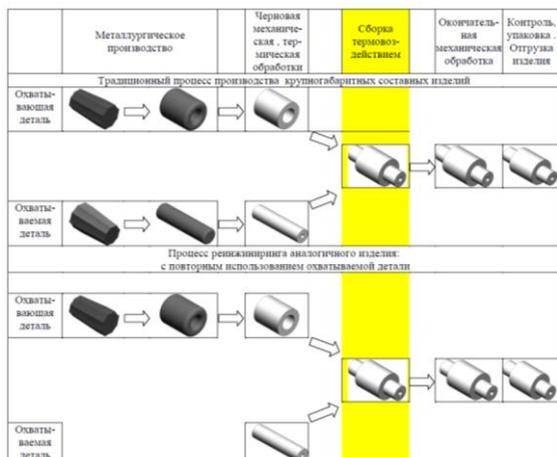


Рис. 2 – Основные положения «жизненного» цикла КГСИ вновь изготавливаемого и прошедшего впоследствии реинжиниринг

Анализ эффективности капиталовложений позволяет принять такие решения, при которых ограниченные ресурсы используются наилучшим образом, что позволяет сделать вывод о экономической и технической целесообразности проведения мероприятий по повышению качеству посадочных поверхностей охватываемых деталей путем нанесения покрытий с целью повышения качества соединения охватываемых и охватывающих деталей КГСИ.

Анализ удельных затрат показывает, что процесс сборки относительно остальных технологических операций составляет 0,1 (табл.1), однако качество соединения таких изделий во многом определяет их работоспособность.

В работе [5] отражены способы восстановления деталей сваркой, наплавкой, гальваническим наращиванием металлами, металлизацией, механической и слесарной обработкой, изменением размеров в результате пластического деформирования.

Однако вопрос повышения качества соединения КГСПВ, начиная от профилирования посадочных поверхностей охватывающих и охватываемых деталей этих изделий и нанесения покрытий недостаточно полно раскрыт. Типовая конструкция КГСПВ приведена на рис. 4.

Обзор источников технической информации показывает, что при анализе рынка сырья и возможностей потенциальных заказчиков появляется большой потенциал снижения затрат в процессе производства КГСПВ. Это позволяет изыскивать новые направления при разработке ресурсосберегающих технологий по рассматриваемой группе изделий.

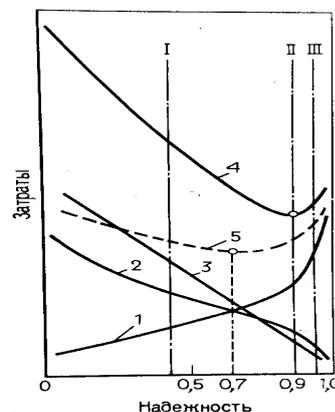


Рис. 3 – Изменения составляющих общих затрат в зависимости от заданной величины надежности

1, 2 и 3 – кривые, характеризующие затраты на проектирование и изготовление оборудования, на техническое обслуживание и ремонты, на модернизацию оборудования, соответственно; 4 и 5 – кривые, характеризующие общие затраты на достижение заданной надежности и без учета на модернизацию оборудования. Конструкция I – характеризуется низкой стоимостью проектирования и изготовления; конструкции II и III – характеризуются более высокой базовой надежностью

Для оценки величины трудоемкости изготовления деталей КГСПВ при подготовке их к сборке и общей обработке изделия были проанализированы поэлементные затраты при производстве этих деталей во вновь изготавливаемом варианте.

Изучению подлежали пять типоразмеров изделий близких по конструктивному исполнению (рис.4) в диапазоне масс от 20 до 116 тонн (20, 32, 75, 89, 116 т). При этом доля трудоемкости основных вновь изготовленных деталей в общем объеме производства указанной группы изделий составляет для: •бандажа 37-54%; •оси вала 17-34%; •окончательной механической обработки составного изделия 17-34 %.

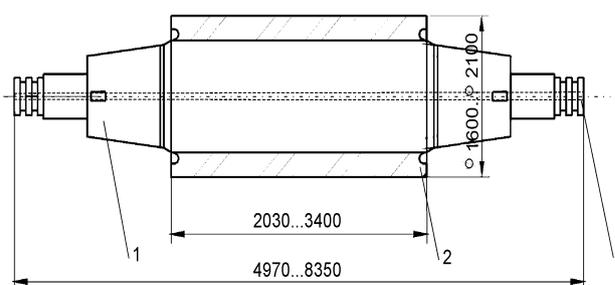


Рис. 4 – Базовая конструктивная схема составного крупногабаритного прокатного вала: 1- ось вала; 2 – бандаж (штулка); 3 – пробка оси

Реинжиниринг указанных деталей осуществляется по ряду схем [2].

Общей задачей как для вновь изготавливаемых крупногабаритных составных изделий, так и для их последующего реинжиниринга остается обеспечение качества соединения сопрягаемых охватывающих и охватываемых деталей.

Достигнутые результаты при нанесении различных видов покрытий позволили скорректировать конструкцию составного изделия и повысить качество соединения демонтированных КГСРВ

Анализ трудоемкости технологического процесса по нанесению покрытия на всю протяженность посадочной поверхности охватывающей детали затрагивает вопрос целесообразности 100 % покрытия. Проведено теоретическое изучение обеспечения равнозначных показателей прочности соединения от протяженности покрытия [6].

Теоретическими расчетами установлено, что реализация технологии комбинированного покрытия (чередование твердых и мягких кольцевых участков покрытия), обеспечивающей повышение коэффициента трения f до 0,30...0,40 увеличивает жесткость составного изделия до 10...15 %, повышает усилие распрессовки; уменьшает величину остаточного прогиба в 1,5...2,0 раза и зону распространения фреттинг-процесса на сопрягаемых поверхностях с 70 до 25 %; устраняет усталостное разрушение охватывающих деталей.

Известны многочисленные способы изменения качества поверхности деталей, один из них, например, изложен в [7]. Одним из перспективных является метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) [8, 9], при помощи которого достигается изменение твердости металлической поверхности путем нанесения на нее материала более высокой твердости или диффузионного введения в поверхностный слой необходимых химических элементов. Для понижения твердости наносятся на поверхность более мягкие материалы, а с целью повышения качества посадочной поверхности изделия из незакаленного металла, допускающего термическую обработку, возможно применение импульсов с большей энергией или более длительным циклом. Это позволяет достичь большей суммарной толщины слоя [10], что существенно улучшает прочностные характеристики изделия.

Предложен способ [7], обеспечивающий решение задачи путем формирования ЭЭЛ на предварительно термически обработанной посадочной поверхности детали поверхностного слоя при помощи графитового электрода.

Известно, что повышение качества сопряжения деталей неподвижных соединений КГСРВ возможно за счет нанесения специальных покрытий, изменяющих структуру контактирующих поверхностей. В [8] предложен способ обработки сопрягаемых поверхностей стальных (и/или чугунных) деталей базирующийся на нанесении методом ЭЭЛ покрытия из никеля, микротвердость которого меньше мик-

ротвердости материала рассматриваемых деталей. После этого на поверхностный слой из никеля этим же методом при аналогичных режимах электродами из твердых сплавов группы ВК (или ТК) наносятся кольцевые участки покрытия с интервалом и шириной от 4 до 6 мм (рис. 5).

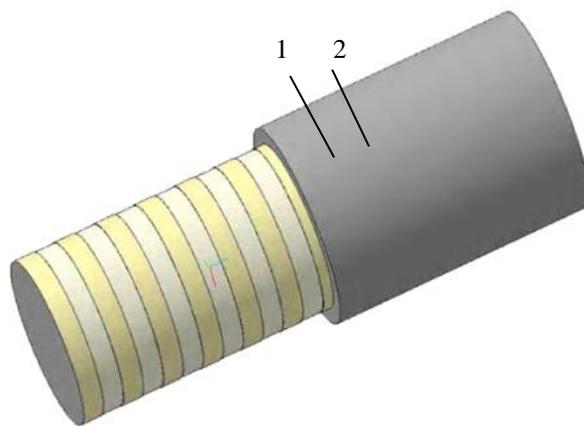


Рис. 5 – Поверхность охватываемой детали с кольцевыми участками электроэрозионных покрытий: 1 – твердым сплавом группы ВК (или ТК); 2 – никелем

Показатели прочности неподвижного соединения в сформированном последовательным нанесением никеля и твердого сплава ВК (или ТК) поверхностном слое обеспечиваются покрытием, состоящим из кольцеобразных участков (участки 1, 2, рис. 5). В данном случае образуется покрытие с твердым, износостойким и имеющим высокий (от 0,3 до 0,7) коэффициент трения поверхностным слоем, под ним находится слой, микротвердость которого ниже микротвердости основы. В процессе сборки твердый поверхностный слой вминается в нижележащий мягкий слой.

Согласно [10] предел выносливости образцов диаметром $d = 20$ мм из стали 40Х со ступицами диаметром $D = 37$ мм и длиной 90 мм, имеющих кольца из красной меди М2, повысился при чистом изгибе с частотой 50 Гц в 2 раза (с 150 до 300 МПа).

Повышение эффективности использования КГСРВ достигается путем нанесения методом ЭЭЛ на посадочные поверхности охватываемых деталей составных изделий комбинированных покрытий (твердых и мягких).

На качество покрытий при ЭЭЛ оказывают влияние множество факторов. При этом наиболее целесообразным следует считать режимы легирования.

В процессе исследований использовались цилиндрические образцы из стали 20 диаметром 38 мм и длиной 25 мм, соединенные проставками диаметром 25 мм и длиной 15 мм. Поверхности образца перед ЭЭЛ шлифовались до $Ra = 0,5$ мкм. ЭЭЛ производилось на механизированной установке модели «ЭИЛ-9» [10].

Реализация этого процесса исключает искажение исходной геометрической формы восстанавли-

ваемой (или упрочняемой) детали, а также поводки, что связано с особенностью процесса легирования (температура нагрева детали до 100 °С). Материал электродов - проволока марки БрО10Ф1.

Процесс ЭЭЛ осуществлялся бронзой марки БрО10Ф1 на механизированной установке «ЭИЛ-9» за два прохода при толщине слоя бронзы за один проход (0,17 - 0,18) мм.

Выводы

1. Для повышения качества неразъемных соединений (увеличения несущей способности, прочности охватываемых деталей составных изделий, снижения фреттинг-коррозии) разработаны технологии, связанные с введением в зону контакта сопрягаемых посадочных поверхностей деталей КГСИ комбинированных прослоек, состоящих из мягких и твердых материалов.

2. Согласно экспериментальным результатам прогнозируется повышение работоспособности КГСИ (зубчатых колес, прокатных валков, универсальных шпинделей) до 24% при промышленной реализации технологии нанесения комбинированных покрытий на посадочную поверхность охватываемой детали.

Список литературы: 1. Справочник единой номенклатуры промышленной продукции, изготавливаемой предприятиями Минтяжмаша / Утв. начальником ПЭУ Л.А. Бусяцкой - М.: 1984.- 176с. 2. Лебедь В. Т. Сборка крупногабаритных изделий ответственного назначения с использованием термовоздействия / В. Т. Лебедь, Б. М. Арпентьев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – No 2. – С. 74–82. 3. Лебедь В.Т. Технология тепловой сборки составных крупногабаритных деталей / В.Т. Лебедь, А.А. Кулаченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2004.- Вып. 28. – С. 84-94. 4. Плахтин В.Д. Термтехнология в металлургии. / В.Д. Плахтин - М.: «Металлургия», 1979, 84с. 5. Цеков В.И. Восстановление деталей металлургического оборудования / В.И. Цеков. – М. : Металлургия, 1977. – 152 с. 6. Лебедь В. Т. Оптимизация технологии нанесения покрытий в соединениях крупногабаритных составных валков для повышения несущей способности / В. Т. Лебедь, А. А. Кулаченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ

– Київ, 2008. – Вип. No 23. – С. 240–247. 7. Спосіб обробки сполучуваних поверхонь деталей (варіанти): Пат. 66105. Україна. МПК В23Н 1/00 /В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник; Опубл. 10.04.08, Бюл. No 7.-3 с. 8. Способ обработки сопрягаемых поверхностей стальных и/или чугунных деталей: Пат. 2410212. Российская Федерация. МПК В23Н 9/00 / В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, Е.В. Коноплянченко, И.А. Олейник; Опубл. 27.01.11, Бюл. No 3.-7 с. 9. Способ изготовления неподвижного соединения типа вал-ступица стальных деталей (варианты): Пат. 2501986. Российская Федерация. МПК В23Н 9/00 /В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братушак, Опубл. 20.12.2013, Бюл. No 35.-14 с. 10. Лебедь В.Т. Проблемы и перспективы повышения качества крупногабаритных составных прокатных валков /В.Т. Лебедь, Н.В. Тарельник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2014. – Вип. No 34. – С. 42–50

Bibliography (transliterated): 1. *Guide unified nomenclature of industrial products manufactured by the enterprises of Mintime UTV.* chief PES L. A. Busacca - Moscow: 1984.- 176 p. 2. Lebed V.T. Arpentiev. M.B. *Assembly of large products with the use of heat.* Bulletin of National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".- Kharkov : NTU "KHPI", 2009. - No. 2. pp. 74-82. 3. Lebed V.T., Kulachenko A.A. *Technology thermal composite Assembly of large parts. Progressive technologies and systems engineering.* - Donetsk: Donetsk National Technical University, 2004.- Vol. 28. pp. 84-94. 4. Plahin V. D. *Terotechnology in metallurgy.* - Moscow: metallurgy, 1979, p. 5. Cekov V.S. *Restoration of parts of metallurgical equipment.* - Moscow : Metallurgy, 1977. - 152 p. 6. Lebed V.T., Kulachenko A.A. *Optimization of the coating in the joints of large composite rolls to increase the bearing capacity.* Instrument reliability and optimization of technological systems : proceedings of science. labors. - Donetsk - Kyiv, 2008. - Vol. 23. pp. 240-247. 7. *Method of machining the mating surfaces of the parts (options):* Pat. 66105. Ukraine. IPC VN 1/00 /V.S. Martsinkovsky, V.B. Tarelnik; Publ. 10.04.08, bull. No. 7.-3 p. 8. *Method of machining the mating surfaces of the steel and/or cast iron parts:* Pat. 2410212. Of The Russian Federation. IPC VN 9/00 / V.S. martsinkovsky, V.B. Tarelnik, E. V. Konoplynenko, I.A. Oleinik; Publ. 27.01.11, bull. No. 3.-7 p. 9. *A method of making a fixed connection type shaft-hub steel parts (options):* Pat. 2501986. Of The Russian Federation. IPC VN 9/00 /V. S. Martsinkovsky, V. B. Tarelnik, M. P. Bratushak, Publ. 20.12.2013, bull. No. 35.-14 p. 10. Swan V. T., Tarelnik N. I. *Problems and prospects of improving the quality of large composite rolls.* Instrument reliability and optimization of technological systems : proceedings of science. labors. - Kramatorsk, 2014. - Vol. No. 34. pp. 42-50.

Поступила (received) 01.03.2015

Лебедь Владимир Тимофеевич – док. техн. наук, ДГМА, Краматорск;

Тарельник Н. В. – канд. экон. наук, доц. Сумського НАУ, Сумы;

Лашкарев Олег Николаевич - директор производства ЗАО «Ижметмаш»;

Ропьяк Любомир Ярославич– канд. техн. наук, доц., Ивано-Франковского НТУ нефти и газа .

INVOLUTE SPIRAL FACE COUPLINGS AND GEARS: DESIGN APPROACH AND MANUFACTURING TECHNIQUE

This paper presents spiral face gears with an involute tooth line and an identical tooth profile in the normal section at any radius. There are two main applications for such face gears. One of them is an alternative solution with certain advantages in performance and fabrication technology to the straight tooth, Hirth, or Curvic flange couplings. Another application is when a face gear is engaged with an involute helical pinion or worm at intersecting or crossed axes. Potential advantages of spiral face couplings and gears include high power transmission density and highly productive machining of face spiral gears. The paper describes gear geometry analysis, and design technique of spiral face involute gears with symmetric and asymmetric tooth profiles. It also explains a hobbing method of these gears and tool design specifics, and then illustrates gear and tool design with numerical examples.

Keywords: helical gear, involute tooth, productivity, technological method, worm, crossed axes, power, torque, design procedure, gear milling, design, calculation tool.

INTRODUCTION

Face gears typically have a straight or skewed tooth line and varying tooth profile in normal cross section at different radii from major to minor diameter. These face gears are engaged with spur or helical involute pinions at intersecting or crossed axes.

This paper presents spiral face gears with an involute tooth line and an identical tooth profile in the normal section at any radius. There are two main applications for such face gears. One of them is an alternative solution with certain advantages in performance and fabrication technology to the straight tooth, Hirth, or Curvic flange couplings. Another application is when a face gear is engaged with an involute helical pinion or worm at intersecting or crossed axes.

Potential advantages of spiral face couplings and gears include high power transmission density and highly productive machining of face spiral gears.

The paper describes gear geometry analysis, and design technique of spiral face involute gears with symmetric and asymmetric tooth profiles. It also explains a hobbing method of these gears and tool design specifics, and then illustrates gear and tool design with numerical examples.

GEOMETRY of INVOLUTE SPIRAL FACE GEARS

Unlike conventional spur or helical gears that have involute tooth flank profiles and straight or helical tooth lines, these spiral face gears have straight tooth flank profiles in the normal section and the involute tooth line.

Spiral angle at some reference diameter $d > d_b$ is

$$\beta = \arccos\left(\frac{d_b}{d}\right) \quad (1)$$

Any tangent to the base cylinder diameter d_b is normal to the involute tooth line section of the spiral face

gear presenting a straight flank gear rack (see Figure 1, Section A-A). The spiral face gear tooth parameters and its root fillet profile can be optimized using Direct Gear Design optimization technique [1] to amplify load capacity by increasing tooth surface durability and minimizing bending stress concentration.

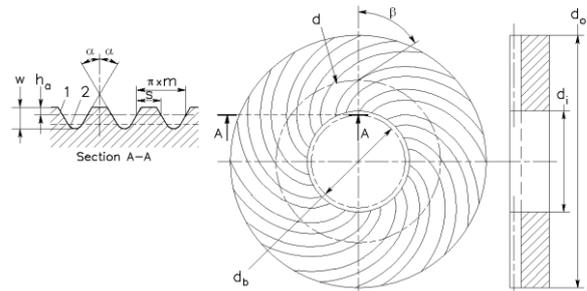


Fig. 1 – Face involute spiral gear; d_b , d_i , d , and d_o are base, minor, reference and major diameters, β is spiral angle at reference diameter, γ – profile (pressure) angle, s – tooth thickness at reference (pitch) line, h_a – tooth addendum, w – whole depth; 1 – tooth flank, 2 – root fillet

INVOLUTE SPIRAL FACE MACHINING

Since any normal to the involute tooth line section of the spiral face gear presents a straight flank gear rack, a gear hob can be used in manufacturing. Thus a spiral face gear per this design can be hobbled with the same accuracy as spur and helical gears utilizing conventional hobbing equipment.

Schematics of spiral face gear hobbing is shown in Figures 2 and 3.

Hobbing center distance “a” is

$$a = \frac{d_b}{2 \cos(\beta)} \times \cos(\beta \pm \gamma) \quad (2)$$

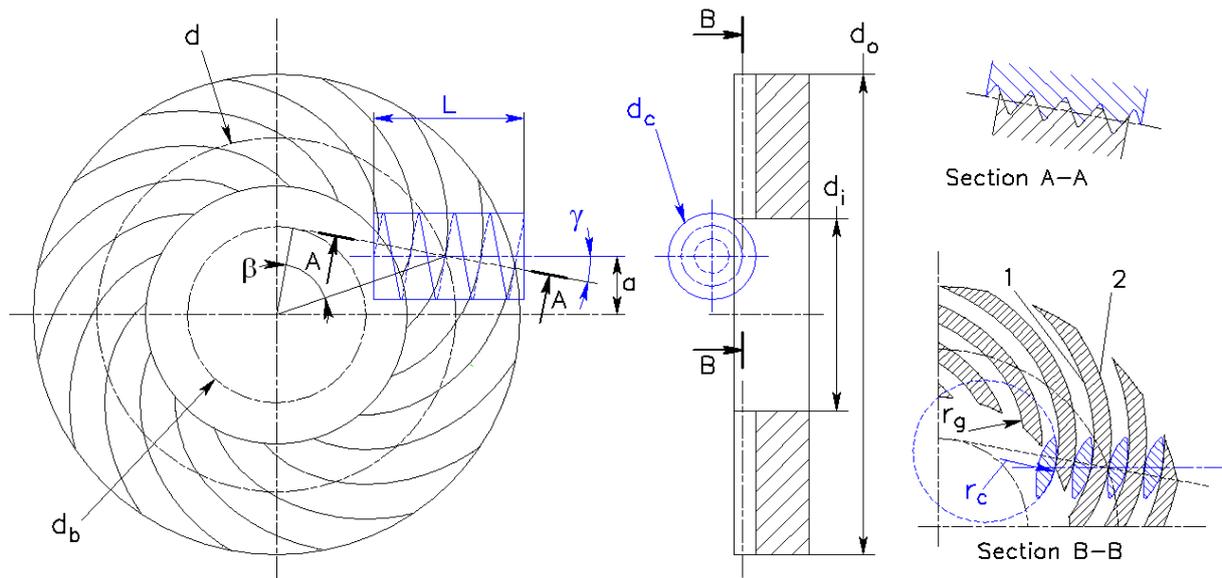


Fig. 2 – Schematics of left hand spiral face gear (black) hobbing with right hand hob (blue); \square – hob lead angle, L – hob length, d_c – hob major diameter; section A-A is tangent to base circle d_b and normal to the gear tooth line; section B-B is parallel to the hob axis, 1 – concave gear tooth flank, 2 – convex flank

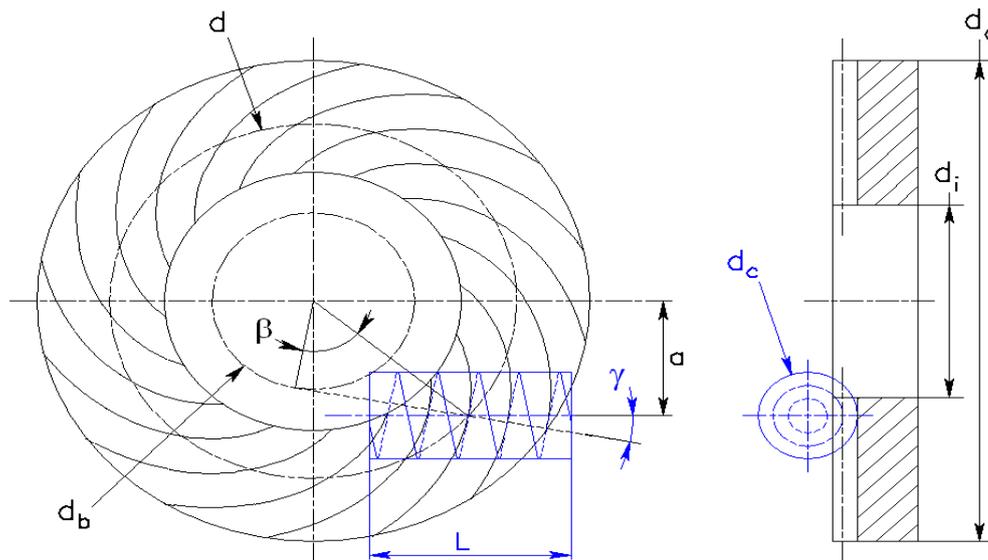


Fig. 3 – Schematics of right hand spiral face gear (black) hobbing with right hand hob (blue)

Where the “+” sign if the spiral gear and hob have opposite hands left-right (Figure 2) or right-left, the “-” sign if the spiral gear and hob have the same hands right-right (Figure 3) or left-left.

The normal section of the spiral gear tooth profile is an impression of the hob tooth profile in normal section (Figure 2, Section A-A).

In order to avoid interference and undercut of the concave tooth flank the minimal gear flank curvature radius r_g must be greater than the maximum hob helical surface radius r_c measured parallel to the hob axis (see Figure 2, Section B-B) from base diameter d_b to the hob centerline offset by distance “a” or

$$r_{g \min} > r_{c \max} \quad (3)$$

The minimal gear flank curvature radius $r_{g \min}$ and minor diameter d_i is

$$r_{g \min} = \frac{d_i}{2} \times \tan \left(\arccos \left(\frac{d_b}{d_i} \right) \right) \quad (4)$$

A profile of the hob helical surface section parallel to its axis presents a complex curve and exact definition of its maximum radius $r_{c \max}$ at a contact point with the concave gear flank is a difficult task. However, this maximum radius $r_{c \max}$ could be defined with sufficient accuracy for a practical solution by the equation

$$r_{c \max} = \frac{d_c}{2 \tan(\alpha)} \quad (5)$$

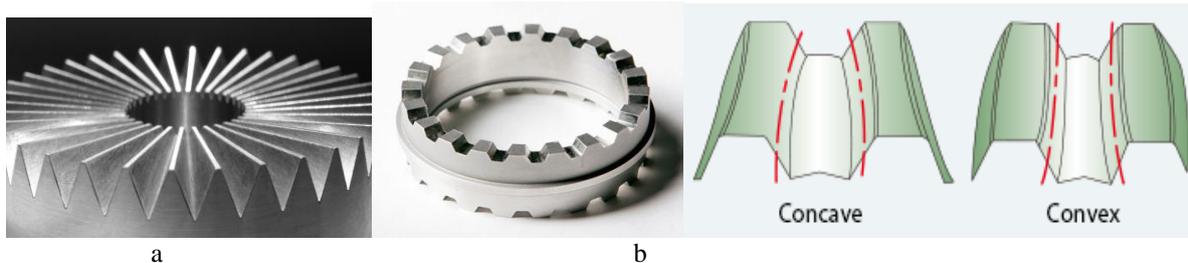


Fig. 4 – Hirth and Curvic couplings: a – Hirth; b – Curvic

A higher profile (pressure) angle α and a smaller hob major diameter d_c , results in a smaller spiral face gear minor diameter, achieved without concave flank undercut.

SPIRAL FACE COUPLINGS

A pair of spiral face gears can be used as a flange coupling (also known as Endicon® coupling [2]). Application of this type of coupling is similar to the Hirth and Curvic couplings. The Hirth coupling flange (Figure 4a) has tapered, symmetrical teeth. Both mating flanges of the Hirth coupling have identical tooth geometry. The Curvic coupling flanges (Figure 4b) have teeth with a circular tooth line, though the tooth flank profiles are straight. One flange of a coupling has concave tooth lines and the mating one has convex tooth lines.

A distinct difference of the involute spiral face coupling (Figure 5) is that the normal to the tooth line section tooth geometry and the normal load are the same at any radius.

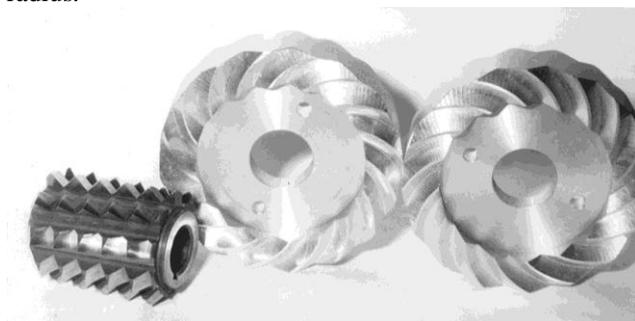


Fig. 5 – Experimental involute spiral face coupling mating flanges and hob (the same hob was used to machine both right and left hand spiral face gears)

ly greater load transmission capacity. Both mating flanges of the involute spiral face coupling have the same tooth geometry, but tooth spiral line directions have opposite clockwise and counterclockwise directions.

Spiral face gear parameter selection could be limited by a choice for manufacturing technology. For example, the minor diameter and pressure angle for a hobbed gear are limited by a condition per equation (3).

Figure 6 presents a sample of involute spiral face coupling assembly. Experimental involute spiral face coupling gear parameters are presented in Table 1.



Fig. 6 – Sample of involute spiral face coupling assembly

This results in even stress distribution and potential-

Table 1. – Experimental involute spiral face coupling gear parameter

Number of Teeth	16
Normal Module, mm	6.0
Tooth Addendum, mm	3.7
Whole Depth, mm	8.0
Normal Pressure Angle	45°
Reference Diameter, mm	150.0
Spiral angle at reference diameter, mm	50.2°
Minor Diameter, mm	120.0
Spiral angle at Minor diameter	36.9°
Major Diameter, mm	180.0
Spiral angle at Major diameter	57.8°

SPIRAL FACE GEARS

A spiral face gear can be engaged with an involute helical pinion or worm at intersecting or crossed axes. Such engagement is used in the Helicon® type gears [3].

In order to avoid interference of the helical pinion tooth (worm thread) tip with the spiral face gear tooth tip at its concave flank, the pinion and spiral gear geometry must satisfy to the condition (3). This condition requires a high pressure angle in mesh with the spiral face gear tooth concave flank and the mating helical pinion flank. At the same time the effective tooth height in the gear mesh must

provide a contact ratio greater than 1.0. In most cases both these conditions cannot be satisfied with symmetric tooth profile in the normal section that is used for spiral face couplings. Application of an asymmetric gear tooth profiles with high pressure angle for the concave flank and low pressure angle for the convex flank of the spiral face gear allows a contact ratio greater than 1.0 in both flank gear meshes. A sample of the spiral face gear pair and its data are shown in Figure 7 and Table 2 accordingly. Asymmetric tooth hobs for the helical pinion and spiral face gear are shown in Figure 8.

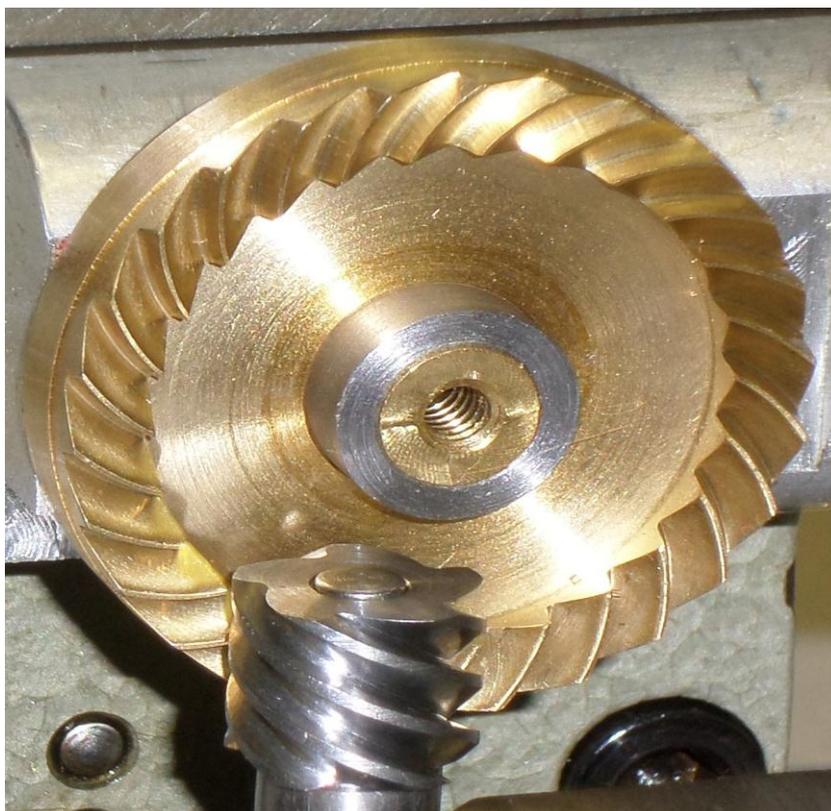


Fig. 7 – Sample of spiral face gear pair

Table 2. – Spiral face gear data

Gear	Pinion	Spiral Face Gear
Number of Teeth	5	26
Normal Module, mm	0.85	0.85
Normal Drive Flank Pressure Angle	45°	45° (concave flank)
Normal Coast Flank Pressure Angle	10°	10° (convex flank)
Helix/Spiral Angle	57.9°	32.0°
Helix /Spiral Hand	LEFT	RIGHT
Pitch Diameter (PD), mm	9.600	29.068
Base Diameter, mm	4.504/9.111*	24.650
Major Diameter, mm	11.00	36.00
Minor Diameter, mm	7.74	28.00
Addendum, mm	0.70	0.70
Whole Depth, mm	2.00	2.00
Normal Tooth Thickness at PD, mm	1.270	1.270
Face Width, mm	10.00	4.00
Center Distance, mm	6.350±0.025	
Contact Ratio	1.05/2.60*	
*drive/coast flank		

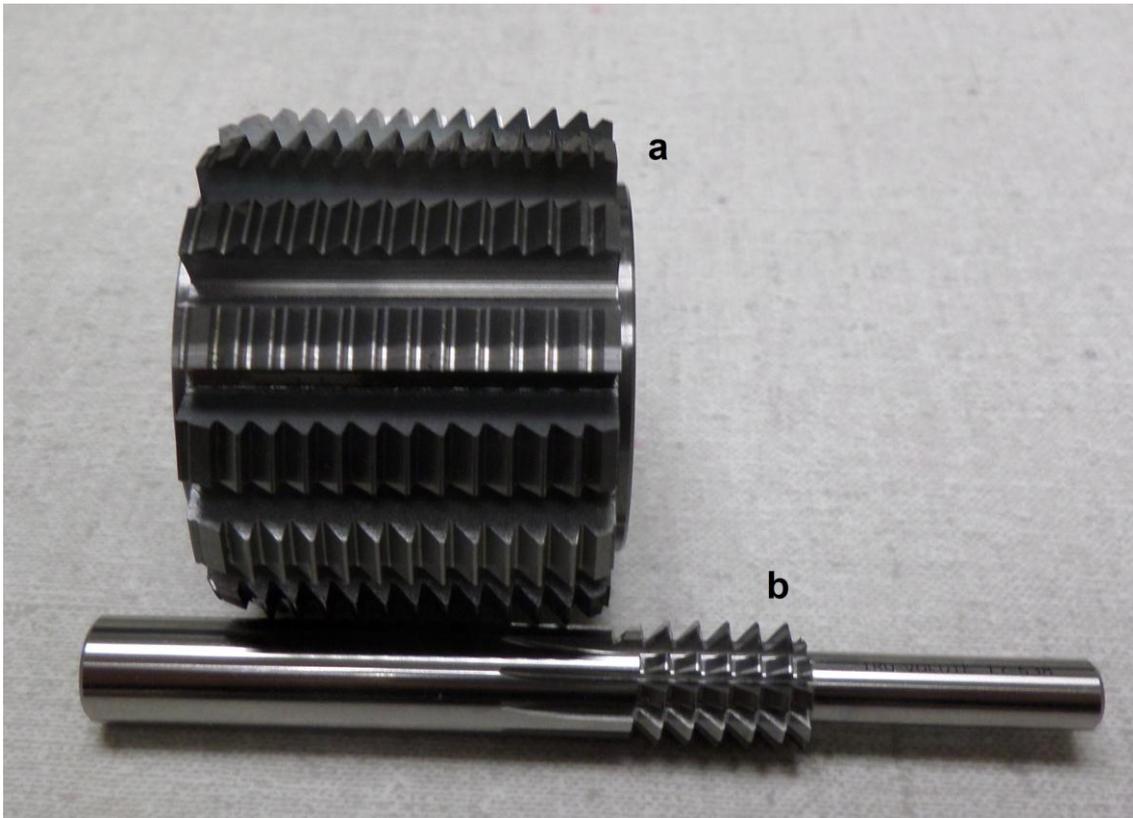


Fig. 8 – Asymmetric tooth hobs: a – for helical pinion, b – for spiral gear

POTENTIAL APPLICATIONS

Spiral face couplings have greater load capacity and utilize cost effective hobbing fabrication methods in comparison to the Hirth and Curvic type flange couplings. They may find many application areas including aerospace, automotive, agriculture, robotics, etc. For example, this type of coupling could be used to connect an airplane propeller to an engine shaft.

Spiral face gears that utilizes convex-concave tooth contact at high pressure angle on drive tooth flanks have potentially greater load capacity in comparison to conventional face gears. This makes it suitable for different power drives and actuators, and also in positioning systems for many industries and applications.

SUMMARY

- Geometry of involute spiral face gears and their tooth machining technology are described.

- Spiral face couplings and spiral face gears are described.

Potential applications of spiral face couplings and spiral face gears are suggested.

Список литературы: 1. Капелевич, А. Л. Прямозубые шестерни. Дизайн. CRC пресс, 2013. - 98с. 2. [http://www. itwheartland.com/endicon%C2%AE-couplings/](http://www.itwheartland.com/endicon%C2%AE-couplings/). 3. Спиroidных® И Helicon® Зацепления, <http://itw.njolson.net/Spiroid/Springer%20-%20Encyclopedia%20of%20Tribology%20Article%20-%20Spiroid%20Gearing.pdf>

Bibliography (transliterated): 1. Kapelevich, A.L. *Direct Gear Design*. CRC Press, 2013. – 98p. 2. [http://www. itwheartland.com/endicon%C2%AE-couplings/](http://www.itwheartland.com/endicon%C2%AE-couplings/). 3. Paul, DuWayne, *Spiroid® And Helicon® Gearing*, <http://itw.njolson.net/Spiroid/Springer%20-%20Encyclopedia%20of%20Tribology%20Article%20-%20Spiroid%20Gearing.pdf>

Received 21.03.2015

Dr. Alexander L. Kapelevich – President firm AKGears, USA, LLC – a developer of modern Direct Gear Design® methodology and software. He has over 30 years of experience in custom gear transmission development and authored the book titled “Direct Gear Design” and many technical articles. Dr. Kapelevich can be reached by e-mail at ak@akgears.com;

Stephen D. Korosec – President, Koro Ind. Inc. manufacturer of fine and medium pitch precision gears for over 40 years, USA. Steven has extensive knowledge of tooling, production methods and other techniques required to manufacture these high quality products. Mr. Korosec can be reached by email at steve@korosind.com.

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ

В статье предложена методика анализа энергетических характеристик роторных гидродинамических активаторов, которая позволяет на стадии предварительного выбора устройств по данным рекламных проспектов и статей определить их ориентировочную эффективность, проанализированы однотипные конструкции гидродинамических устройств по энергоемкости гидродинамического воздействия на рабочую среду. В качестве примера выполнена сравнительная оценка распределения затрат энергии в насосах, предназначенных для перекачивания жидкой среды, и в роторно-пульсационных аппаратах (РПА), используемых для гидродинамической активации. При определении эффективности РПА рассматривается количество энергии, затрачиваемое непосредственно на гидродинамическое и кавитационное воздействие на продукт.

Ключевые слова: центробежный насос, мощность, роторный аппарат, активация, гидродинамическое воздействие, удельная энергия.

Введение. Использование различных гидродинамических установок для активации рабочих жидкостей позволяет изменять физико-химические свойства обрабатываемого продукта, обеспечивает повышение производительности технологических процессов и снижение энергозатрат на выполнение работ. В настоящее время большое количество исследовательских работ посвящено обоснованию способов энергетического воздействия на гетерогенную рабочую среду, разработано большое число аппаратов различного типа, приводятся обоснование конструкций и предлагаются различные методики оценки их эффективности [1,2].

Однако в подавляющем большинстве случаев не представляется возможным аналитически описать процессы внутренних преобразований в продукте, происходящих при активации. Поэтому при исследованиях рассматриваются только параметры внешнего воздействия (давление, скорости, температуры и их градиенты). Продолжает оставаться проблематичным выбор оптимальных типов и конструкций аппаратов для конкретных условий производства, поскольку разработанные методики позволяют делать выбор только из аппаратов определенного типа или конструкции.

Анализ основных достижений и литературы.

В роторных гидродинамических активаторах (РГДА) энергия, получаемая потоком жидкости при вращении элементов рабочей зоны, кроме создания определенного напора на выходе, расходуется на изменение физико-химического состояния рабочей среды и переходит в диссипативную. При определении эффективности устройств и технологий такого вида активации важным моментом является анализ затрат энергии в этих аппаратах, на основании которого можно

оценить интенсивность воздействия на продукт в рабочей зоне [3].

Цель исследования, постановка задачи. Целью работы является разработка критериев оценки энергетического воздействия в рабочей зоне установки роторного гидродинамического активатора, которые бы позволяли на этапе предварительного анализа определить эффективность их использования в проектируемом или в уже реализуемом технологическом процессе. С этой целью выполнен анализ однотипных конструкций гидродинамических устройств по энергоемкости гидродинамического воздействия на рабочую среду.

Материалы исследований. Поскольку по характеру работы аналогичными устройствами являются центробежные насосы, вначале, рассмотрим методику анализа их энергетических характеристик, и покажем отличие в подходах к оценке эффективности насосов и роторно-кавитационных аппаратов.

Задачей насоса является создание потока жидкости, поэтому основным показателем будет полезная (гидравлическая) мощность $N_z = Q \cdot P$, которая определяется по расходу Q и давлению P , развиваемому насосом.

Отношение полезной мощности (N_z) к подведенной (N_{II}) является общим КПД насоса

$$\eta_{общ} = \frac{N_z}{N_n} \quad (1)$$

а разность $N_n - N_z = N_{ном}$ называют потерями мощности в насосе, которые включают в себя объемные ($N_{об}$), механические ($N_{мех}$) и гидравлические ($N_{гн}$).

Баланс мощности в насосе наглядно можно представить в виде схемы [4], показанной на рисунке 1.

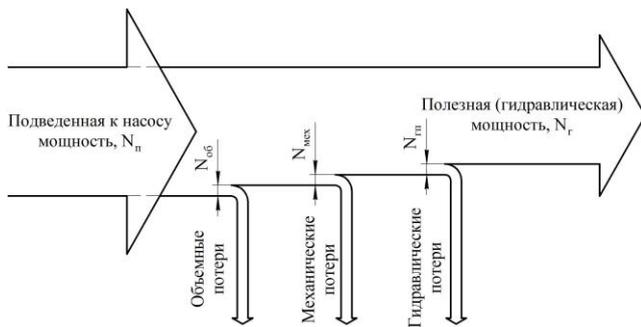


Рис. 1 – Баланс мощности насоса

Для оценки энергоемкости процессов, происходящих в насосе можно воспользоваться такими критериями, как общие удельные затраты энергии в аппарате (W_H) и удельными затратами на потери в насосе (ΔW_H)

$$W_H = \frac{N_{II}}{Q} \left(\frac{\text{кВт} \cdot \text{час}}{\text{м}^3} \right) \quad (2)$$

где Q – производительность насоса $\text{л}^3/\text{мин}$.

При этом удельные затраты энергии на потери можно определить как

$$\Delta W_H = \frac{N_{\text{пот}}}{Q} \quad (3)$$

где $N_{\text{пот}} = N_{\text{об}} + N_{\text{мех}} + N_{\text{гп}}$. (4)

Коэффициент потерь энергии в насосе определяется зависимостью

$$K_H = \frac{\Delta W_H}{W_H} \quad (5)$$

В настоящее время наряду с выпуском центробежных насосов ряд предприятий изготавливает оборудование для кавитационного и другого механического воздействия на жидкий рабочий продукт. В частности завод насосного оборудования (г. Москва, Россия) кроме серии насосов предлагает потребителям ряд роторно-пульсационных аппаратов (РПА) с разной мощностью установленного электродвигателя. На базе опубликованных характеристик выполним сравнительный анализ насоса и РПА с одинаковыми приводами.

В насосе (ОНЦ 1М 25/32) с мощностью электродвигателя 5,5 кВт и частотой вращения 2900 мин⁻¹ заводом рекомендуется работать в интервале давлений от 0,28 до 0,34 МПа. При этом увеличение сопротивления на выходе приводит к уменьшению расхода от 32,5 до 17,5 м³/час. Затраты мощности N в этом диапазоне снижаются от 4,1 до 3,0 кВт. Если рассчитать полезную (гидравлическую) мощность N_g по справочным данным, то она также уменьшается от 3,7 до 1,46 кВт (Рис. 2).

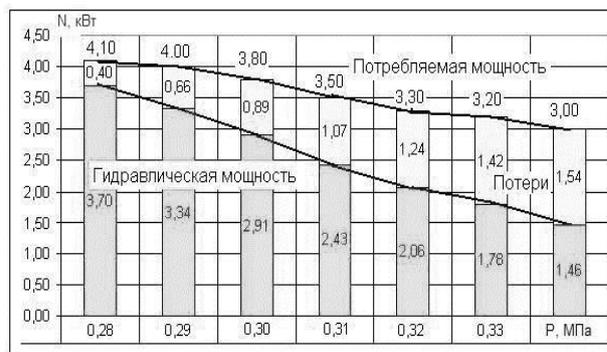


Рис. 2 – Затраты мощности в насосе

Далее, пользуясь справочными данными завода, можно рассчитать удельные затраты энергии при работе насоса W_i (по формуле 2), удельные затраты энергии на суммарные потери в насосе ΔW (по формуле 3) и коэффициент потерь энергии в насосе K_H (по формуле 4). Результаты расчетов представлены на графиках (Рис. 3).

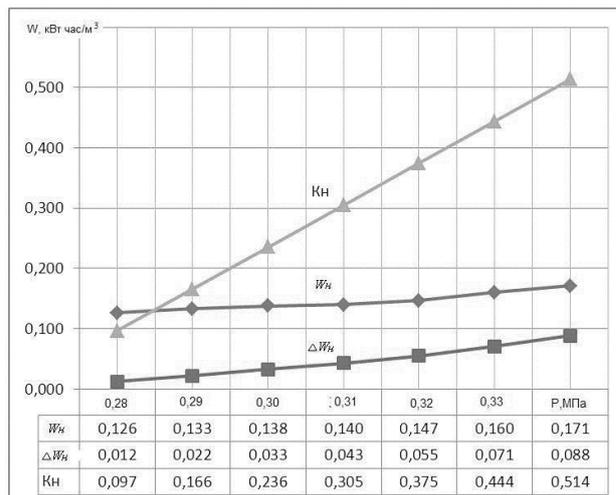


Рис. 3 – Энергетические показатели насоса

Из графиков видно, что увеличение давления на выходе насоса в рассматриваемом диапазоне приводит к возрастанию удельной потребляемой энергии от 0,126 до 0,171 кВт час/м³ и увеличению потерь энергии от 0,012 до 0,088 кВт час/м³. При этом коэффициент потерь энергии в насосе увеличивается от 0,097 до 0,514.

В приводах роторных гидродинамических акти- ваторах (РГДА), как и в насосах, электроэнергия преобразуется во вращательное движение вала, через который передается исполнительным органам машины. Однако в связи с другим назначением РГДА при оценке эффективности этих установок рассматривается количество энергии, затрачиваемое на гидродинамическое и кавитационное воздействие на продукт. На наш взгляд, при анализе энергетических характеристик РГДА следует отдельно учитывать потери в самом электродвигателе ($N_{\text{в}}$) и механические потери в

установке ($N_{\text{мн}}$). При этом потери мощности на холостом ходу ($N_{\text{хх}}$) будут

$$N_{\text{хх}} = N_{\text{пз}} + N_{\text{мп}} \quad (6)$$

На практике мощность холостого хода можно определить при работе установки без заполнения продуктом.

Мощность, вводимая в рабочую зону, или эффективная мощность, определяется, как

$$N_{\text{ýò}} = N_{\text{í}} - N_{\text{òò}} \quad (7)$$

В РГДА внутренние потери $N_{\text{вн}}$ включают в себя затраты мощности на преодоление сопротивления вращению ротора на торцах $N_{\text{тор}}$, периферии $N_{\text{пер}}$ и потери мощности на возвратные потоки в рабочей зоне $N_{\text{вп}}$.

$$N_{\text{áí}} = N_{\text{òíò}} + N_{\text{íòò}} + N_{\text{áí}} \quad (8)$$

В общем случае затраты мощности для роторных гидродинамических активаторов определяются как [3]:

$$N_{\text{í}} = (N_{\text{ýý}} + N_{\text{íí}}) + N_{\text{áí}} + N_{\text{а}} + N_{\text{а}} = N_{\text{òò}} + N_{\text{áí}} + N_{\text{а}} + N_{\text{а}} \quad (9)$$

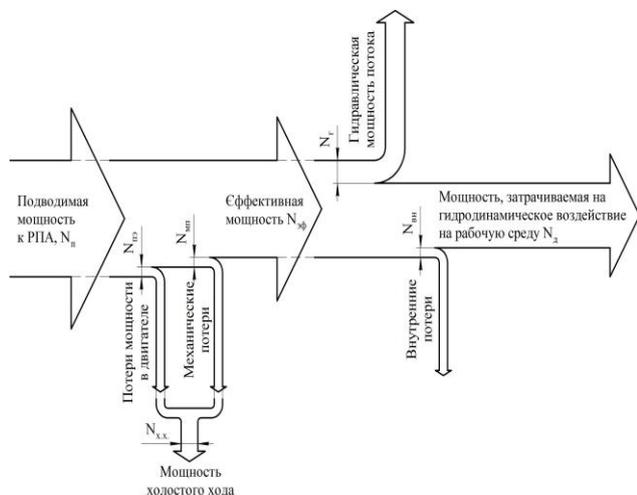


Рис. 4 – Баланс мощности гидродинамического активатора

При этом мощность $N_{\text{д}}$, затрачиваемая на гидродинамическое воздействие (изменение величин, направлений и градиентов скоростей, изменение давлений в потоке, гидроудары и кавитацию) переходит в диссипативную мощность и мощность, затрачиваемую на изменение физико-химического состояния продукта.

В этом случае удельную энергию, затрачиваемую на гидродинамическое воздействие можно определить [3] как

$$W_{\text{ГД}} = \frac{N_{\text{д}}}{Q} \quad (10)$$

Обычно в проспектах, справочниках и в литературе приводятся такие данные, как характеристика роторной машины в виде зависимости потребляемой мощности от производительности. В этом случае невозможно определить все составляющие при распределении энергии в аппарате.

Для ориентировочной оценки энергоемкости процессов можно воспользоваться такими критериями, как общие удельные затраты энергии в аппарате ($W_{\text{П}}$)

$$W_{\text{П}} = \frac{N_{\text{П}}}{Q} \quad (11)$$

где Q – производительность насоса $i^3 / \pm \Delta \tilde{\eta}$.

Поскольку в активаторах выходным параметром являются энергозатраты в процессы гидродинамического воздействия на рабочие жидкости, то мощность воздействия $\Delta N_{\text{В}}$ на рабочую среду определим как

$$\Delta N_{\text{В}} = (N_{\text{д}} + N_{\text{ВН}}) = N_{\text{П}} - N_{\text{э}} \quad (13)$$

Тогда удельная энергия, затрачиваемая на гидродинамическое воздействие (включая потери) будет

$$\Delta W_{\text{В}} = \frac{\Delta N_{\text{В}}}{Q} \quad (14)$$

Коэффициент затрат энергии на процессы гидродинамического воздействия определяется зависимостью

$$K_{\text{В}} = \frac{\Delta W_{\text{В}}}{W_{\text{П}}} \quad (15)$$

Анализ энергетических характеристик выполним на примере роторно-пульсационной установки типа РПА-5 с мощностью электродвигателя 5,5 кВт и частотой вращения 2900 мин⁻¹. В таких установках при вращении ротора, его каналы периодически совмещаются с каналами статора. Скорость потока жидкости в канале статора является переменной величиной. При распространении в канале статора импульса избыточного давления, вслед за ним возникает кратковременный импульс пониженного давления, инерционные силы создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию и другие эффекты воздействия на жидкость.

В предлагаемом изготовителями рабочем интервале изменение давления от 0,072 до 0,162 МПа приводит к уменьшению расхода от 6,5 до 2,1 м³/час (Рис. 5).

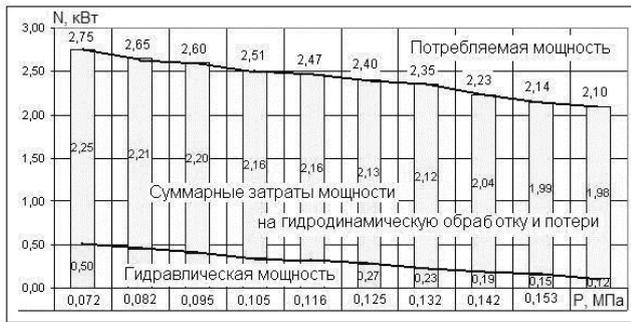


Рис. 5 – Затраты мощности в РПА-5

При этом потребляемая мощность уменьшается от 2,75 до 2,10 кВт, а гидравлическая изменяется от 0,5 до 0,12 кВт. К сожалению, приведенные справочные данные не позволяют определить все составляющие энергозатрат в РПА.

Далее, пользуясь справочными данными завода и предложенной выше методикой можно рассмотреть удельные затраты энергии при работе РПА.

Результаты расчетов по формулам 11,13, 14 представлены на графиках (Рис. 6)

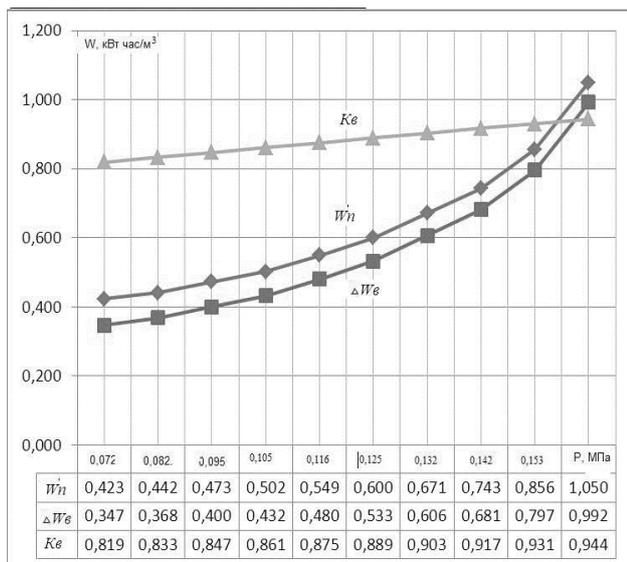


Рис. 6 – Энергетические показатели РПА-5

Из приведенных графиков видно, что с увеличением давления на выходе РПА-5 в указанном диапазоне увеличиваются и удельная энергия потребляемая установкой W_p от 0,423 до 1,05 кВт·час/м³ и удельная энергия гидродинамического воздействия ΔW_b от 0,347 до 0,992 кВт·час/м³. Коэффициент затрат энергии на процессы гидродинамического воздействия возрастает от 0,819 до 0,944.

Фесенко Анатолий Владимирович – канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25.

Результаты исследований. Сравнительный анализ насоса и гидродинамической установки РПА-5 показывает, что удельная мощность на гидродинамическую обработку с учетом потерь в РПА-5 значительно выше, чем удельная мощность на потери в насосе ОНЦ 1М 25/32. Это и является отличительной особенностью энергопотребления роторных гидродинамических активирующих устройств.

Выполняя оценку различных РГДА по энергоемкости гидродинамического воздействия в рабочей зоне можно определить эффективность их использования в проектируемом или в уже реализуемом технологическом процессе.

Выводы.

Предложенная методика анализа энергетических характеристик роторных гидродинамических активаторов позволяет на стадии предварительного выбора устройств по данным рекламных проспектов и статей ориентировочно определить эффективность гидродинамического и кавитационного воздействия на рабочую жидкость.

Список литературы: 1. Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин // – Киев: Вища школа, 1984. – 68 с. 2. Промптов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика: монография / М.А. Промптов // – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с. 3. Фесенко А.В., Любимый Ю.Н. Сравнительный анализ гидродинамических установок для диспергирования, гомогенизации и нагрева жидкости / А.В. Фесенко Ю.Н. Любимый / Вісник Сумського державного Університету. Серія: Технічні науки. – Суми: СДУ. – 2009. – №4. – С. 103-109. 4. Кононов А.А., Кобзов Д.Ю., Кулаков Ю.Н., Ермашонок С.М. Основы гидравлики. / А.А. Кононов, Д.Ю. Кобзов, Ю.Н. Кулаков, С.М. Ермашонок // Курс лекций – Братск: ГОУВПО «БрГТУ», 2004. – С. 92. 5. Фесенко А.В. Методика оценки параметров кавитационной обработки СОЖ / А.В. Фесенко // Вестник национального технического университета «ХПИ»: Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – №1. – С. 14-18.

Bibliography (transliterated): 1. The Fedotkin I. M., Nemchin, A. F. *The Use of cavitation in technological processes.* - Kiev: high school, 1984. - 68 p. Print 2. Prompt M. A. *Rotary pulsation apparatus of the type: theory and practice: monograph.* - Moscow: mechanical engineering 1, 2001. - 260 p. Print 3. Fesenko, A. V., Lybimuy Y.N. *Comparative analysis of hydrodynamic systems for dispersing, homogenizing and heating the liquid* / Bulletin Utilities state University. Series: Techno science. - Sumi: SDU. - 2009. - No. 4, pp. 103-109. Print 4. Kononov A., Kobzov D. Y., Fists J. N., Ermachonok S. M. *fundamentals of hydraulics. A course of lectures.* - Bratsk: VPO "BGTU", 2004. – 92 p. 5. Fesenko, A. V. *Methods of estimating the parameters of cavitation treatment of the coolant.* - Bulletin of national technical University "HPI": engineering Technologies. - Kharkov: NTU "KhPI". - 2008. - No 1. - pp. 14-18.

Поступила (received) 30.03.2015

РЕФЕРАТИ

УДК 519.874

Интеграционная технологическая подготовка промышленного предприятия PLM – решением / Ю.В. Тимофеев, В.А. Фадеев, О.М. Шелковий, В.Д. Хицан, О.О. Ключко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 4-10. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

Основні положення концепції інтеграційної технологічної підготовки промислового підприємства PLM-рішенням включають повне детальне опис, захищене зберігання і кероване використання всієї інформації про продукцію протягом усього життєвого циклу продукції з підтримкою цілісності і несуперечності інформації про продукцію та підтримкою та управлінням всіма бізнес-процесами, пов'язаними з ними даними для розповсюдження інформації по всьому підприємству. Для реалізації організаційно-функціональної сумісності конструкторсько-технологічних підрозділів машинобудівного підприємства розроблена ERP-система з інтеграцією PDM-систем з САПР і PDM системами на базі MES-системи «Zenith» і забезпечує створення принципів гарантованої технології механічної обробки при виготовленні високоточних деталей, дозволяє ефективно підійти до розроблення перспективного плану розвитку, до складання щорічних бізнес-планів модернізації виробництва та комплектації сучасним металорізальним устаткуванням, інструментом і вимірювальною технікою.

Ключові слова: інтеграція, технологічна підготовка, машинобудівне підприємства, PLM-рішення, інформація, бізнес-процеси, функціональність, гнучкість, масштабованість, PDM-системи, САПР.

УДК 621.9.015

Технологическое обеспечение эксплуатационных параметров цилиндрических зубчатых передач при аппроксимативном решении контактно-гидродинамических задач смазки // В. Д. Ковальов, Ю. В. Тимофеев, О.М. Шелковий, О.О. Ключко, Д.О. Кравченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 11-19. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

У статті розглянуто основні види руйнування зубчастих коліс і технологічне забезпечення експлуатаційних параметрів зубчастих передач шляхом аппроксимативного рішення контактно-гидродинамічної теорії змащування зубчастих передач. Аппроксимативне рішення ґрунтується на фізично обґрунтованому припущенні про пропорційності між прогибами активних евольвентних поверхонь зубів і відповідними величинами тисків - епурою тисків (гіпотеза Вінклера-Циммермана) без рішення сингулярного інтегрального рівняння. Підвищення опірності викришування зубів досягається аппроксимативним рішенням контактно-гидродинамічної задачі, в якому прогини поверхні зубів визначаються методами теорії пружності за допомогою системи нелінійних алгебраїчних і трансцендентних рівнянь послідовними наближеннями. Встановлена залежність в'язкості від тиску масла з урахуванням безрозмірних коефіцієнтів при контактуванні зубів в області тертя кочення-ковзання і збільшення епюри гидродинамічних тисків.

Ключові слова: зубчасті колеса, технологічне забезпечення, експлуатаційні параметри, аппроксимативне рішення, контактно-гидродинамічної теорія, змащування зубчастих передач, в'язкість масла, тиск, безрозмірні коефіцієнти.

УДК 621.922.025

Исследование смещения центра тяжести шлифовального круга обусловленное погрешностями его формы / Ю.А.Сизий, Д.В. Сталинський, П.В. Романченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 20-22. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-004X.

Однією з найважливіших характеристик абразивних кругів для ручного обдирного шліфування є нерівновага, оскільки визначає вібраційну характеристику роботи ручних шліфувальних машин і, як наслідок, умови праці операторів по вібраційній безпеці. В умовах сучасного абразивного виробництва, коли неоднорідність структури інструменту зведена до мінімуму, основною причиною нерівноваги є похибки геометричної форми абразивного круга. В статті отримано формули для обчислення зміщення центра ваги круга, обумовленого похибками його форми, такими як ексцентричність осі обертання відносно навоколишньої поверхні круга та непарале-

льності його торців. На підставі формул, що отримані, здійснено аналіз вимог до точності виготовлення кругів для ручних шліфувальних машин. Встановлена неузгодженість ГОСТ 23182-78 між нормованою їм геометричною точністю абразивного круга та допустимим дисбалансом.

Ключові слова: шліфувальний круг, похибки форми круга, дисбаланс, ручна шліфувальна машина.

УДК 621.9.04

Обладнання для высокочастотной вібраційної обробки деталей мікрорізанням з формуванням спеціального мікропрофіля поверхні / В.Б. Струтинський, І.В. Перфілов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 23-27. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Наведено результати досліджень виконаних при розробці обладнання для високочастотної вібраційної обробки деталей мікрорізанням. Для підвищення точності обладнання запропонована спеціальна методика, яка полягає у визначенні параметрів фігур Ліссажу, що формуються приводами переміщення стола. Наведено результати дослідно-промислової апробації розробленого обладнання. Підтверджена працездатність розробленого обладнання і можливість формування спеціального мікропрофіля.

Ключові слова: обладнання, вібрації, мікрорізання, п'єзоприводи, мікропрофіль.

УДК 621.9.044

Конструкторско-технологические способы повышения производительности и качества зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов / Є.В. Міроненко, В.Ф. Шаповалов, О.О. Ключко, С.Ю. Палашек, Є.В. Остапович // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 28-32. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

Розроблені конструкторско-технологічні способи з метою підвищення продуктивності і якості зубообробки великогабаритних зубчастих вінців на підставі аналізу геометрії зачеплення і профілю зубів з урахуванням встановлення залежності величини відхилення евольвентної кривий профілю зуба. Відхилення від дотичній до евольвентної кривий профілю зуба, проведеної в точці, розташованій на ділільній окружності при модулі понад 25 мм і числа зубів $Zk \geq 130$ укладаються в допуски на виготовлення коліс з евольвентним зачепленням з 9-го ступеня точності. У розглянутих випадках евольвентний профіль зуба може бути замінений на прямолінійний, що дозволяє значно підвищити ефективність технологічного процесу зубофрезерування. Аналітично обґрунтовано, що з прямолінійним профілем зубів на колесі при $m=25$ мм і вище і числі зубів $Zk = 130-200$ необхідно вводити в зачеплення шестерні, що мають парний профіль зубів.

Ключові слова: великогабаритні зубчасті вінці, продуктивність, геометрія зачеплення, профіль зубів, конструкторско-технологічні способи, метод трепанації.

УДК 621.9.02

Порівняльний аналіз графічних моделей бічних профілів трикутної різьби: заданого стандартом і отриманого за допомогою різця з ненульовим значенням переднього кута / О.Р.Онисько, П.М. Процак // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 33-36. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

Запропонована програмна реалізація дослідження впливу величини переднього кута різьбового різця на точність відтворення заданого профілю різьби. У алгоритмі прикладної програми використані розроблені нами раніше аналітичні залежності, щодо гіперболічної корекції різальної кромки різьбового різця випрямленої на основі лінійної інтерполяції. Алгоритм побудований з використанням розробленої нами алгоритмічної залежності осьового профілю конволютного гвинта від величини його діаметра, кута нахилу його профілю і величини переднього кута різця. Одержані результати показали значне відхилення профілю отриманої різьби з допомогою різця з невідкоректованим профілем різальної кромки і близький до заданого стандартом профіль різьби, яка отримується різцем, різальною кромкою якого виконана за запропонованим нами алгоритмом.

Ключові слова: різьбовий різець, передній кут, конволютний гвинт, гелікоїд, гіперболічний профіль, трансцендентна функція, алгебраїчна функція.

УДК 004.896 + 621.7.01

Опыт создания современных технологий изготовления нежестких деталей с применением передовых CAD/CAM/CAE систем / С.С. Добротворский, М.И. Гасанов, Е.В. Басова, Р.В. Головатый, С.А. Гаков, С.С. Гнучих // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 37-40. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Для зниження матеріаломісткості машин в сучасному машинобудуванні необхідно збільшення в загальній номенклатурі деталей з тонкостінними, нежорсткими елементами. Досягнення конструктивної міцності деталей машин пропонується за рахунок використання можливостей передових CAD / CAM / CAE систем, які дозволяють виконати не тільки якісну організацію технологічної підготовки виробництва на окремих етапах створення передових технологій, але і в режимі «on-line» досліджувати вплив різних технологічних факторів на якісні зміни в пластично деформованому шарі матеріалу і диференціювати кореляцію процесу стружкоутворення і напружено-деформованого стану матеріалу залежно від кута нахилу стружковідвідної канавки інструменту. Отримані результати імітаційного 3D моделювання дозволили встановити, що з підвищенням швидкості різання зростає перспектива використання інструменту з позитивним переднім кутом різучої кромки для забезпечення необхідних параметрів.

Ключові слова: технологічна підготовка виробництва, технологічний процес, обробний центр, CAD / CAM / CAE системи, конкурентоспроможність, оптимізація.

УДК 621.9.015 + 621.91.01

Моделирование технологического обеспечения производственно-технических характеристик блочно-модульных инструментов на основе Многокритериальной оптимизации / А.Н. Кравцов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 41-50. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

Розглянуто забезпечення експлуатаційних характеристик блочно-модульних інструментів при багатокритеріальній регламентації параметрів поверхневого шару їх деталей за допомогою комплексних параметрів і системної оптимізації для механічних методів обробки, розроблені рекомендації по застосуванню комплексних параметрів стану контактуючих поверхонь деталей блочно-модульних різців для підвищення якості виготовлення інструменту. Виконаний аналіз взаємодії контактуючих поверхонь. Розкрито три основних підходи до оцінки геометричних характеристик: традиційний - параметричний, непараметричний, з використанням спектральної теорії нерівностей. Проаналізовано основні теоретичні передумови і прийняті моделі, використовувані при розгляді питань контактної взаємодії. Показано, що параметри стану поверхневого шару в процесі експлуатації змінюють свої значення, що призводить до зміни характеристик зони контактної взаємодії.

Ключові слова: експлуатаційні властивості, блочно-модульний інструмент, геометричні характеристики, комплексні параметри, системна оптимізація, контактуючі поверхні.

УДК 621.9.048

Новый способ формирования антифрикционного баббитового слоя подшипников скольжения / В.Б. Тарельник, А.В. Дзюба // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 51-56. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

У роботі обґрунтовано необхідність створення поверхневих шарів деталей машин з особливими властивостями для вузлів тертя ковзання. Дослідження процесів формування бабітових покриттів, спрямовані на підвищення їх якості, своєчасні і актуальні, а створення поверхневих шарів з особливими властивостями для вузлів тертя ковзання, в даному випадку підшипників ковзання (ПС), є актуальним завданням. Отримане комбіноване електроерозійне покриття має мінімальну товщину 250 мкм, а максимальну товщину 1,0 мм. Подальше збільшення товщини шару можливо, але не доцільно внаслідок збільшення часу обробки і зниження механічної міцності бабіта. Вкладиші підшипників ковзання, оброблені запропонованим способом, мають високу надійність і довговічність при роботі ПС так як на всіх етапах формування антифрикційного покриття, забезпечується міцна металева зв'язок, як між підкладкою

і проміжним шаром з міді, олов'яної бронзи або олова, так і з наступним шаром з олов'яної бабіту.

Ключові слова: електроерозійне легування, поверхневий шар, структура, бабіт, вкладиш підшипника, мідь, олово, бронза, мікротвердість.

УДК 622.245

Геометричне визначення гіперболічного профілю задньої поверхні круглого фасонного радіального різця / В.Г. Панчук, В.В. Шуфлін // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 57-59. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

У статті запропоновано геометричний розрахунок точок профілю гіперболічної форми задньої поверхні круглого радіального фасонного різця. Алгоритм розрахунку функціонально залежний від висоти установки різця і його максимального діаметру, а також профілю конічної деталі. Така конструкція різця дасть змогу найбільш точно відтворювати конічні поверхні деталей, які ним обробляють. У той сам час, запропонований різець має пласку передню поверхню, що є найбільш технологічно для підгострювання вказаного інструмента упродовж часу його експлуатації.

УДК 681.335.2:519.85

Розробка математичних моделей для обґрунтування алгоритмів прийняття рішень при діагностуванні верстатного комплексу з ЧПК в альтернативних ситуаціях / Н.Р. Веселовська // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 60-67. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-004X.

Відмічено, що в залежності від вигляду прийнятого рішення в істотній мірі залежить ефективність роботи всього комплексу: «об'єкт-система діагностування». Зроблено висновок, що синтез алгоритмів прийняття рішень СД базується на математичній теорії перевірки гіпотез і теорії інформації, а критерії формуються як конкретно поставлені оптимізаційні задачі.

Розроблені математичні моделі для обґрунтування алгоритмів прийняття рішення при діагностуванні верстатного комплексу з ЧПК в альтернативних ситуаціях та отримані математичні описи інформаційних процесів при прийнятті рішення. Підкреслено, що проблема прийняття рішення складає суть будь-якої цілеспрямованої людської діяльності. Розроблена загальна структурна схема алгоритму прийняття рішення, а також алгоритму моделювання процесу діагностування, який повно відображає роботу всієї системи та включає в себе достатню кількість параметрів, забезпечує отримання статистичних даних про функціонуванні ОД (моделі), реагує на всі зміни в системі, відповідає всім вимогам простоти його використання при складанні програмного забезпечення. Досліджено, що алгоритм прийняття рішення в статистичній задачі залежить від трьох елементів: класу щільності розподілу $W(x)$, якому за припущенням належить спостереження X ; структури простору можливих рішень Y ; форми функції витрат L_{01} , L_{10} і вигравішів L_{11} , L_{00} , а структура простору можливих рішень може бути умовно визначена наступними ситуаціями: двоальтернативною, триальтернативною і (або) багатоальтернативною, що вимагає прийняття одного з багатьох рішень. На основі якісного аналізу математичних моделей синтезовано та досліджено критерії, які алгоритмізують отримання оптимальних параметрів при застосуванні їх в промисловому виробництві.

Ключевые слова: математична модель, діагностування, верстатний комплекс з ЧПК, математичні описи, інформаційні процеси, алгоритм моделювання, програмне забезпечення, промислове виробництво.

УДК 519.874

Стратегическая и оперативная автоматизации системы управления подготовки производства / Е.В. Набока, М.Э. Колесник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 68-71. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X

Рішення задачі розробки проекту автоматизації діяльності виробничих служб машинобудівного підприємства спрямована на оптимізацію та автоматизацію і має стратегічне важливий вплив на перспективність діяльності самого підприємства. У статті розглянута задача розробки проекту автоматизації діяльності планово-економічного відділу машинобудівного підприємства. Завдання вирішується в рамках умови скорочення часу на виконання доку-

ментообігу відділу. Запропоновано зміна у функціонуванні підрозділу. Розглянуті можливі шляхи вирішення поставленого завдання на основі використання рекомендованої технології управління підприємством з застосуванням системи «Галактика». Введення в експлуатацію системи "Галактика" забезпечує автоматизацію техніко-економічного планування та статистики, перспективних і поточних планів виробництва по підприємству за встановленим переліком техніко-економічних показників, розробці річних, квартальних і місячних планів цехів машинобудівного підприємства. за встановленим переліком техніко-економічних показників.

Ключові слова: проект, автоматизація, виробничі служби, машинобудівне підприємства, оптимізація, технологія управління, техніко-економічне планування.

УДК 621.9.02

Математическое моделирование процесса обработки отверстий комбинированным осевым инструментом / М.С. Иванова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 72-75. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X

Наведені особливості обробки отворів комбінованим осьовим інструментом. Запропоновано алгоритм вибору структури комбінованого осьового інструменту для реалізації технологічного процесу обробки сукупності отворів, заснований на аналізі їх конструктивно-технологічних характеристик і збільшенні концентрації технологічних переходів. Запропоновано математичну модель, яка дозволяє описати структуру комбінованого осьового інструменту і принцип роботи його ступенів.

Ключові слова: обробка отворів, комбінований осьовий інструмент, технологічний процес, концентрація операцій

УДК 658.8.01: 005.21

Анализ механизмов реализации производственно-сбытовой деятельности промышленного предприятия / Ю.А. Клочко, Е.В. Камчатная-Степанова, Н.Г. Сикетина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 76-78. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X

У статті розглядаються принципи і необхідність використання системно-синергетичного підходу в сфері аналізу виробничо-збутової діяльності виробничого підприємства. Дана характеристика системного походу в нелінійному середовищі та синергетичного походу. Розроблено теоретичні і методологічні основи аналізу механізмів реалізації виробничо-збутової діяльності вітчизняного промислового підприємства. Розглянуто особливості вітчизняного ринку сировини. На основі результатів аналізу фактично склалася в Україні системи збуту матеріалів виділені особливості механізму формування структури збуту і каналів товароруку на ринку продукції промисловості.

Ключові слова: нелінійне середовище, збут, канали збуту, продукція, матеріали, система, синергетика.

УДК 622.24.051

Проектно-конструкторські основи вдосконалення технології виготовлення шарошок із вставним твердосплавним породоруйнівним оснащенням тришарошкових бурових доліт / Р.С. Яким, А.М. Сльпчук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 79-82. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X

У даній статті розглядаються типові конструкції кріплення твердосплавних зубців до корпусу шарошки у трьохшарошкових долотах. Досліджено конструкція посадки породоруйнюючого елемента у шарошку, яка покращує якість закріплення зубка при менших напруженнях у з'єднанні. Запропоновані конструкторські рішення щодо вдосконалення технології виготовлення шарошок із вставним твердосплавним породоруйнівним оснащенням тришарошкових бурових доліт, які дозволяють суттєво підвищити експлуатаційні показники вітчизняних бурових доліт. Проаналізовано напружно-деформівний стан запресованого зубка та шарошки у типовій конструкції та модернізованій за допомогою CAD/CAE системи.

Ключові слова: тришарошкові бурові долота, площини вибою, моделювання, метод кінцевих елементів, цементації вінців шарошки, породоруйнівне оснащення, контактні тиски, твердосплавні зубки.

УДК 519.2

Конструкторско-технологическое проектирование гибких производственных систем методами имитационного моделирования / А. Н. Шелковой, М.С. Степанов, М. С. Семченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 83-88. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X

Пропонується метод дослідження продуктивності та надійності обробки деталі «Корпус редуктора» в гнучкій виробничій системі багатосерійного виробництва на базі верстата 6Н12ПБ і гнучкого виробничого модуля МА2765МЗФ4 з використанням спеціальних інженерних програм. Проведене дослідження дозволило скоротити час для розрахунків, більш точно уявити сам процес обробки, отримати більш точні результати досліджень, розробити технологічну документацію, підібрати необхідне оснащення та інструмент, основне і додаткове обладнання.

Ключові слова: гнучке автоматизоване виробництво (ГАВ), електронно-обчислювальна техніка (ЕОМ), числове програмне управління (ЧПУ), роботизований технологічний комплекс (РТК), гнучкий виробничий модуль (ГВМ), виробничий модуль (ВМ), виробнича система (ВС), технологічний процес (ТП), керуюча програма.

УДК 621.9.01

Оптимизация режимов резания при обработке инструментальными блоками / І.Е. Яковенко, О.А. Пермяков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 89-92. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X

Пропонується методика розрахунку режимів різання окремих інструментів під час багатопроцесної обробки для різних варіантів заміни інструменту в процесі експлуатації та з урахуванням ймовірнісного характеру стійкості інструменту за заданої обробки на відмову, яка дозволяє забезпечити заданий такт випуску деталі з мінімальними витратами, які пов'язані з експлуатацією різального інструменту, а також мінімізувати інші складові технологічної собівартості обробки.

Ключові слова: статистичні дані, обробка, клас, класифікація, соціологічне опитування, алгоритм.

УДК 621

Диагностика безотказности технологических систем по измеряемым показателям качества / Н. Ю. Ламнаур // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 93-95. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X

Розв'язується задача технології машинобудування, яка стоїть під контролем, управління та діагностики технологічних систем. Запропоновано нову формулу розрахунку безрозмірного показника якості технологічної системи з урахуванням номінальних значень вимірювальних характеристик якості виробів машинобудування. Знайдені оцінки параметрів моделей безрозмірного показника якості технологічної системи. Результати досліджень застосовувалися для створення методики оцінки безвідмовності технологічної системи за показниками якості, що вимірюються

Ключові слова: якість, безвідмовність, надійність, діагностика, технологічна система.

УДК 621.95

Образование дефектов при сверлении слоистых композитов и механизм появления расслаивания / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 96-100. – Бібліогр.: 31 назв. – ISSN 2079-004X

Розглянуто фізичний, технологічний і математичний аспекти появи дефектів при свердленні багатощарових композиційних матеріалів. Надано аналіз експериментальних і теоретичних досліджень утворення розшарувань та сколів у заготівці при свердленні. Описано механізм появи таких дефектів і сучасний стан проблеми прогнозування їх кількісних характеристик. Проаналізовано вплив різних технологічних факторів на зменшення величини дефектів та шляхи їх мінімізації в процесі свердлення.

Ключові слова: дефекти свердлення, шарові композити, розшарування при свердленні.

УДК 621.9.23

Исследование влияния усилий закрепления режущей пластины по цилиндрическому отверстию на динамические характеристики сборного реза / Г.П. Клименко, В.С. Гузенко, И.И. Полуван // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобу-

дуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 101-103. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X

У статті наведені результати досліджень впливу величини сили закріплення по циліндричній поверхні отвору різальної пластини на міцнісні та динамічні характеристики удосконаленої конструкції збірного чашкового різця для обробки колісних пар. Встановлено, що суттєвий вплив величини радіальної сили закріплення по циліндричній поверхні отвору різальної пластини чинить на жорсткісні характеристики конструкції збірного чашкового різця.

Ключові слова: збірний чашковий різець, циліндрична поверхня, жорсткість, міцність, динамічні характеристики, колісна пара, кут конуса оправки.

УДК 621.03.004.74:621.03.004.67 - 167.7

Saving disassembly at heavy-duty gas turbine compressor reengineering / С.В. Коноплянченко, В.М. Колодненко, В. Агалавэй // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С.104-109. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-004X

У статті розглянуті питання збереження ресурсу важко навантажених відповідальних виробів машинобудування на етапі їхнього ремонту, на прикладі газотурбінних компресорів великої потужності. Наведено основні причини та зазначені результати відмов турбокомпресорних установок. Розглянуто сучасні концепції пошуку раціонального шляху доступу до елемента, що відмовив, в складному встаткуванні. Запропоновано методику оціночного розбирання елементної бази газотурбінних компресорів з урахуванням специфіки умов експлуатації та залишкового впливу на навколишнє середовище.

Ключові слова: ремонт, часткове розбирання, компресора великої потужності, газові турбіни, збереження ресурсу.

УДК 621.9 : 539.3

Чисельне моделювання верстатних пристроїв для механічної обробки деталей типу важелів / В.О. Иванов, В.С. Карпусь, І.М. Дегтярьов, І.В. Павленко, В.Р. Богдан // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 110-115. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2079-004X

У статті запропоновано конструкцію верстатного пристрою, який забезпечує достатню інструментальну доступність і дозволяє виконувати багатокординатну обробку деталей типу важелів при одному закріпленні. Дослідження, виконані методами чисельного моделювання, підтвердили, що запропонована конструкція відповідає усім параметрам точності. Результати досліджень напружено-деформованого стану показали, що величини переміщень і напружень, які виникають у процесі механічної обробки, у запропонованому верстатному пристрої менші, ніж у стандартних. Проведений модальний аналіз підтвердив, що запропонований верстатний пристрій має значно вищу динамічну жорсткість, ніж стандартні верстатні пристрої. Моделювання виконувалося для обробки важелів із сталі, чавуна, алюмінієвого сплаву. Визначені залежності переміщень і напружень від глибини різання, що дозволяє оптимізувати процес механічної обробки.

Ключові слова: верстатний пристрій, технологічний процес, фрезерування, напружено-деформований стан, напруження, переміщення, точність, частота.

УДК 539

Трибологическая система ультразвуковой сварки пластмасс. Тестовые расчеты / С.М. Исаков, С.І. Марусенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 116-118. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X

Запропоновано ітераційний алгоритм розрахунку параметрів процесу ультразвукового зварювання (УЗЗ) на базі трибологічної системи, яка визначається як якась логіко-математична структура, елементами якої є підсистеми матеріалів, випромінювання, динаміки, внутрішнього тертя, термодинаміки і власне ультразвукового інструменту. Розроблено критерії збіжності ітераційного процесу для істотно нелінійної моделі УЗЗ. Наведено тестові розрахунки для декількох типів зварювальних робочих наконечників.

Ключові слова: трибологічна система, високочастотне навантаження, ультразвукове зварювання, нелінійна математична модель, ітераційний алгоритм, критерії збіжності.

УДК 621.833.22

Прогнозирование ресурса конических передач с двояково-выпукло-вогнутыми зубьями / А.В. Кузнецова, А.Н. Гнидько, Т.В. Терещенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 119-123. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X

Розроблено методику прогнозування ресурсу конічних передач з двоопукло-вогнутими зубьями шляхом вибору раціональних параметрів зачеплення на підставі моделювання зношування робочих поверхонь зубців. Методика ґрунтується на двох математичних моделях: моделі зачеплення зубців та імітаційній чисельній моделі зношування зубців. Розроблено математичне забезпечення для прогнозування ресурсу конічних передач з ДОВ зубьями з урахуванням викривлення вихідного профілю робочої поверхні зубців після кожного циклу зміни напружень і, як наслідок, зміни значень геометричних (радіуси кривини профілів), кінематичних (швидкості кочення і швидкості ковзання) і силових (нормальна сила в зачепленні і контактні напруги) параметрів контакту зубців. Дослідження зносу зубців проводилися на базі аналізу зачеплення зубчастої передачі ріжучої частини вугільного комбайна РКУ10. Результати прогнозування ресурсу підтвержені експериментально.

Ключові слова: двоопукло-вогнуті зубці, знос, ресурс, геометричні, кінематичні і навантажувальні параметри контакту.

УДК 621.9.025

Системный подход к сравнительной оценке работоспособности инструментальных материалов по стандартным регламентам стойкостных испытаний / Ю. Г. Гуцаленко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 124-128. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X

Розглядається проблема порівняння експлуатаційних можливостей інструментальних матеріалів і ріжучих пластин з них. Прийнята до уваги розширена система критеріїв працездатності включас швидкість об'ємного знімання, стійкість, робочий шлях різання, площа обробленої поверхні, об'ємний з'їм. Запропоновано системну аналітичну модель і виконаний розрахунок для надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору в стандартних непереточуваних ріжучих пластинах. Розрахунок виконаний у системі умов і нормативів стандартних стойкостних випробувань. Показаний приклад розвитку аналітичної моделі стосовно оцінки рейтингу працездатності переточуваних ріжучих пластин в умовах неоднорозності допустимого зносу.

Ключові слова: кубічний нітрид бору, надтверді композити, ріжучі пластини, випробування на стійкість, працездатність, робочий шлях різання, об'ємний з'їм, порівняльна оцінка

УДК 620.178:539.4

Результаты исследования сопротивления усталости технических вариантов цапф задних мостов специальных транспортных средств / В. К. Лобанов, Г. И. Пашкова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 129-131. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X

У роботі виконано дослідження опору втоми цапф заднього моста транспортного засобу «Дозор» різних варіантів виготовлення. Для проведення випробувань використовували універсальну випробувальну машину, що дозволяє створювати максимальне статичне навантаження 500 кН і максимальне циклічне навантаження 250 кН з точністю $\pm 1\%$. Встановлено, що місце з'єднання цапфи з насадкою є менш навантаженим і напруженим, ніж шліци і зона кріплення цапфи до корпусу.

Ключові слова: транспортний засіб, задній міст, цапфа, опір втоми.

УДК 681.518.3

Анализ эффективности аппаратных средств управления продольной подачей шлифовального круга / О.Ф. Єнікєєв, Ф.М. Євсюкова, Л.О. Шинько // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 132-137. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X

На основі перетворення Лапласу уперше побудовано математичну модель апаратних засобів програмного управління повздовжньою подачею шлифовального круга. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі апаратних засобів синтезовано пристрій обробки вхідної інформації в умовах дії завад. Побудовано схему імітаційного моделювання та встановлено ефективність апаратних засобів, що розроблено.

Ключові слова: математична модель, структурно-логічна організація, інформаційний підхід.

УДК 621.95.015:53.096:620.22

The effect of cutting temperature on hole quality when drilling CFRP/metal stack / В.О. Колесник, Й. Заец, С. Радченко, М.А. Адамьян // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 138-141. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Волокнисті полімерні композиційні матеріали (вуглепластики) широко використовуються в пакетах з металами. Це дозволяє отримати компоненти з високою міцністю, разом з тим забезпечивши зниження ваги. Свердління отворів є основною механічною операцією при обробці пакетів вуглепластик / метал і метал / вуглепластика. Найбільш поширені проблеми механічної обробки пакетів вуглепластик / метал є розшарування вуглепластика, витягування волокон, термічна деструкція і низька якість поверхні отвори. У статті представлено дослідження впливу дію температури різання на якість отворів. Експериментально було встановлено, що свердління пакета вуглепластик / сталь супроводжувався істотною зміною температури різання в зоні різання при переході свердла з вуглепластика до металевої пластини.

Перехід свердла з вуглепластика в сталь і одночасна робота головної різальної крайки свердла в двох матеріалах провокує швидке збільшення температури різання в порівнянні з різанням кожного з компонентів окремо. Таким чином, при свердлінні вуглепластика швидкість зростання температури складу-ляла $8,9 \text{ }^\circ\text{C} / \text{с}$, в той час як при свердлінні пакету вуглепластик / стали одночасно $-31,7 \text{ }^\circ\text{C} / \text{с}$. Найбільше відхилення номінального розміру отворів у вуглепластика складало 250 мкм, а в сталі 150 мкм, що обумовлено истираючим впливом сталевих стружки на вуглепластик. Шорсткість поверхні в вуглепластика змінювалася від 3 до 6 мкм, а в сталі від 3 до 4,2 мкм. Це доводить, що вуглепластик є більш чутливим до зносу вершини свердла внаслідок зміни механізму стружкообразовання зі зрізання на зминання волокон. Розшарування верхніх шарів вуглепластика збільшилася на 30% при порівнянні останнього і першого отворів.

Ключові слова: свердління, якість поверхневого шару отвори, точність, пакет вуглепластик / метал, знос свердла, температура різання

УДК 621.9

Імітація поведінки технологічних систем з використанням мереж Петрі / О.Ю. Приходько, С.С. Сліпченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 142-144. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Імітаційне моделювання виконувалося для автоматичної лінії, що містить три одиниці технологічного обладнання та обслуговується конвеєрною системою і роботами-маніпуляторами. Імітаційна-ве моделювання уяві порівняння технологічних структур, в якості мети ставилося підвищення ступеня використання обладнання, враховувалося узгодження роботи ланок автоматичної лінії і поява і усунення відмов обладнання. Імітація взаємодії одиниць обладнання у вигляді мережі Петрі дозволяє вибрати структуру складної технологічної системи, узгодити роботу одиниць обладнання, виявити «вузькі місця» в роботі одиниць автоматичної лінії, визначити смності проміжних накопичувачів, оцінити рівень відмовостійкості системи, визначити вплив часу переналадження обладнання на продуктивність системи.

Ключові слова: мережі Петрі, імітаційне моделювання, дельта, мітка, алгоритм, керовані переходи, інгібіторні дуги, жавість мережі Петрі.

УДК 621.993.2

Область применения метода обработки внутренней резьбы метрическим инструментом / А.А. Нешта, Д.В. Криворучко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 145-149. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

У статті запропонована методика визначення рекомендованих областей застосування способу обробки різних типів внутрішніх різей (метричної, дюймової, трапецеїдальної, упорної, круглої) мірним інструментом на фрезерних верстатах з ЧПК. Розроблена методика визначення величини максимального відхилення в осьовому перерізі різі, а також встановлені залежності величини максимального відхилення від основних параметрів профілю різі. Визначено параметр профілю різі, який має найбільший вплив на величину максимального відхилення.

Ключові слова: внутрішня різь, мірний інструмент, максимальне відхилення, профіль різі, механічна обробка.

УДК 621.923

Аналитическое определение параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании с учетом износа зерен / В.Г. Шкурупий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 150-153. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

У роботі отримане нове теоретичне рішення про визначення параметрів шорсткості оброблюваної поверхні при абразивному поліруванні з урахуванням зношування абразивних зерен. Установлено, що утворення в процесі обробки на абразивних зернах площадок зношування приводить до істотного зменшення параметрів шорсткості поверхні. Показано, що застосування сферичних і овалізованих абразивних зерен слід розглядати суттєвим фактором згладжування мікронерівностей на оброблюваній поверхні зразка в процесі абразивного полірування. Показано, що отримане рішення справедливо для абразивного полірування з фіксованою швидкістю радіальної подачі й з фіксованим радіальним зусиллям.

Ключові слова: абразивне полірування, зношування зерен, площадки зношування, шорсткість поверхні.

УДК 621.923

Условия уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 154-157. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

У роботі отримані нові аналітичні рішення про умови зменшення сили й температури різання при звичайному й переривчастому шліфуванні з урахуванням процесів різання й тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом. Теоретично встановлено, що при переривчастому шліфуванні у зв'язку з динамічним характером взаємодії робочого виступу круга з оброблюваним матеріалом фактично відсутні пружні переміщення в технологічній системі. Це сприяє підвищенню продуктивності обробки. Температура різання при цьому змінюється за екстремальною залежністю зі збільшенням довжини робочого виступу переривчастого круга, приймаючи мінімальне значення за умови рівності довжини западини й робочого виступу круга.

Ключові слова: переривчасте шліфування, переривчастий круг, сила різання, температура різання.

УДК 539.3

Моделирование процесса горячей раскатки колец подшипника / Л.В. Автономова, С.Д. Грозенко, Е.А. Симсон // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 158-161. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

Проведено комп'ютерне моделювання процесу гарячого розкочування, що застосовується при виготовленні підшипникового кільця з урахуванням і без урахування впливу охолодження. Розглядається динамічна пов'язана контактна термопружно-пластична крайова задача при великих деформаціях і наявності впливу швидкостей деформування. Для цього високошвидкісного процесу деформування враховувалася залежність фізико-механічних властивостей матеріалу від рівня швидкостей деформацій і температур. Рішення нестационарної задачі теплопровідності проводилося для випадку повітряного охолодження і примусової рідинного охолодження. Моделювання процесу проводилося спеціалізованим скінчено-елементним програмним комплексом Deform 3D в модулі "Ring-rolling". Аналіз отриманих полів температур і еквівалентних напружень показав, що наявність примусового рідинного охолодження призводить до перерозподілу температури в кільці і до більш високих значень еквівалентних напружень, що більш реально відображає фізичну картину процесу гарячого розкочування підшипникового кільця.

Ключові слова: кільце підшипника, гаряче розкочування, Deform 3D, контактна задача, великі деформації, метод кінцевого елемента.

УДК 539

Оценка конструктивной прочности специализированного обрабатывающего инструмента / Л.В. Автономова, Е.А. Симсон, Д.С. Ягудін // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобу-

дуванні. – X : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 162-165. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Досліджено напружено-деформований стан оброблювального інструменту при динамічному навантаженні. Розглядається динамічна пружно-пластична крайова задача для двох варіантів локалізації ударного навантаження на конструкцію: удар робочого фронтального і нахиленого навісного елемента інструменту у перешкоду. Чисельно контактна задача вирішувалась методом скінчених елементів за допомогою програмного комплексу ANSYS. Аналіз полів розподілення еквівалентних напружень в оброблювальному інструменті при дії ударного навантаження показав, що в навісному робочому елементі і в несущій конструкції виникають пластичні деформації, які є неприпустимими. З метою вдосконалення міцносних характеристик оброблювального інструменту запропоновані зміни в геометрії його навісного робочого елемента.

Ключові слова: конструктивна міцність, оброблювальний інструмент, ударна взаємодія, пластичне деформування, несуща конструкція, метод скінчених елементів.

УДК 621.039.56

Исследование степени деформации двухслойных титано-воалюминиевых пакетов при ударном нагружении стальным инструментом с применением CAE систем / С.С. Добротворский, С.С. Гнучих, Л.Г. Добровольська // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 166-169. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

Для підвищення міцності і ударної стійкості, при одночасному зниженні матеріаломіцності машин, в сучасному машинобудуванні необхідно збільшення числа тонкостінних деталей, що мають багат шарову (сандвіч) структуру. Багат шарові структури, як правило, дозволяють отримати вироби з характеристиками, що перевершують властивості окремих матеріалів які до нього входять. Однак обробка таких багат шарових структур зазнає певних труднощів, оскільки в структуру можуть входити матеріали з абсолютно різним ступенем оброблюваності, зокрема, титан і алюмомагнієвий сплав. На наш погляд, подолати ці суперечності можна шляхом використання високошвидкісних методів обробки. Проте дослідження з цих питань вкрай обмежені. У даній роботі пропонується вирішувати цю проблему шляхом моделювання процесів високошвидкісного деформування сандвіч-пакетів з використанням методу кінцевих елементів.

Ключові слова: високошвидкісна обробка, титан, алюміній, CAE системи.

УДК 621.9.044

Исследование величины объема нанокластера и глубины его залегания при действии ионов разных энергий, сортов и зарядов на магниевые сплавы / Г.І. Костюк, Є. В. Миргородська, О.М. Мелкозьорова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 170-176. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-004X.

Проведені дослідження величини об'єму нанокластера та глибини його залегання у залежності від енергії, заряду та сорту іонів (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+), що дозволяє визначити склад іонів, їх енергії та заряди для одержання наноструктур у потрібному шарі, а з урахуванням необхідної густини іонного струму одержати практично усі технологічні параметри для одержання шару потрібної товщини та фізико-механічних характеристик у магнієвому сплаві.

Ключові слова: об'єм нанокластера, іони, глибина залегання, густина іонного струму, магнієвий сплав, наноструктури.

УДК 621.9.044

Дослідження процесів наростування та зношування різального інструмента за допомогою реологічного моделювання процесу різання / В.В. Ступницький, Я.В. Долинняк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 177-180. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

В даній статті розглянуто вплив зношення ріжучого інструмента (при змінній радіусі заокруглення ріжучої кромки) а також вплив висоти наростування на силу різання і температуру в зоні стружкоутворення при різних швидкостях різання. Дані отримані як результат використання методу кінцевих елементів за допомогою програмного продукту DEFORM 2D. Також в даній нау-

ковій публікації представлено аналіз результатів імітаційного реологічного моделювання процесів наростування та зношування ріжучого лека.

Ключові слова: наростування, знос ріжучого інструмента, метод кінцевих елементів, температура, сила різання.

УДК 621.833.22

Повышение качества соединения крупногабаритных составных изделий / В.Т. Лебідь, М.В. Тарельник, О.М. Лашкарьов, Л.Я. Ропьяк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 181-184. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

Наведено аналіз проблем та існуючих методів підвищення надійності нерухомих з'єднань. Для підвищення якості великогабаритних складових виробів запропонована технологія нанесення в області торців охоплюються деталей на контактуючі поверхні деталей, що сполучаються, методом електроерозійного легування (ЕЭЛ) комбінованого покриття: м'якого, наприклад, з бронзи, і твердого - сплави групи ВК (або ТК). Прогнозується підвищення працездатності великогабаритних складових виробів (зубчастих коліс, прокатних валків, універсальних шпинделів) до 24% при реалізації промислової технології нанесення комбінованих покриттів на посадочну поверхню охоплюваної деталі.

Ключові слова: метод, підвищення надійності, нерухомі з'єднання, великогабаритні складові вироби, технологія нанесення комбінованих покриттів, посадкова поверхню, охоплювана деталь.

УДК 621.9.015

Involute spiral face couplings and gears: design approach and manufacturing technique / А.Л. Капелевич, С.Д. Копосец // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 185-189. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

У даній роботі представлена спіралеподібні шестерні з евольвентним зубом лінії і однаковим профілем зуба в нормальній площині перерізу на будь-якому радіусі. Існують дві основні області застосування таких форм шестерень. Один з них являє собою альтернативне рішення з певними перевагами в продуктивності і технології виготовлення з прямим зубом. Інший додаток, коли форма шестерні з евольвентної косозубої шестірнею або черв'яком на пересічних осях. Потенційні переваги спіральних муфт і шестерень забезпечують високу потужність передачі крутного моменту поряд з високопродуктивною обробкою. У статті описується геометричний аналіз проектування шестерень та методика проектування спіральних форм евольвентних зубчастих коліс із симетричним і несиметричним профілями зубів. Запропонований технологічний спосіб зубофрезерування шестерень, розглянуто особливості конструкції та розрахунок інструменту.

Ключові слова: спіралеподібні шестерні, евольвентний зуб, продуктивність, технологічний спосіб, черв'як, пересічні осі, потужність, крутний момент, методика проектування, зубофрезерування, конструкція, розрахунок інструменту.

УДК 66.063

Анализ энергетических характеристик роторных аппаратов для гидродинамической активации гиджестей / А.В. Фесенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 190-193. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

У статті запропонована методика аналізу енергетичних характеристик роторних гідродинамічних активаторів, яка дозволяє на стадії попереднього вибору пристроїв за даними рекламних проспектів і статей визначити їх орієнтовну ефективність, проаналізовано однотипні конструкції гідродинамічних пристроїв по енергійності гідродинамічного впливу на робочу середу. Як приклад, виконана порівняльна оцінка розподілу витрат енергії в насосах, призначених для перекачування ріднинного середовища, і в роторно-пульсацийних апаратах (РПА), використовуваних для гідродинамічної активації. При визначенні ефективності РПА розглядається кількість енергії, яка витрачається безпосередньо на гідродинамічний і кавітаційний вплив на продукт.

Ключові слова: відцентровий насос, потужність, роторний апарат, активація, гідродинамічний вплив, питома енергія.

РЕФЕРАТЫ

УДК 519.874

Интеграционная технологическая подготовка промышленного предприятия PLM – решением / Ю.В. Тимофеев, В.А. Фадеев, О.Н. Шелковой, В.Д. Хицан, А.А. Клочко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 4-10. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

Основные положения концепции интеграционной технологической подготовки промышленного предприятия PLM-решением включают полное детальное описание, защищенное хранение и управляемое использование всей информации о продукции на протяжении всего жизненного цикла продукции с поддержкой целостности и непротиворечивости информации о продукции и поддержкой и управлением всеми бизнес-процессами, связанными с ними данными для распространения информации по всему предприятию. В состав PLM-решений на машиностроительного предприятия включены средства по управлению проектами, средства календарного планирования и управления требованиями с использованием средств Workflow, реально позволяющие автоматизировать бизнес-процессы в рамках всего предприятия.

Ключевые слова: интеграция, технологическая подготовка, машиностроительное предприятие, PLM-решение, информация, бизнес-процессы, функциональность; гибкость; масштабируемость, PDM-системы, САПР.

УДК 621.9.015

Технологическое обеспечение эксплуатационных параметров цилиндрических зубчатых передач при аппроксимативном решении контактно-гидродинамических задач смазки // В.В.Д. Ковалев, Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, Д.А. Кравченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 11-19. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

В статье рассмотрены основные виды разрушения зубчатых колес и технологическое обеспечение эксплуатационных параметров зубчатых передач путем аппроксимативного решения контактно-гидродинамической теории смазки зубчатых передач. Аппроксимативное решение основывается на физически обоснованном предположении о пропорциональности между прогибами активных эвольвентных поверхностей зубьев и соответствующими величинами давлений – эпюрой давлений (гипотеза Винклера–Циммермана) без решения сингулярного интегрального уравнения. Повышение сопротивляемости зубьев выкрашиванию достигается аппроксимативным решением контактно-гидродинамической задачи, в котором прогибы поверхности зубьев определяются методами упругости при помощи системы нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений последовательными приближениями. Установлена зависимость вязкости масла от давления с учетом безразмерных коэффициентов при контактировании зубьев в области трения качения-скольжения и увеличения эпюры гидродинамических давлений.

Ключевые слова: зубчатые колеса, технологическое обеспечение, эксплуатационные параметры, аппроксимативное решение, контактно-гидродинамической теория, смазки зубчатых передач, вязкость масла, давление, безразмерные коэффициенты.

УДК 621.922.025

Исследование смещения центра тяжести шлифовального круга обусловленное погрешностями его формы / Ю.А.Сизый, Д.В. Сталинский, П.В. Романченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 20-22. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-004X.

Одной из важнейших характеристик абразивных кругов для ручного обдирочного шлифования является неуравновешенность, поскольку определяет вибрационную характеристику работы ручных шлифовальных машин и, как следствие, условия работы операторов по вибрационной безопасности. В условиях современного абразивного производства, когда неоднородность структуры инструмента сведена к минимуму, основной причиной неуравновешенности являются погрешности геометрической формы абразивного круга. В статье получены формулы для расчета величины смещения центра тяжести круга, обусловленного погрешностями его формы, такими как эксцентricитетность оси вращения относительно наружной поверхности круга и непаральностью его торцов. На основе полученных формул произведен анализ требований к точно-

сти изготовления кругов для ручных шлифовальных машин. Установлена несогласованность требований ГОСТ 23182-78 между нормируемой им геометрической точностью абразивного круга и допустимым дисбалансом.

Ключевые слова: шлифовальный круг, погрешности формы круга, дисбаланс, ручная шлифовальная машина.

УДК 621.9.04

Оборудование для высокочастотной вибрационной обработки деталей микрорезания с формированием специального микропрофиля поверхности / В.Б. Струтинский, И.В. Перфилов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 23-27. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Приведены результаты исследований, выполненных при разработке оборудования для высокочастотной вибрационной обработки деталей микрорезания. Для повышения точности оборудования предложена специальная методика, которая заключается в определении параметров фигур Лиссажа, формирующиеся приводами перемещения стола. Приведены результаты опытно-промышленной апробации разработанного оборудования. Подтверждена работоспособность разработанного оборудования и возможность формирования специального микропрофиля.

Ключевые слова: оборудование, вибрации, микрорезание, пьезоприводы, микропрофиль.

УДК 621.9.044

Конструкторско-технологические способы повышения производительности и качества зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов / Е.В. Мироненко, В.Ф. Шаповалов, А.А. Клочко, С.Ю. Палашек, Е.В. Остапович // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 28-32. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

Разработаны конструкторско-технологические способы с целью повышения производительности и качества зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов на основании анализа геометрии зацепления и профиля зубьев с учетом установления зависимости величины отклонения эвольвентной кривой профиля зуба. Отклонение от касательной к эвольвентной кривой профиля зуба, проведенной в точке, расположенной на делительной окружности при модуле свыше 25 мм и числа зубьев $Z_k \geq 130$ укладываются в допуски на изготовление колес с эвольвентным зацеплением по 9-й степени точности. В рассматриваемых случаях эвольвентный профиль зуба может быть заменен на прямолинейный, что позволяет значительно повысить эффективность технологического процесса зубофрезерования. Аналитически обосновано, что с прямолинейным профилем зубьев на колесе при $m=25$ мм и выше и числе зубьев $Z_k = 130-200$ необходимо вводить в зацепление шестерни, имеющие сопряженный профиль зубьев.

Ключевые слова: крупногабаритные зубчатые венцы, производительности, геометрия зацепления, профиль зубьев, конструкторско-технологические способы, метод трепанации.

УДК 621.9.02

Сравнительный анализ графических моделей боковых профилей треугольной резьбы: заданного стандартом и полученного с помощью резца с ненулевым значением переднего угла / О.Р.Онисько, П.М. Процак // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 33-36. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X

В статье предлагается к рассмотрению программа реализации исследования влияния переднего угла резьбонарезного резца на точность воспроизведения заданного профиля резьбы. Алгоритм приложения использует разработанные нами ранее аналитические зависимости, использующие гиперболическую коррекцию режущей кромки резьбонарезного резца с ее последующим выпрямлением на основе линейной интерполяции. В созданном приложении также использованы разработанные нами раньше алгоритмические зависимости осевого профиля конвольютного винта от величины его диаметра, угла наклона профиля и величины переднего угла резца. Полученные результаты показали значительное отклонение профиля резьбы, изготовленной с помощью резца с неоткорректированным профилем режущей кромки и близкий к заданному стандарту

профиль резцы, произведенной резцом, чья режущая кромка изготовлена по предложенному здесь алгоритму.

Ключевые слова: резьбонарезной резец, передний угол, конволютный винт, геликоид, гиперболический профиль, трансцендентная функция, алгебраическая функция.

УДК 004.896 + 621.7.01

Опыт создания современных технологий изготовления жестких деталей с применением передовых CAD/CAM/CAE систем / С.С. Добротворский, М.И. Гасанов, Е.В. Басова, Р.В. Головатый, С.А. Гаков, С.С. Гнучих // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 37-40. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Для снижения материалоемкости машин в современном машиностроении необходимо увеличение в общей номенклатуре деталей с тонкостенными, жесткими элементами. Достижение конструктивной прочности деталей машин предлагается за счет использования возможностей передовых CAD/CAM/CAE систем, которые позволяют выполнить не только качественную организацию технологической подготовки производства на отдельных этапах создания передовых технологий, но и в режиме «on-line» исследовать влияния различных технологических факторов на качественные изменения в пластически деформированном слое материала и дифференцировать корреляцию процесса стружкообразования и напряженно-деформированного состояния материала в зависимости от угла наклона стружкоотводной канавки инструмента. Полученные результаты имитационного 3D моделирования позволили установить, что с повышением скорости резания возрастает перспектива использования инструмента с положительным передним углом режущей кромки для обеспечения требуемых параметров.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, технологический процесс, обрабатывающий центр, CAD/CAM/CAE системы, конкурентоспособность, оптимизация.

УДК 621.9.015 + 621.91.01

Моделирование технологического обеспечения производственно-технических характеристик блочно-модульных инструментов на основе Многокритериальной оптимизации / А.Н. Кравцов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 41-50. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

Рассмотрено обеспечение эксплуатационных характеристик блочно-модульных инструментов при многокритериальной регламентации параметров поверхностного слоя их деталей с помощью комплексных параметров и системной оптимизации для механических методов обработки, разработаны рекомендации по применению комплексных параметров состояния контактирующих поверхностей деталей блочно-модульных резцов для повышения качества изготовления инструмента. Выполнен анализ взаимодействия контактирующих поверхностей. Раскрыты три основных подхода к оценке геометрических характеристик: традиционный - параметрический, непараметрический, с использованием спектральной теории неровностей. Проанализированы основные теоретические предпосылки и принимаемые модели, используемые при рассмотрении вопросов контактного взаимодействия. Показано, что параметры состояния поверхностного слоя в процессе эксплуатации изменяют свои значения, что приводит к изменению характеристик зоны контактного взаимодействия.

Ключевые слова: эксплуатационные свойства, блочно-модульный инструмент, геометрические характеристики, комплексные параметры, системная оптимизация, контактирующие поверхности.

УДК 621.9.048

Новый способ формирования антифрикционного баббитового слоя подшипников скольжения / В.Б. Тарельник, А.В. Дзюба // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 51-56. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

В работе обоснована необходимость создания поверхностных слоев деталей машин с особыми свойствами для узлов трения скольжения. Исследования процессов формирования баббитовых покрытий, направленные на повышение их качества, своевременны и актуальны, а создание поверхностных слоев с особыми свойствами для узлов трения скольжения, в данном случае подшипников скольжения (ПС), является актуальной задачей. Полученное комбинированное электроэрозионное покрытие имеет минимальную

толщину 250 мкм, а максимальную толщину 1,0 мм. Дальнейшее увеличение толщины слоя возможно, но не целесообразно вследствие увеличения времени обработки и снижения механической прочности баббита. Вкладыши подшипников скольжения, обработанные предлагаемым способом, имеют высокую надежность и долговечность при работе ПС так как на всех этапах формирования антифрикционного покрытия, обеспечивается прочная металлическая связь, как между подложкой и промежуточным слоем из меди, оловянной бронзы или олова, так и с последующим слоем из оловянного баббита.

Ключевые слова: электроэрозионное легирование, поверхностный слой, структура, баббит, вкладыш подшипника, медь, олово, бронза, микротвердость.

УДК 622.245

Геометрическое определение гиперболического профиля задней поверхности круглого фасонного радиального резца / В.Г. Панчук, В.В. Шуфлин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 57-59. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

Статья предлагает к рассмотрению геометрический расчет точек гиперболического профиля задней поверхности, принадлежащей круглому радиальному фасонному резцу. В основу алгоритма положена зависимость расчета от высоты установок резца, его максимального диаметра и профиля конической детали. Благодаря предложенной конструкции появляется возможность наиболее точной обработки конических деталей. При этом предложенный резец имеет плоскую переднюю поверхность – наиболее технологичную для заточки инструмента в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: резец, круглый радиальный фасонный резец, фасонное точение, обработка конических поверхностей, гиперболический профиль, задний угол.

УДК 681.335.2:519.85

Разработка математических моделей для обгрунтования алгоритмів прийняття рішень при діагностуванні верстатного комплексу з чпк в альтернативних ситуаціях / Н.Р. Веселовська // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 60-67. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-004X.

Отмечено, что в зависимости от вида принятого решения в существенной степени зависит эффективность работы всего комплекса «объект-система диагностирования». Сделан вывод, что синтез алгоритмов принятия решений СД базируется на математической теории проверки гипотез и теории информации, а критерии формулируются как конкретно поставленные оптимизационные задачи. Разработанные математические модели для обоснования алгоритмов принятия решения при диагностировании станочного комплекса с ЧПУ в альтернативных ситуациях и полученные математические описания информационных процессов при принятии решения. Подчеркнуто, что проблема принятия решения составляет суть любой целенаправленной человеческой деятельности. Разработана общая структурная схема алгоритма принятия решения, а также алгоритма моделирования процесса диагностирования, который полно отражает работу всей системы и включает в себя достаточное количество параметров, обеспечивает получение статистических данных о функционировании СД (модели), реагирует на все изменения в системе, отвечает всем требованиям простоты его использования при составлении программного обеспечения. Доказано, что алгоритм принятия решения в статистической задаче зависит от трех элементов: класса плотности распределения $W(x)$, которому предположительно принадлежит наблюдения X ; структуры пространства возможных решений Y ; формы функции издержек L_0 и выигрышей L_1, L_0 , а структура пространства возможных решений может быть условно определена следующими ситуациями: двухальтернативной, трехальтернативной и (или) многоальтернативной, что требует принятия одного из многих решений. На основе анализа математических моделей синтезированы и исследованы критерии, алгоритмизируют получение оптимальных параметров при применении их в промышленном производстве.

Ключевые слова: математическая модель диагностирования, станочный комплекс с ЧПУ, математические описания, информационные процессы, алгоритм моделирования, программное обеспечение, промышленное производство.

УДК 519.874

Стратегическая и оперативная автоматизации системы управления подготовки производства / Е.В. Набока, М.Э. Колесник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – No 4 (1113). – С. 68-71. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X

Решение задачи разработки проекта автоматизации деятельности производственных служб машиностроительного предприятия направлено на оптимизацию и автоматизацию и имеет стратегическое важное влияние на перспективность деятельности самого предприятия. В статье рассмотрена задача разработки проекта автоматизации деятельности планово-экономического отдела машиностроительного предприятия. Задача решается в рамках условия сокращения времени на выполнение документооборота отдела. Предложено изменение в функционировании подразделения. Рассмотрены возможные пути решения поставленной задачи на основе использования рекомендуемой технологии управления предприятием с применением системы «Галактика». Ввод в эксплуатацию системы «Галактика» обеспечивает автоматизацию технико-экономического планирования и статистики, перспективных и текущих планов производства по предприятию по установленному перечню технико-экономических показателей, разработке годовых, квартальных и месячных планов цехов машиностроительного предприятия по установленному перечню технико-экономических показателей.

Ключевые слова: проект, автоматизация, производственные службы, машиностроительное предприятие, оптимизация, технология управления, технико-экономическое планирование.

УДК 621.9.02

Математическое моделирование процесса обработки отверстий комбинированным осевым инструментом / М.С. Иванова // Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – No 4 (1113). – С. 72-75. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-004X.

Приведены особенности обработки отверстий комбинированным осевым инструментом. Предложен алгоритм выбора структуры комбинированного осевого инструмента для реализации технологического процесса обработки совокупности отверстий, основанный на анализе их конструктивно-технологических характеристик и увеличении концентрации технологических переходов. Предложена математическая модель, позволяющая описать структуру комбинированного осевого инструмента и принцип работы его ступеней.

Ключевые слова: обработка отверстий, комбинированный осевой инструмент, технологический процесс, концентрация операций

УДК 658.8.01: 005.21

Анализ механизмов реализации производственно-сбытовой деятельности производственного предприятия / Ю.А. Ключко, Е.В. Камчатная-Степанова, Н.Г. Сикетина // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – No 4 (1113). – С. 76-78. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-004X

В статье рассматриваются принципы и необходимость использования системно-синергетического подхода в сфере анализа производственно-сбытовой деятельности производственного предприятия. Дана характеристика системного подхода в нелинейной среде и синергетического подхода. Выработаны теоретические и методологические основы анализа механизмов реализации производственно-сбытовой деятельности отечественного промышленного предприятия. Рассмотрены особенности отечественного рынка сырья. На основе результатов анализа фактически сложившейся в Украине системы сбыта материалов выделены особенности механизма формирования структуры сбыта и каналов товародвижения на рынке продукции промышленности

Ключевые слова: нелинейная среда, сбыт, каналы сбыта, продукция, материалы, система, синергетика

УДК 621.9.02

Проектно-конструкторські основи вдосконалення технології виготовлення шарошок із вставним твердосплавним породоруйнівним оснащенням тришарошкових бурових доліт / Р.С. Яким, А.М. Сльпчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – No 4 (1113). – С. 79-82. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X

В данной статье рассматриваются типичные конструкции крепления твердосплавных зубьев к корпусу шарошки в трехшарош-

ечные долота. Исследована конструкция посадки породоразрушающего элемента в шарошку, которая улучшает качество закрепления зубка при меньших напряжениях в соединении. Предложенные конструкторские решения по совершенствованию технологии изготовления шарошек с вставным твердосплавным породоразрушающим оснащением трехшарошечных буровых долот, которые позволяют существенно повысить эксплуатационные показатели отечественных буровых долот. Проанализированы напряженно-деформированное состояние запрессованного зубка и шарошки в типичной конструкции и модернизированной с помощью CAD / CAE системы.

Ключевые слова: трехшарошечные буровые долота, плоскость забоя, моделирование, метод конечных элементов, цементации венцов шарошки, породоразрушающее оснащение, контактные давления, твердосплавные зубки.

УДК 519.02

Конструкторско-технологическое проектирование гибких производственных систем методами имитационного моделирования / А. Н. Шелковой, М.С. Степанов, М. С. Семченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – No 4 (1113). – С. 83-88. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X

Предлагается метод исследования продуктивности и надежности обработки детали «Корпус редуктора» в гибкой производственной системе крупносерийного производства на базе станка 6Н12ПБ и гибкого производственного модуля МА2765МЗФ4 с использованием специальных инженерных программ. Проведенное исследование позволило сократить время для расчетов, более точно представить сам процесс обработки, получить более точные результаты исследований, разработать технологическую документацию, подобрать необходимую оснастку и инструмент, основное и дополнительное оборудование.

Ключевые слова: гибкое автоматизированное производство (ГАП), электронно-вычислительная техника (ЭВМ), числовое программное управление (ЧПУ), роботизированный технологический комплекс (РТК), гибкий производственный модуль (ГПМ), производственный модуль (ПМ), производственная система (ПС), технологический процесс (ТП), управляющая программа

УДК 621.9.01

Оптимизация режимов резания при обработке инструментальными блоками / І.Е. Яковенко, О.А. Пермяков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – No 4 (1113). – С. 89-92. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X

Предлагается методика расчета режимов резания отдельных инструментов при многоинструментной обработке для различных вариантов замены инструмента в процессе эксплуатации и с учетом вероятностного характера стойкости инструмента при заданной нагрузке на отказ, которая позволяет обеспечить заданный такт выпуска детали с минимальными затратами, связанными с эксплуатацией режущего инструмента, а также минимизировать другие составляющие технологической себестоимости обработки.

Ключевые слова: инструментальная наладка, стойкость инструмента, скорость резания, частота вращения, наработка на отказ.

УДК 621

Диагностика безотказности технологических систем по измеряемым показателям качества / Н. Ю. Ламнаур // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – No 4 (1113). – С. 93-95. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X

Решается задача технологии машиностроения, касающаяся контроля, управления и диагностики технологических систем. Предложена новая формула расчета безразмерного показателя качества технологической системы с учетом номинальных значений измеряемых характеристик качества изделий машиностроения. Найдены оценки параметров моделей безразмерного показателя качества технологической системы. Результаты исследований применялись для создания методики оценки безотказности технологической системы по измеряемым показателям качества.

Ключевые слова: качество, безотказность, надежность, диагностика, технологическая система.

УДК 621.95

Образование дефектов при сверлении слоньих композиций и механизм появления расслаивания / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – No 4 (1113). – С. 96-100. – Бібліогр.: 31 назв. – ISSN 2079-004X

Рассмотрены физический, технологический и математический аспекты появления дефектов при сверлении многослойных композиционных материалов. Представлен анализ экспериментальных и теоретических исследований образования расслоения и скалывания в заготовке при сверлении. Описан механизм появления таких дефектов и современное состояние проблемы прогнозирования их количественных характеристик. Проанализировано влияние различных технологических факторов на уменьшение величины дефектов, в том числе фактора расслоения. Приведены модели прогнозирования появления дефектов и пути их минимизации в процессе сверления.

Ключевые слова: дефекты сверления, слоистые композиты, расслаивание при сверлении.

УДК 621.9.23

Исследование влияния усилий закрепления режущей пластины по цилиндрическому отверстию на динамические характеристики сборного резаца / Г.П. Клименко, В.С. Гузенко, И.И. Полупан // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С.101-103. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X

В статье приведены результаты исследований влияния величины силы закрепления по цилиндрической поверхности отверстия режущей пластины на прочностные и динамические характеристики усовершенствованной конструкции сборного чашечного резаца для обработки колесных пар. Установлено, что существенное влияние величины радиальной силы закрепления по цилиндрической поверхности отверстия режущей пластины оказывает на жесткостные характеристики конструкции сборного чашечного резаца.

Ключевые слова: сборный чашечный резац, цилиндрическая поверхность, жесткость, прочность, динамические характеристики, колесная пара, угол конуса оправки.

УДК 621.03.004.74:621.03.004.67 - 167.7

Saving disassembly at heavy-duty gas turbine compressor reengineering / Е.В. Конопляченко, В.Н. Колодненко, В. Аталавэй // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С.104-109. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-004X

В статье рассмотрены вопросы сохранения ресурса тяжело нагруженных ответственных изделий машиностроения на этапе их ремонта, на примере газотурбинных компрессоров большой мощности. Приведены основные причины и указаны результаты отказов турбокомпрессорных установок. Рассмотрены современные концепции поиска рационального пути доступа к отказавшему элементу сложного оборудования. Предложена методика сохранной разборки элементной базы газотурбинных компрессоров с учетом специфики условий эксплуатации и остаточного влияния на окружающую среду.

Ключевые слова: ремонт, частичная разборка, компрессора большой мощности, газовые турбины, сохранение ресурса.

УДК 621.9 : 539.3

Чисельне моделювання верстатних пристроїв для механічної обробки деталей типу важелів / В.О. Іванов, В.Є. Карпусь, І.М. Дегтярьов, І.В. Павленко, В.Р. Богдан // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С.110-115. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2079-004X

В статье предложена конструкция станочного приспособления, которое обеспечивает инструментальную доступность и позволяет выполнять многокоординатную обработку деталей типа рычагов при одном закреплении. Исследования, выполненные методами численного моделирования, подтвердили, что предложенная конструкция соответствует всем параметрам точности. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния показали, что величины перемещений и напряжений, возникающих в процессе механической обработки, в предложенном приспособлении меньше, чем в стандартных приспособлениях. Выполненный модальный анализ подтвердил, что предложенное приспособление имеет значительно большую динамическую жесткость, чем стандартные приспособления. Моделирование проводилось для обработки рычагов из стали, чугуна и алюминиевого сплава. Определены зависимости перемещений и напряжений от глубины резания, которые позволяют оптимизировать процесс механической обработки.

Ключевые слова: станочное приспособление, технологический процесс, фрезерование, напряженно-деформированное состояние, напряжения, перемещения, точность, частота.

УДК 539

Трибологическая система ультразвуковой сварки пластмасс. Тестовые расчеты / С.Н. Исаков, С.И. Марусенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 116-118. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X

Предложен итерационный алгоритм расчета параметров процесса ультразвуковой сварки (УЗС) на базе трибологической системы, которая определяется как некая логико-математическая структура, элементами которой являются подсистемы материалов, излучения, динамики, внутреннего трения, термодинамики и собственно ультразвукового инструмента. Выработаны критерии сходимости итерационного процесса для существенно нелинейной модели УЗС. Приведены тестовые расчеты для нескольких типов сварочных рабочих наконечников.

Ключевые слова: трибологическая система, высокочастотное нагружение, ультразвуковая сварка, нелинейная математическая модель, итерационный алгоритм, критерии сходимости.

УДК 621.833.22

Прогнозирование ресурса конических передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями / А.В. Кузнецова, А.Н. Гнигько, Т.В. Терещенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С.119-123. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X

Разработана методика прогнозирования ресурса конических передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями путем выбора рациональных параметров зацепления на основании моделирования изнашивания рабочих поверхностей зубьев. Методика основывается на двух математических моделях: модели зацепления зубьев и имитационной численной модели изнашивания зубьев. Разработано математическое обеспечение для прогнозирования ресурса конических передач с ДВВ зубьями с учетом искажения исходного профиля рабочей поверхности зубьев после каждого цикла изменения напряжений и, как следствие, изменения значений геометрических (радиусы кривизны профилей), кинематических (скорости качения и скорости скольжения) и силовых (нормальная сила в зацеплении и контактные напряжения) параметров контакта зубьев. Исследование износа зубьев проводилось на базе анализа зацепления зубчатой передачи режущей части угольного комбайна РКУ10. Результаты прогнозирования ресурса подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: двояковыпукло-вогнутые зубья, износ, ресурс, геометрические, кинематические и нагрузочные параметры контакта.

УДК 621.9.025

Системный подход к сравнительной оценке работоспособности инструментальных материалов по стандартным регламентам стойкостных испытаний / Ю. Г. Гуцаленко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 124-128. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X

Рассматривается проблема сравнения эксплуатационных возможностей инструментальных материалов и режущих пластин из них. Принятая во внимание расширенная система критериев работоспособности включает скорость объемного съема, стойкость, рабочий путь резания, площадь обработанной поверхности, объемный съем. Предложена системная аналитическая модель и выполнен расчет для сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора в стандартных непереключаемых режущих пластинах. Расчет выполнен в системе условий и нормативов стандартных стойкостных испытаний. Показан пример развития аналитической модели применительно к оценке рейтинга работоспособности переключаемых режущих пластин в условиях неоднозначности допустимого износа.

Ключевые слова: кубический нитрид бора, сверхтвердые композиты, режущие пластины, стойкостные испытания, работоспособность, рабочий путь резания, объемный съем, сравнительная оценка

УДК 620.178:539.4

Результаты исследования сопротивления усталости технических вариантов цапф задних мостов специальных транспортных средств / В. К. Лобанов, Г. И. Пашкова // Вісник НТУ

«ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С.129-131. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

У роботі виконано дослідження опору втомі цапф заднього моста транспортного засобу «Дозор» різних варіантів виготовлення. Для проведення випробувань використовували універсальну випробувальну машину, що дозволяє створювати максимальне статичне навантаження 500 кН і максимальне циклічне навантаження 250 кН з точністю $\pm 1\%$. Встановлено, що місце з'єднання цапфи з насадкою є менш навантаженим і напруженим, ніж шліци і зона кріплення цапфи до корпусу.

Ключові слова: транспортний засіб, задній міст, цапфа, опір втомі.

УДК 681.518.3

Анализ эффективности аппаратных средств управления продольной подачей шлифовального круга / А.Ф. Еникеев, Ф.М. Евсюкова, Л.А. Шищенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 132-137. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

На основе преобразования Лапласа впервые построена математическая модель аппаратных средств программного управления продольной подачей шлифовального круга. Минимизацией квадратичного критерия качества с использованием эталонной модели аппаратных средств синтезировано устройство обработки входной информации в условиях действия помех. Построена схема имитационного моделирования и установлена эффективность разработанных аппаратных средств.

Ключевые слова: математическая модель, структурно-логическая организация, информационный подход.

УДК 621.95.015:53.096:620.22

The effect of cutting temperature on hole quality when drilling cfrp/metal stack / В.А. Колесник, Й. Заец, С. Радченко, М.А. Адамьян // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 138-141. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Волокнистые полимерные композиционные материалы (углепластики) широко используются в пакетах с металлами. Это позволяет получить компоненты с высокой прочностью, вместе с тем обеспечить снижение веса. Сверления отверстий является основной механической операцией при обработке пакетов углепластик / металл и металл / углепластик. Наиболее распространенные проблемы механической обработки пакетов углепластик / металл являются расслаивание углепластика, вытягивание волокон, термическая деструкция и низкое качество поверхности отверстия. В статье представлено исследование влияния действие температуры резания на качество отверстий. Экспериментально было установлено, что сверление пакета углепластик / сталь сопровождался существенным изменением температуры резания в зоне резания при переходе сверла из углепластика к металлической пластине.

Переход сверла из углепластика в сталь и одновременная работа главной режущей кромки сверла в двух материалах провоцирует быстрое увеличение температуры резания в сравнении с резанием каждого из компонентов по отдельности. Таким образом, при сверлении углепластика скорость роста температуры составляла $8,9^\circ\text{C}/\text{с}$, в то время как при сверлении пакета углепластик / стали одновременно – $31,7^\circ\text{C}/\text{с}$. Наибольшее отклонение номинального размера отверстий в углепластике составила 250 мкм, а в стали 150 мкм, что обусловлено истирающим воздействием стальной стружки на углепластик. Шероховатость поверхности в углепластике изменялась от 3 до 6 мкм, а в стали от 3 до 4,2 мкм. Это доказывает, что углепластик является более чувствительным к износу вершины сверла вследствие изменения механизма стружкообразования со срезания на смятие волокон. Расслаивание верхних слоев углепластика увеличилось на 30% при сравнении последнего и первого отверстий.

Ключевые слова: сверление, качество поверхностного слоя отверстия, точность, пакет углепластик / металл, износ сверла, температура резания

УДК 621.9

Імітація поведінки технологічних систем з використанням мереж петрі / О.Ю. Приходько, С.Є. Сліпченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 142-144. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Имитационное моделирование выполнялось для автоматической линии, содержащей три единицы технологического оборудо-

вания и обслуживаемой конвейерной системой и роботами-манипуляторами. Имитационное моделирование подразумевает сравнение технологических структур, в качестве цели ставилось повышение степени использования оборудования, учитывалось согласование работы звеньев автоматической линии и появление и устранение отказов оборудования. Имитация взаимодействия единиц оборудования в виде сети Петри позволяет выбрать структуру сложной технологической системы, согласовать работу единиц оборудования, выявить «узкие места» в работе единиц автоматической линии, определить емкости промежуточных накопителей, оценить уровень отказоустойчивости системы, определить влияние времени переналадки оборудования на производительность системы.

Ключевые слова: сети Петри, имитационное моделирование, деталь, метка, алгоритм, управляемые переходы, ингибиторные дуги, живость сети Петри.

УДК 621.993.2

Область применения метода обработки внутренней резьбы мерным инструментом / А.А. Нешта, Д.В. Криворучко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 145-149. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

В статье предложена методика определения рекомендуемых областей применения способа обработки различных типов внутренних резьб (метрической, дюймовой, трапецидальной, упорной, круглой) мерным инструментом на фрезерных станках с ЧПУ. Проведено исследование по определению величины максимального отклонения в осевом сечении резьбы, а также установлены зависимости величины максимального отклонения от основных параметров профиля резьбы. Определен параметр профиля резьбы, который оказывает наибольшее влияние на величину максимального отклонения.

Ключевые слова: внутренняя резьба, мерный инструмент, максимальное отклонение, профиль резьбы, механическая обработка.

УДК 621.923

Аналитическое определение параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании с учетом износа зерен / В.Г. Шкурूपий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 150-153. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

В работе получено новое теоретическое решение об определении параметров шероховатости обрабатываемой поверхности при абразивном полировании с учетом износа абразивных зерен. Установлено, что образование в процессе обработки на абразивных зернах площадок износа приводит к существенному уменьшению параметров шероховатости поверхности. Показано, что применение сферических и овализованных абразивных зерен следует рассматривать существенным фактором сглаживания микронеровностей на обрабатываемой поверхности образца в процессе абразивного полирования. Показано, что полученное решение справедливо для абразивного полирования с фиксированной скоростью радиальной подачи и с фиксированным радиальным усилием.

Ключевые слова: абразивное полирование, износ зерен, площадки износа, шероховатость поверхности.

УДК 621.923

Условия уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2015. – No 4 (1113). – С. 154-157. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

В работе получены новые аналитические решения об условиях уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании с учетом процессов резания и трения связи круга с обрабатываемым материалом. Теоретически установлено, что при прерывистом шлифовании в связи с динамическим характером взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом фактически отсутствуют упругие перемещения в технологической системе. Это способствует повышению производительности обработки. Температура резания при этом изменяется по экстремальной зависимости с увеличением длины рабочего выступа прерывистого круга, принимая минимальное значение при равенстве длины впадины и рабочего выступа круга.

Ключевые слова: прерывистое шлифование, прерывистый

круг, сила резания, температура резания.

УДК 539.3

Моделирование процесса горячей раскатки колец подшипника / Л.В. Автономова, Е.Д. Грозенок, Э.А. Симсон // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 158-161. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

Проведено комп'ютерне моделювання процесу горячої раскатки, застосованого при виготовленні підшипникового кільця з урахуванням і без урахування впливу охолодження. Розглядається динамічна зв'язана контактна термоупруго-пластична крайова задача при великих деформаціях і наявності впливу швидкостей деформування. Для цього високоскоростного процесу деформування вивчається залежність фізико-механічних властивостей матеріалу від рівня швидкостей деформацій і температур. Розв'язання нестационарної задачі теплопровідності проводилося для випадку повітряного охолодження і примусового жидкостного охолодження. Моделювання процесу проводилося спеціалізованим скінченно-елементним програмним комплексом Deform 3D в модулі «Ring-rolling». Аналіз отриманих полів температур і еквівалентних напружень показав, що наявність примусового жидкостного охолодження призводить до перерозподілу температур в кільці і к більш високим значенням еквівалентних напружень, що більш реально відображає фізичну картину процесу горячої раскатки підшипникового кільця.

Ключевые слова: кільце підшипника, горяча раскатка, Deform 3D, контактна задача, великі деформації, метод скінченного елемента.

УДК 539

Оценка конструктивной прочности специализированного обрабатывающего инструмента / Л.В. Автономова, Э.А. Симсон, Д.С. Ягудин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 162-165. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Вивчено напружено-деформоване стан інструменту при динамічному навантаженні. Розглядається динамічна упруго-пластична крайова задача для двох варіантів локалізації ударного навантаження на конструкцію: удар робочого фронтального і нахилного навісного елемента інструменту з перешкодою. Численно контактна задача розв'язувалася методом скінченних елементів з допомогою програмного комплексу ANSYS. Аналіз полів розподілу еквівалентних напружень в оброблюваному інструменті при дії ударного навантаження показав, що в навісному робочому елементі і в несущій конструкції виникають пластичні деформації, які не допустимі. З метою покращення прочностних характеристик оброблюваного інструменту пропонується змінити геометрію його навісного робочого елемента.

Ключевые слова: конструктивна міцність, оброблюваний інструмент, ударне впливання, упруго-пластичне деформування, несущая конструкція, метод скінченних елементів

УДК 621.039.56

Исследование степени деформации двухслойных титано-воалюминиевых пакетов при ударном нагружении стальным инструментом с применением САЕ систем / С.С. Добротворский, С.С. Гнучих, Л.Г. Добровольская // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 166-169. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

Для підвищення міцності і ударної стійкості, при одночасному зниженні матеріаломіцності машин, в сучасному машинобудуванні необхідно збільшення числа тонкостінних деталей, які мають багаторівневий (сандвіч) структуру. Багаторівнева структура, як правило, дозволяє отримувати вироби з характеристиками, переважаючими властивостями окремих входять в них матеріалів. Однак обробка таких багаторівневих структур представляє певні складнощі, так як в структуру можуть входити матеріали з повністю різною ступенню оброблюваності, в частині, титан і алюмомігнетний сплав. На наш погляд, подолати ці супереччя можна шляхом використання високоскоростних методів обробки. Однак дослідження по цьому питанню дуже обмежені. В даній роботі пропонується розв'язати цю проблему шляхом моделювання процесів високоскоростного деформування сандвіч-пакетів з використанням методу скінченних елементів.

Ключевые слова: високоскоростна обробка, титан, алюміній, САЕ системи.

УДК 621.9.044

Исследование величины объема нанокластера и глубины его залегания при действии ионов разных энергий, сортов и зарядов на магниевые сплавы / Г.И. Костюк, Е.В. Миргородская, О.М. Мелкозёрова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 170-176. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-004X.

Виконано дослідження величини об'єму нанокластера і глибини його залягання в залежності від енергії, заряду і сорту іонів (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+), що дозволяє визначити склад іонів, їх енергії і заряди для отримання наноструктур в потрібному шарі, а з урахуванням необхідної щільності іонного потоку отримати практично всі технологічні параметри для отримання шару потрібної товщини і фізико-механічних характеристик в магнієвому сплаві.

Ключевые слова: об'єм нанокластера, іони, глибина залягання, щільність іонного потоку, магнієвий сплав, наноструктура.

УДК 621.9.044

Дослідження процесів наростування та зношування різального інструмента за допомогою реологічного моделювання процесу різання / В.В. Ступницький, Я.В. Долиняк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 177-180. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.

В даній статті розглянуто вплив зносу (при зміні радіуса закруглення режущої кромки) і висоти наростування режущого інструмента на силу різання і температуру в зоні стружкоутворення при різних швидкостях різання. Дані отримані на основі використання методу скінченних елементів з допомогою програмного продукту DEFORM 2D. Також в даній науковій публікації представлено аналіз результатів імітаційного реологічного моделювання процесів наростування і зносу режущого лезва.

Ключевые слова: наростування, знос режущого інструмента, метод скінченних елементів, температура, сила різання.

УДК 621.833.22

Повышение качества соединения крупногабаритных составных изделий / В.Т. Лебедь, Н.В. Тарельник, О.Н. Лашкарев, Л.Я. Ропьяк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 181-184. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

Приведен аналіз проблем і існуючих методів підвищення надійності нерухомих з'єдинень. Для підвищення якості крупногабаритних складних виробів запропоновано технологію нанесення в області торців охоплюваних деталей на контактуючі поверхні сопрягаємих деталей, методом електроерозійного легірування (ЕЭЛ) комбінованого покриття: м'якого, наприклад, з бронзи, і твердого – сплаву групи ВК (или ТК). Прогнозується підвищення работоспособності крупногабаритних складних виробів (зубчатих колес, прокатних валків, універсальних шпинделів) до 24% при промисловій реалізації технології нанесення комбінованих покриттів на посадочну поверхню охоплюваної деталі.

Ключевые слова: метод, підвищення надійності, нерухомих з'єдинень, крупногабаритні складні вироби, технологія нанесення комбінованих покриттів, посадочна поверхня, охоплювана деталь.

УДК 621.9.015

Involute spiral face couplings and gears: design approach and manufacturing technique / А.І. Капелевич, С.Д. Копосец // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 4 (1113). – С. 185-189. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

В даній роботі представлено спіралевидні шестерні з евольвентним зубом лінії і однаковим профілем зуба в нормальній площині на будь-якому радіусі. Існують дві основні області застосування таких форм шестерень. Один з них представляє собою альтернативне рішення з певними перевагами в продуктивності і технології виготовлення з прямим зубом. Друге застосування, коли форма шестерні з евольвентної косозубої шестерні або червяком на перетинаються осях. Потенціальні переваги спіральних муфт і шестерень забезпечують високу потужність передачі крутного моменту порядку с

высокопроизводительной обработкой. В статье описывается геометрический анализ проектирования шестерни и методика проектирования спиральных форм эвольвентных зубчатых колес с симметричным и несимметричным профилями зубьев. Предложен технологический способ зубофрезерования шестерен, рассмотрены особенности конструкции и расчет инструмента.

Ключевые слова: спиралевидные шестерни, эвольвентный зуб, производительность, технологический способ, червяк, пересекающиеся оси, мощность, крутящий момент, методика проектирования, зубофрезерование, конструкция, расчет инструмента.

УДК 66.063

Анализ энергетических характеристик роторных аппаратов для гидродинамической активации гидкостей / А.В. Фесенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2015. – No 4 (1113). – С. 190-193. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Integration of technological preparation of an industrial enterprise PLM – solution / Yu.V. Timofeev, V.A. Fadeev, A.N. Shelkova, W.D. Hizan, A.A. Klochko // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU “KhPI”, 2015. – No 4 (1113). – P. 4-10 – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X.

The main provisions of the concept of integration of technological preparation of an industrial enterprise PLM solution include a full and detailed description, securely stored and managed using all of the information about the product throughout the product life cycle to support the integrity and consistency of product information and support and management of all business processes related to the dissemination of information across the enterprise. When implementing PLM in the scale of the engineering enterprise at the forefront are the basic requirements of functionality; performance; flexibility; scalability, and security. Part of PLM solutions for the engineering enterprise funds are included in project management, tools, scheduling and requirements management using Workflow tools, really helps to automate business processes across the enterprise. To implement organizational interoperability engineering and design engineering units the company developed ERP system integration PDM systems with CAD and PDM systems based on MES "Zenith" and provides for the establishment of the principles guaranteed technology machining characteristic in the manufacture of high-precision parts, can effectively approach to development perspective development plan, preparation of annual business plans of modernization of production and packaging of modern metal-cutting equipment, tools and measuring equipment.

Keywords: integration, technology training, engineering enterprises, PLM solution, information, business processes, functionality, flexibility, scalability, PDM systems, CAD.

Tehnologicheskoe carefully operational parameters of cylindrical gears with the approximative solution of contact-hydrodynamic lubrication problems / V.D. Kovalev, Y.V. Timofeev, A.N. Shelkova, A.A. Klochko, D.A. Kravchenko // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU “KhPI”, 2015. – No 4 (1113). – P. 11-19.– Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

The article describes the main fracture types of gears and technological support of operational parameters of the gears by approximative solution of the contact-hydrodynamic theory of lubrication of gears. Approximative solution is based on a physically reasonable assumption of proportionality between the deflections of the active involute surfaces of the teeth and the corresponding values of the pressure - plots of pressure (hypothesis Winkler-Zimmerman) without solving singular integral equations. The increased resistance to chipping of teeth is achieved approximative solution contact-hydrodynamic problem, in which the deflection surfaces of the teeth are determined by elasticity by means of a system of nonlinear algebraic and transcendental equations by successive approximations. The wear of the teeth is to abrasion the active surfaces of the teeth, substantially depending on the magnitude of the specific pressure, the relative sliding speed, the active surfaces of the teeth, the possibility of falling into the transfer of abrasive particles, the thickness of the oil layer and plots the distribution of specific pressures.

В статье предложена методика анализа энергетических характеристик роторных гидродинамических активаторов, которая позволяет на стадии предварительного выбора устройств по данным рекламных проспектов и статей определить их ориентировочную эффективность, проанализированы однотипные конструкции гидродинамических устройств по энергоемкости гидродинамического воздействия на рабочую среду. В качестве примера выполнена сравнительная оценка распределения затрат энергии в насосах, предназначенных для перекачивания жидкой среды, и в роторно-пульсационных аппаратах (РПА), используемых для гидродинамической активации. При определении эффективности РПА рассматривается количество энергии, затрачиваемо непосредственно на гидродинамическое и кавитационное воздействие на продукт.

Ключевые слова: центробежный насос, мощность, роторный аппарат, активация, гидродинамическое воздействие, удельная энергия.

ABSTRACTS

Wear causes distortion of involute tooth profile and can lead to a significant weakening of the legs of the tooth. The distortion of the profile causes the increase of dynamic loads and stresses at the base of the tooth, and a reduction of the bending strength of the teeth. Installed the dependence of viscosity on pressure based dimensionless coefficients when contacting teeth in the field of rolling friction-slip plots and increase hydrodynamic pressure.

Keywords: gears, technological support, operational parameters, the approximation solution, contact-hydrodynamic theory of lubrication of gears, the oil viscosity, pressure, dimensionless coefficients.

Investigation of displacement of gravity center of abrasive disks caused by accuracy of its shape / Yu. Sizi, D. Stalinskiy, P. Romanchenko // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU “KhPI”, 2015. – No 4 (1113). – P. 20-22. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-004X.

One of the important characteristic of abrasive disks for manual abrasive machining is imbalance which defines vibrating characteristic of manual abrasive machine operation and as results conditions of vibration safety for operator works. For contemporary abrasive process, when nonuniformity of tool structure is minimal, the main reason of imbalance is accuracy of geometrical shape of abrasive disk. In article we obtained formulas for calculation of displacement of gravity center of disk caused by accuracies of its shape like eccentricity of rotation axis to external surface of disk and non-parallelism of its ends. Based on obtained formulas we analyzed requirements for accuracy of disk manufacture for manual abrasive machines. Disagreement of requirements of GOST 23182-78 between geometrical accuracy of abrasive disk rated by it and permissible imbalance was defined.

Keywords: abrasive disks, accuracy of disk shape, imbalance, manual abrasive machine.

The equipment for high-frequency vibrating micro machining of parts with formation of special microprofile of surface / V.B. Strutynsky, I.V. Perfilov // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU “KhPI”, 2015. – No 4 (1113). – P. 23-27 – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.

The results of studies during the design of the equipment for high frequency vibration micro machining the parts are performed. The developed equipment, its main components and control system were described. The equipment includes the milling machine with high torque spindle and two coordinate table equipped with piezoactuators. The end mills with diameter 0,2 - 1,0 mm with the rotation speed up to 60,000 rev/min are used as tools. Two coordinate table on which the piece is set moves in two mutually perpendicular directions with the frequency up to 25 kHz and higher with amplitudes in the movement to 0.03 mm. The table has an elastic suspension as many sectional parallelogram mechanism. It is shown that the quality of dynamic performance of the equipment is improved as the result of the research. To improve the accuracy of the equipment the special technique is offered, which is to determine the parameters of Lissajous figures generated by the drives which are

moving the table. For the base Lissajous figures in the form of an ellipse the measurements of trajectories of table movement were held. The trajectories deviations from the ellipse are established. The statistical processing of parameters of trajectories of table movement is done and the deterministic and random errors of equipment are set. This is the basis of correction in control system to ensure the accuracy of the equipment required parameters. The correction includes the implementation of special regulators in the feedback system. As a result of correction the drives oscillations are reduced the drives speed is significantly increased. The results of the pilot testing of the developed equipment are shown. The processing of control samples with forming a special micro profile of surface was done. The serviceability of equipment and the possibility of forming a special zigzag and fan-shaped micro performances and micro grooves on the treated surface are shown.

Keywords: equipment, vibrations, micro cutting, piezoactuators, micro profile.

Design and technological solutions that improve the productivity and quality of gears of large girth gear drives / E. Mironenko, V. Shapovalov, A. Klochko, S. Palashek, E. Ostapovich // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 28-32. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X.

Developed constructora-technological ways to improve the productivity and quality of gears of large girth gear drives based on the analysis of the geometry of the gear and the tooth profile with regard to the establishment of the dependence of the magnitude of deviation of the involute curve profile of the tooth. The deviation from the tangent to the involute curve profile of the tooth is held at a point on the pitch circle at module over 25 mm and the number of teeth $Z_k \geq 130$ are within the manufacturing tolerances for wheels with involute teeth on 9-th degree of accuracy. In the cases considered involute tooth profile can be replaced by straightforward that can significantly improve the efficiency of the production machining. Analytically proved that with a straight profile of the teeth on the wheel when $m=25\text{mm}$ and above and the number of teeth of $Z_k = 130-200$ must be entered in the intermeshing gears having conjugate teeth profiles. The use of rectilinear profile of the teeth on the wheel allow you to use a new technology milling method trepanation, in which rough milling of teeth is a slotted disc cutters and finishing on the profile of the teeth of the high speed end milling cutters. Upgrading gear cutting machines with the use of new technology milling improves the performance of the gears 200%.

Keywords: arge ring gears, performance, gear geometry, the profile of teeth, constructora-technological methods, method of trepanation.

Comparative analysis of graphical models side triangular thread profiles: standard and set obtained using a cutter with a non-zero value of forward angle / O.R.Onysko, PM Protsak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 33-36. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-004X.

The article suggests software implementation which researches a screw cutting tool hock angle influence on a given profile thread reproduction precision. The application algorithm uses the developed earlier analytical dependences of the hyperbolically corrected thread tool cutting edge which is rectified through the linear interpolation. The application is built using the developed by us algorithm which shows dependence of the axial profile convoluted screw from the size of its diameter, angle of its inclination and hock angle size. The obtained results show the significantly deviated thread profile got by the tool with an uncorrected profile cutting edge and close to a given standard thread profile that made by a turning tool including a cutting edge which is shaped by our proposed algorithm.

Keywords: thread tool, hock angle, convoluted screw, helicoid, hyperbolic profile, transcendent function, algebraic function.

Experience in the creation of modern manufacturing techniques of non-rigid components using advanced CAD / CAM / CAE systems / S.Dobrotvorsky, M.Hasanov, E. Basova, R. Golovatyj, S. Gakov, S. Gnuchev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 37-40. – Bibliogr.:5. – ISSN 2079-004X.

To reduce the consumption of materials in modern engineering machinery necessary to increase the total range of parts with thin-walled, non-rigid elements. Achieving structural strength of machine parts offered by leveraging advanced CAD / CAM / CAE systems, which allow to perform not only the excellent organization of

technological preparation of production at different stages of the creation of advanced technology, but also in the mode of «on-line» The influence of different technological factors on qualitative changes in plastically deformed material layer and differentiate correlation process of chip and the stress-strain state of the material, depending on the angle of the groove struzhkootvodnoy tool. The results obtained 3D simulation modeling revealed that with an increase in speed increases the prospect of using a cutting tool with a positive rake angle of the cutting edge to provide the required parameters.

Keywords: production planning, process, machining center, CAD / CAM / CAE systems, competitiveness, optimization.

Modeling of production-technical characteristics modular instruments based on multi-objective optimization / A. M. Kravtsov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 41-50. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X

Reviewed the operational characteristics of modular tools for multi-objective regulation of the parameters of the surface layer of parts with complex parameters and system optimization for mechanical processing methods, developed recommendations on the application of complex state parameters of the contacting surfaces of the parts modular cutters for improving the quality of manufacture of the tool. The analysis of the interaction of contacting surfaces. Revealed three main approaches to the evaluation of geometric characteristics: traditional - parametric, non-parametric, using the spectral theory of irregularities. Analyzes the main theoretical background and accept the models used when considering issues of contact interaction. It is shown that parameters of the surface layer in the process of operation change their values, which leads to a change in the characteristics of the zone of contact interaction. Applying Functional cost analysis of technological support operational properties of the contacting surfaces to reduce the chance of error and to minimize the cost of its manufacture

Keywords: performance characteristics, modular tool geometry, complex parameters, system optimization, contact surfaces.

New ways Formation antyfraktsyonnoho babbytovoho layer bearings skolzhenyia / V.B. Tarelnyk, A.V. Dziuba // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 51-56. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X

In this paper the necessity of creation of the machine parts surface layers with special properties for the nodes of sliding friction. Study of the formation of babbitt coatings to improve the quality, timeliness and relevance, and the creation of the surface layers with special properties for the nodes of sliding friction, in this case, the slide bearings (SB), is an urgent task. In recent years, the application of anti-friction coatings are increasingly used method of electro erosive alloying (EEA), which is a transfer of material onto the job surface by sparks electric discharge.

The aim is to improve the quality of SB liner, and their bearing load capacity, on-reliability and durability of the works, as well as reducing the complexity of manufacturing due to the fact that a antifriction babbitt layer is formed by EEA. The resulting combined electroerosive covering has a minimum thickness of 250 mkm and a maximum thickness of 1.0 mm. Further increase in the thickness of the layer is possible, but not practical due to the increase of processing time and reduce the mechanical strength of the babbitt. Liners of SB, processed by proposed method have high reliability and durability when working as SB at all stages of the anti-friction coating is provide a strong metal bond between the substrate and the intermediate layer of copper, tin bronze or tin, and followed by a layer of tin babbitt.

Keywords: electroerosive alloying, surface layer structure, babbitt, bearing, copper, tin, bronze, microhardness.

Geometric definition of hyperbolic profile back surface of round shaped radial cutter / V.G. Panczuk, V.V. Shufflin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 57-59. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X

The article suggests the geometric calculation of a multipointed hyperbolic profile on a radial circular forming tool clearance face. The algorithm for calculating functionally depends on the turning tool installation height, its maximum diameter and the tapered detail profile. This tool design will allow to reproduce the conical surface of workpieces most precisely. At the same time, the proposed turning tool has a flat rake face, which is the most technological solution for cutter grinding during its operation. The calculation of the clearance face profile does not require the pre-known hock angle value, which greatly

expands the tool application space in terms of different cutting conditions and materials or blanks selection.

Keywords: turning tool, radial circular forming tool, form turning, tapered surface machining, hyperbolic profile, back angle.

Development of mathematical models justification for a decision algorithm when diagnosing complex of machines cnc in an alternative situation / N.R. Veselovskaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 60-67. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-004X

It is noted that depending on the type of decision to a significant extent on the efficiency of the entire complex "object-diagnostic system." It is concluded that the synthesis of decision-making algorithms based on SD mathematical theory of hypothesis testing and information theory, and the criteria are formulated as specifically set optimization problems. The developed mathematical models to support decision-making algorithm for the diagnosis of complex CNC machine in alternative situations and the resulting mathematical description of information processes in decision making. Stressed that the problem of decision-making is the essence of any purposeful human activity. A general block diagram of a decision-making, as well as the algorithm of modeling the process of diagnosis, which fully reflects the performance of the whole system and includes a sufficient number of parameters, provides statistical data on the operation of LED (model), respond to changes in the system meets all requirements ease of use in preparing software. It is proved that the algorithm is a statistical decision problem depends on three elements: class density function $W(x)$, which presumably belongs to the observation X ; the structure of the space of possible solutions Y ; form of the cost function L_{01} and L_{10} wins L_{11} , L_{00} , and the structure of the space of possible solutions can be arbitrarily determined by the following situations: *dvuhalternativnoy*, *trehalternativnoy* and (or) *multialternativnoy* that requires one of the many solutions. By analyzing the mathematical models were synthesized and investigated criteria algorithm *miziruyut* obtaining optimum parameters when used in industrial production.

Keywords: mathematical model diagnostics, machine CNC, mathematical description, information processes, the simulation algorithm, software, industrial production.

Strategic and operational automation control systems preparation of production / E. V. Naboka, M. E. Kolesnik // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 68-71. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X

The task of developing the automation project activities production services engineering company focused on the optimization and automation and has important strategic impact on the prospects of the enterprise itself. The article considers the problem of developing the project of automation of activities of planning and economic Department of the engineering enterprise. The problem is solved under the conditions of reducing the time for the execution of the workflow of the Department. The proposed change in the operation of the unit. The possible ways of solving the task through the use of recommended technologies of enterprise management system using "Galaxy". Commissioning of the system "Galaxy" provides automation feasibility planning and statistics, perspective and current plans of a production company established list of technical and economic indicators, the development of annual, quarterly and monthly plans of the halls of the engineering enterprise. according to the established list of technical and economic indicators. Automation of the functions of the Bureau related to the development and analysis of the implementation of a comprehensive prospective and current (monthly, quarterly, annual) development plans of the company, provides module "TEP" circuit of production management system "Galaxy".

Keywords: the project, automation, production services, engineering company, optimization, technology management, feasibility planning.

Mathematical modeling of hole-making machining with combined axial tools / M.S. Ivanova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 72-75. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

The features of hole-making operations with combined axial tools are given. An algorithm for selecting the structure of the combined axial tool for the implementation of the manufacturing process of the holes set is proposed. The algorithm bases on the analysis of structural and technological characteristics and the increasing concentration of machining

passes. A mathematical model describing the structure of the combined axial tool and principle of operation of its stages is suggested.

Keywords: hole-making machining, combined axial tool, manufacturing process, the concentration of operations

Analysis of mechanisms for the implementation of production and marketing activities of industrial enterprises / Y.A. Klochko, E.C. Kamchtna-Stepanova, N.G. Siketina // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 76-78. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-004X

The article discusses the principles and the need to use system-synergetic approach in the analysis of production and marketing activities of industrial enterprises. The characteristic of a system approach to nonlinear sphere and synergistic campaign are given. Developed theoretical and methodological basis of the analysis of mechanisms of realization of production and sales activities of domestic industrial enterprises. The peculiarities of the domestic market of raw materials. Based on the results of the analysis of the actual system in Ukraine marketing materials selected features of the mechanism of formation of the sales structure and channels of distribution in the market industry.

Keywords: nonlinear environment, marketing, sales channels, products, materials, system, synergy.

Design and engineering basis improved production technology of rolling cutter with inserted hard alloy teeth to the body of cutter of three rolling cutter drill / R.S. Jakym, A.M. Slipchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P.79-82. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X

This article discusses typical constrictions of fixing hard alloy teeth to the body of three rolling cutter drill. Construction of connections is research for rock ruin item of rolling cutter what is in the three rolling cutter. This improves quality of fixing teeth by less stresses in the connection. Constructive decision that is proposed and it has improved technology of production rolling cutter with hard alloy equipment of three rolling cutter drill. This allows improving the operational production of domestic drilling bits. It was analyzed stress-distorted state of teeth that is pressed and rolling cutter in typical constriction and modernized using CAD/CAE systems. The main purpose of research is get data about the distribution of stresses in the most loading rate of rolling cutter. This model was designed in Solid Works. During simulation was found the value of tension and character. Counted minimal distance between holes in the three rolling cutter and which placed in pairs. For solve this problem was used method of finite elements. Testing cutters improved design in terms of stand confirmed the effectiveness of the obtained parameters embedded rock cutting equipment cutters.

Keywords: three rolling cutter drill, face of slaughtering, simulation, method of finite elements, rock ruin equipment, CAD/CAE systems, hard alloy teeth.

Design and Technology engineering of flexible manufacturing systems with simulation usage / A. N. Shelkovoy, M.S. Stepanov, M. S. Semchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 83-88. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X

The proposed research productivity and reliability method of the parts "gear housing" in a flexible manufacturing system based on large-scale production machine 6N12PB and flexible manufacturing cell MA2765M3F4 using special engineering programs. The conducted study has reduced the calculations time, more precisely represent the process of machining, to obtain more precise research results, to develop technical documentation, pick up the necessary equipment and tools, select the main and auxiliary equipment, perform a simulation of the "gear housing" part production system and carry out the valuation machining process "gear housing" on the PMG MA2765M3F4. All this allowed to improve the performance of machining parts site "gear housing" on the basis of application of group processing methods in a batch production.

Keywords: flexible manufacturing, computer technology, computer numerical control, robotic processing facility, flexible manufacturing cell, manufacturing module, production system, process, control program.

Cutting conditions optimization during processing with tool blocks. / I. Iakovenko, A. Permyakov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 89-92. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X

The calculation method of individual instruments cutting conditions in multicutter processing for different variants of tool changes during operation, and subject to the probabilistic nature of tool life under the specified mean time between failures is offered. The given method allows to ensure the established detail production rhythm at minimum costs, connected with the cutting tool operation, as well as to minimize other components of the technical net cost of the processing. The method is based on the study of dependence "cutting speed - resistance to end-cutting tool surface treatment", and of factors, that determine the tool blocks layout arrangements, such as cutting length of individual surfaces, working stroke length of tool block, and sizing features of processing surfaces.

Keywords: tool adjustment, tool life, cutting speed, rotating speed, mean time between failures

Diagnostics of infallibility technological system for measurement parameter of quality / N. Y. Lamnauer // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 93-95. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X

The technical problem solved, that consists of technological systems diagnostics. The new formula for calculating the dimensionless quality parameter of technological system proposed. This formula includes the nominal values of the measured characteristics of quality engineering products. Estimates of models parameters of dimensionless quality characteristics of the technological system found. Results of the research used to create a methodology for assessing reliability of technological systems by parameters of quality. This methodology includes an assessment of the lower and upper limit of the dimensionless quality parameter. Estimates of the lower and upper limit of the dimensionless quality parameters calculated for each specific point in time and each quality parameter of the technological system. These calculations made for the proposed four models of dimensionless quality parameter of the technological system. Interpolation polynomial in the points of the upper and lower limits separately for each model proposed to construct. Minimum uptime for each parameter of quality technological system is determined. Infallibility technological system defined as the minimum of all the quality parameters suggested.

Keywords: quality, infallibility, reliability, diagnostics, technological system.

Defects formation and mechanism of the appearance delamination when drilling multilayers composite materials / G.L. Khavin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 96-100. – Bibliogr.: 31. – ISSN 2079-004X

The physical, technological and mathematical aspects of defects when drilling of multilayer composite materials are considered. The analysis of experimental and theoretical studies of delamination and spalling in the workpiece during drilling is represented. The mechanism of occurrence of such defects and the current state of the problem of predicting their quantitative characteristics is described. The influence of different technological parameters on the reduction in the amount of defects, including delamination factor is analyzed. Destruction around the hole size increases with increasing axial force and tends to smoothing with a significant increase of the axial force. The value of defects increases with increasing hole diameter and can be assumed that a mismatch diameter will rise more quickly to its increase. The models of prediction of defects and ways to minimize them in the process of drilling are presented.

Keywords: drilling defects, layered composites, delamination during drilling.

Research of influence of efforts of fixing of cutting plate on cylindrical opening on dynamic characteristic of collapsible cup-tip tool / G. Klimenko, V. Guzenko, I. Polupan // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 101-103. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X

Results of effort of influence of the magnitude of a force on radial surface of bore in tip on strength and dynamic characteristics of the improvement construction of collapsible cup-tip tool for treatment of wheel pairs brings in this article. Established that a significant influence of the magnitude of radial force of fastening on cylindrical surface of bore in tip exercise to hardness characteristics of construction of collapsible cup-tip tool.

Keywords: collapsible bowl-shaped chisel, cylindrical surface, inflexibility, durability, dynamic descriptions, wheel pair, cone of mounting angle.

Saving disassembly at heavy-duty gas turbine compressor reengineering / E. Konoplyanchenko, V. Kolodnenko, W. Atalawei // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 104-109. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-004X

In a paper the considered questions of a machine industry hard loaded responsible products resource saving at a stage of their repair, on an example of the heavy-duty gas-turbine compressors. The main causes of failure and include the results of turbo systems. The modern concept of the rational search path to the failed element of sophisticated equipment. The technique of safe disassembly of their element base in view of maintenance specificity conditions of and residual influence on an environment is stated. Practical application of the offered approach will allow to increase quality and safety of special assignment, and introduction of the formalized technique in conditions of real manufacture will allow increase in level of efficiency and the use of available means of complex technological equipment.

Keywords: repair, selective disassembly, heavy-duty compressors, gas-turbine, resource saving.

Numerical simulation of machine equipment for machining parts such as levers / V.A. Ivanov, V.E. Karpus, I.N. Degtyarev, I.V. Pavlenko, VR Bogdan // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P.110-115. – Bibliogr.: 26. – ISSN 2079-004X

This paper proposes the fixture design that provides sufficient tool availability and allows performing a multiaxis machining of parts of levers with one fixing. Research, performed by methods of numerical simulation, confirmed that the proposed design complies with all requirements of accuracy. Results of deflected mode research show that the values of displacements and stress during machining in the proposed fixture are smaller than standard one. Modal analysis confirmed that proposed fixture has higher dynamic stiffness than standard fixtures for machining of levers. Simulations were carried out for levers machining of steel, cast iron and aluminum alloy. Dependences for displacements and stresses on the cut depth were determined, which allows to optimizing machining process.

Keywords: fixture, manufacturing process, milling, deflected mode, stress, displacement, accuracy, frequency.

Tribological system ultrasonic welding of plastics. Test calculations / S.N. Isakov, S.I. Marusenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 116-118. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-004X

The process of formation of the welded joint is characterized by a complex interaction of multiple and heterogeneous factors. On the one hand, this is a complex of phenomena associated with intensive processes of friction, temperature rise in the welded materials, cracking hard and burning fat films, high ductility, micro- and macroroughnesses creasing up, the convergence of the contacting surfaces at a distance close to the interatomic, and so on. On the other hand, this is a complex of phenomena associated with the condition, the ability of the energy path to file this energy in the weld zone. An iterative algorithm for calculating the parameters of ultrasonic welding process (UWP) based on the tribological system, which is defined as a kind of logical-mathematical structure whose elements are sub-systems of materials, radiation, dynamics, internal friction, thermodynamics and proper ultrasonic tool, are developed. The criteria for convergence of the iterative process essentially nonlinear model of PSM are proposed. Among them there are the integral increment of thermal energy by tribosystem volume, the changing of spatial boundaries of tribosystem and other indicators. Test calculations for several types of workers welding tips are carried out.

Keywords: tribological system, the high loading, ultrasonic welding, non-linear mathematical model, an iterative algorithm, convergence criteria.

Resource prognostication of bevel gears with biconvex-concave teeth / A. Kuznetsova, A. Gnytko, T. Terechenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 119-123. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X

Resource prognostication method of bevel gears with biconvex-concave teeth is developed. Resource prognostication is carried out by selecting gear rational parameters based on the modeling of teeth wear. The method is based on the two mathematical models: the model of

teeth engagement and the numerical model simulation of teeth wear. Theoretical and practical tasks of resource prognostication of bevel gears with biconvex-concave teeth by the choice of rational engagement parameters, which based on wear modeling, are decided in the article. The fact that the change of profile shape of biconvex-concave teeth work surfaces has effect on the value of geometric, kinematic and loading parameters was taken into account during wear modeling, which improves the accuracy of wear calculations. The software was developed for wear and resource prognostication of bevel gears with biconvex-concave teeth taking into account initial profile curvature of the teeth working surface after each cycle of stress changes. Research of teeth wear was carried on the basis of the analysis of gears engagement of cutting part of the coal miner PKY10. Results of resource prognostication confirmed experimentally.

Keywords: biconvex-concave teeth, wear, bevel gear, resource, geometric, kinematic and loading parameters of the contact.

Systematic approach to the comparative evaluation of operability of tool materials by standard regulations of tool life tests / Yu. Gutsalenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 124-128. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-004X

The problem of comparing the operational capabilities of the tool materials and cutting inserts of them is considered. Taken into account the extended system of working capacity criteria include the speed of volumetric removable, tool life, cutting work path, area of processed surface, volumetric removal. The systematic analytical model is proposed, and the calculation is made for the superhard composites in conventional disposable cutting inserts based on cubic boron nitride. The top level of the hierarchical model is an analytical description of the processed material volumetric removal for the tool life. The highest rating is determined by the maximum material volumetric removal. The calculations on the model established the superiority of Tomal-10 composite over others in grouping accordance with the interstate standard GOST 28762-90 that is applied in Ukraine. Calculation has been made under the conditions and norms of the standard tests for tool life. Development is based on the database of the conditions and tool life norms for tests of the superhard materials on regulations accordance with GOST 28762-90. The example of the development of the analytical model with respect to the assessment of working capacity rating for reground inserts under the ambiguity permissible wear is shown. Development carried out in the framework of the tasks of the state research project 0113U000425.

Keywords: cubic boron nitride, superhard composites, cutting inserts, the test for tool life, working capacity, cutting work path, volumetric removal, comparative estimation.

Results of fatigue resistance study of technical variants of rear axle trunnions of special vehicles / V. K. Lobanov, G. I. Pashkova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 129-131. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X.

This work presents the researching of the fatigue resistance of rear axles trunnions for the vehicle "Dozor" from different variants of manufacturing. Totally, 20 different constructions of the trunnion, namely welded (11 variants) and mixed (9 variants) ones are examined. Universal testing machine, enabling to generate maximum static load of 500 kN and maximum cyclic load of 250 kN with an accuracy of $\pm 1\%$ is used for testing. Working load is simulated using loading conditions. Examples of the tensometry results and final results of all tests are given. It was founded that the connection point of trunnion with nozzle is less loaded and less stressful than splines and zone, where trunnion is connected to the body. Approved test pattern for trunnion under the simultaneous action of the bending and torsional moments is recommended for further use in the development of technologies and standards in percentage check tests of trunnions in serial production for the purpose of intermittent monitoring of the level and stability of the quality of their manufacture.

Keywords: vehicle, rear axle, trunnion, fatigue resistance.

The analysis of the efficiency of hardware control of the longitudinal feed of the grinding wheel / A. Ienikiev, F. Yeysiukova, L. Shyshenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 132-137. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X

Simultaneous automation means of diamond grinding processes reduce processing time of any detail and provide obtaining of a prede-

termined roughness of its machined surface. It is built for the first time the computer system model of the hardware control of the longitudinal feed of the grinding wheel using the mathematical apparatus of the Laplace transform. It is synthesized the signal processing device of the longitudinal feed of the diamond tool based on the minimization of quadratic quality criterion using the reference model of hardware. The dead zone of the primary converter around the nominal characteristic of conversion, the hardware and software delay and the effect of interference is taken into account in the synthesis. It is made the scheme of simulation and determined the efficiency of the developed hardware.

Key words: mathematical model, structural-logical organization, informational approach.

The effect of cutting temperature on hole quality when drilling cfrp/metal stack / V. Kolesnyk, J. Zajac, S. Radchenko, M. Adamian // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 138-141. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X

The carbon fiber reinforced plastic (CFRP) are widely used in stacks with metals. That allows obtaining components with high strength and reduces weight. Holes' drilling is a basic operation of CFRP/ metal and metal /CFRP stacks machining. The most common problems of CFRP/metal stacks drilling are CFRP delamination, fiber pull – out, thermal degradation and low quality of hole surface. In this study the effect of cutting temperature on the hole quality was provided. It was experimentally established that drilling of CFRP/metal stack was accompanied with a significant change of cutting temperature in the cutting zone during the transition of drill from CFRP to metal plate. Simultaneous machining of CFRP and Steel provokes a rapid rise of cutting temperature in the cutting zone in comparison with the drilling CFRP only. Thus, during CFRP drilling cutting temperature rise at $8,9^{\circ}\text{C/s}$, while during simultaneous CFRP/ steel cutting - $31,7^{\circ}\text{C/s}$. When drilling CFRP/ steel stack the hole accuracy reduce to $250\ \mu\text{m}$ while in steel only on $150\ \mu\text{m}$ due to abrasive bulk effects of rough metallic chip. Surface roughness in CFRP changed from 3 to $6\ \mu\text{m}$, and in steel from 3 to $4.2\ \mu\text{m}$. It proves that CFRP is more sensible to drill bit point wear. Delamination of upper layers of 49^{th} hole growth at 30% in cooperation to 1^{st} one.

Keywords: drilling, hole surface integrity, accuracy, CFRP/metal stack, drill wear, cutting temperature

Simulated behavior of process systems using Petri nets / O. Prihotko, S. Slipchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 142-144. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X

Simulation modeling was carried out for the automatic line comprising three units of production equipment and serviced by a conveyor system and manipulators. Simulation modeling involves comparing technological structures, as goals were increased utilization of equipment, take into account the coordination of work units and automatic line appearance and elimination of equipment failures. Optimality criterion is to maximize productivity, increase hardware utilization while minimizing the processing time involved and productive resources. Simulating the interaction of pieces of equipment in the form of Petri nets allows you to choose the structure of complex technological systems to coordinate the work of pieces of equipment to identify "bottlenecks" in units of automatic line, to determine the capacity of intermediate storage, to assess the level of fault tolerance of the system, to determine the effect of time changeover system performance.

Keywords: Petri net simulation, detail, label, algorithm-driven transitions inhibitory arc, agility Petri nets.

The field of application method of internal threads machining with to-size tool / A. Neshta, D. Krivoruchko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 145-149. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

The methodology of maximal deviation definition in axial direction was developed. The dependence of maximum deviation and key parameters of thread profile was specified. The recommended field for manufacturing method of inner thread (metric, inch, trapezoidal, buttress, round) was defined to be machined with to-size tool on CNC machines. It was defined that thread pitch exert maximal influence on the value of maximal deviation. Rise of thread pitch provoke growth of maximal deviation. The recommended field for machining with to-size tool method for metric thread is $p = 2\div 3,5\ \text{mm}$, trapezoidal $p = 2\ \text{mm}$ and inch and round threads all amount of standard thread pitch values.

Buttress thread according to GOST 10177-82 couldn't be machined with proposed method so far the theoretical maximal deviation of machining is higher than thread tolerance.

Keywords: internal thread, to-size tool, maximum deviation, thread profile, machining.

Analytical determination of surface roughness with abrasive polishing adjusted for depreciation grains / V. Shkurupiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 150-153. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

In this paper, based on the probabilistic representation of the interaction between the abrasive grains to the material during abrasive polishing received a new theoretical solution of determining the roughness surface to be treated with the wear of the abrasive grains. The formation during processing on the abrasive grains of wear pads leads to a substantial decrease surface roughness. It is shown that the use of spherical and ovalized abrasive grains should be considered an essential factor smoothing asperities on the treated surface of the sample during abrasive polishing. On this basis, identifies the main conditions for effective implementation of the abrasive polishing process consisting in increasing the length of the pad wear on the grain while ensuring the reduction of tension strength of the cutting process. It is shown that the obtained solution is valid for abrasive polishing with a fixed rate \dot{p} -flow radially and fixed radial force. Performed numerical calculations of surface roughness parameters confirmed the accuracy of the solution, which is consistent with the known experimental data for the process of round outer longitudinal grinding of cylindrical parts of carbide VK8.

Keywords: abrasive polishing wear grains platform wear, surface roughness.

Conditions reduce power and temperature conventional cutting and grinding intermittent / F. Novikov, I. Ryabekov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 154-157. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

The paper presents a new analytical solutions on the conditions of power reduction and cutting temperature in normal and intermittent grinding through the application of new approaches to the mathematical modeling of the grinding process with the process of cutting and friction circle bundles to the material. Theoretically found that by grinding the discontinuous due to the dynamic nature interaction with the working range of the projection pictures processed virtually no elastic displacements in the process system. This promotes deeper penetration of abrasive grains into the material and improve the accuracy and processing capacity, as well as stability during grinding wheel parts made of materials with high physical-mechanical properties. Theoretically found that cutting at this temperature varies depending on the extreme increase in length with working protrusions discontinuous circle, taking the minimum value under the condition of equality of the working length of the cavity and the projection range. Due to this, the cutting temperature can be reduced by 2-3 times compared with the conventional grinding, which is an important source of increasing the quality and processing performance of finishing operations.

Keywords: intermittent grinding, discontinuous circle, cutting force, cutting temperature.

Hot rolling bearing rings' simulation / L. Avtonomova, E. Grozenok, E. Simson // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 158-161. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-004X.

The hot rolling process, used in manufacturing the bearing rings, is numerically simulated on computer under cooling and without it. The bounded dynamic contact thermo-elastic-plastic boundary value problem is considered for bulky deformations under various strain rates. The physical and mechanical materials' properties, depending on the range of strain rates and temperatures, are taken into account for these high-speed deformation processes. Solution of unsteady heat conduction problem was carried out under two cooling regimes: the forced air or liquid cooling. The specific finite element module "Ring-rolling" of the software package Deform 3D was exploited to model the physical and mechanical processes during hot rolling simulation. Analysis of the temperature fields and the equivalent stress demonstrated that the presence of forced liquid cooling leads to a redistribution of temperatures in the bearing ring and the higher values of equivalent stresses. These results present the more robust details of physical processes during the hot rolling bearing ring.

Keywords: bearing ring, hot ring rolling, Deform 3D, contact problem, bulky deformations, finite element method.

Assessment of structural strength for specialized machining tool / L. Avtonomova, E. Simson, D. Yagudin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 162-165. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

The analysis of stress-strain state for the machining tool provided under the dynamic loading. The dynamic elastic-plastic boundary value problem for both variants of the shock loading positioning on the structure is considered: frontal cob working and sloping hinged impacts of a tool element into the obstacle. To make a geometrical 3D model of the machining tool and to numerically solve the contact problem with finite element modelling, the software packages Pro/Engineer and ANSYS were used. The stress-strain state of the machining tool composite structure after calculations demonstrates various ranges and zones, where plastic deformations occurred. Their positioning and levels depend on the collision angles and location. Analysis of the equivalent stresses distribution in the manufacturing tool under different shock loadings showed that a mounted operating element and its supporting structure experience not tolerable plastic deformations. To improve the strength characteristics of the machining tool, modifications in geometry of its work item attachments were suggested.

Keywords: structural strength, machining tool, shock, elastic-plastic deformation, supporting structure, finite elements modelling.

Investigation of the degree of deformation of dual-layer titans aluminum packages under shock loading tool steel using CAE systems / S.S. Dobrotvorskiy, S.S. Gnuchykh, L.G. Dobrovol'skaja // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4 (1113). – P. 166-169. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X.

To enhance the strength and impact resistance, while reducing the material consumption of machines in modern engineering necessary to increase the number of thin parts having a multilayer (sandwich) structure. Multilayer structures are generally produce products with characteristics superior to those of the individual materials included therein. However, research on these issues is extremely limited. In this paper we propose to solve this problem by modeling the processes of high-speed deformation sandwich packets using the finite element method. This method is well implemented in the system Explicit Dynamics in the software package ANSYS. The Explicit Dynamics system is designed to enable you to simulate nonlinear structural mechanics applications involving one or more of the following: impact from low [(0)1m/s] to very high velocity [(0)5000m/s], stress wave propagation, high frequency dynamic response, large deformations and geometric nonlinearities, complex contact conditions. Explicit Dynamics is most suited to events which take place over short periods of time, a few milliseconds or less. Events which last more than 1 second can be modelled; however, long run times can be expected. In an Explicit Dynamics solution, we start with a discretized domain (mesh) with assigned material properties, loads, constraints and initial conditions. This initial state, when integrated in time, will produce motion at the node points in the mesh. The motion of the node points produces deformation in the elements of the mesh. The deformation results in a change in volume (hence density) of the material in each element. The rate of deformation is used to derive material strain rates using various element formulations. Constitutive laws take the material strain rates and derive resultant material stresses. The material stresses are transformed back into nodal forces using various element formulations. External nodal forces are computed from boundary conditions, loads and contact (body interaction). The nodal forces are divided by nodal mass to produce nodal accelerations. The accelerations are integrated Explicitly in time to produce new nodal velocities. The nodal velocities are integrated Explicitly in time to produce new nodal positions. The solution process (Cycle) is repeated until a user defined time is reached.

Keywords: high speed machining, titanium, aluminum, CAE system.

Investigation of the value and volume of nanocluster its depth under the action of ions of different energies, varieties and charges on magnesium alloys / G. Kostyuk, Ye. Mirgorodskaya, O. Melkozorova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4(1113). – P. 170-176. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-004X.

Researches volume values nanocluster and its depth, depending on the energy charge and the type of ions (B +, N +, C +, Al +, V +, Cr +, O +, Ni +, Zr +, Mo +, Hf +, W +, Ta +, Pt +), which allows to determine the composition of the ions, their energy and charges for a desired nanostructure layer, and with the ion current density required to obtain substantially all of the process parameters to obtain the desired layer thickness and physical-mechanical characteristics in the magnesium alloy. It has been shown that it is possible to obtain a volume of nanoclusters 1.97 to $4.95 \cdot 10^{-27}$ to 10^{-22} m³, with their depths range from 1.65 - 9.10 to 1.65 - 7.10 m. All this says it is possible to obtain nanostructured layers of different thickness with a maximum thickness of tenths of a micrometer, and changing the type of ions can vary the physical and mechanical characteristics.

Keywords: volume nanocluster ions, the depth, the ion current density, magnesium alloy nanostructures.

Research process formation of build-up and wear of the cutting tools by the rheological simulation cutting method / V. Stupnytskyi, Y. Dolyniak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4(1113). – P. 177-180... – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X.

In terms of implementation of science-engineering production, an important element of its technological preparation, is studying the process of cutting materials, provided that the technological system or its components only created. This problem can be solved by using simulation modeling of cutting processes. In this paper, the effect of cutting tool wear (with variable semidiameter of curvature of the cutting edge) on the cutting force and temperature in the area appearances chips at different cutting speeds and heights formation of build-up impact on temperature and cutting force as at various cutting speeds. Data obtained based on the finite element method with the software DEFORM 2D. Also in this scientific publication provides analyzes of simulation results rheological modeling formation of build-up and wear of the cutting blade. Use of this product gives us complete information not only on temperature and power indicator, as well as the processes of internal friction, deformation occurring in the cutting zone, static and dynamic parameters, stress parameters etc.

Keywords: formation of build-up, cutting tool wear, finite element method, temperature, cutting force.

Improving the quality of the connection of large composite products / V. Lebed, N. Tarelnik, O. Lashkarev, L. Ropiak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4(1113). – P. 181-184. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-004X.

The analysis of the problems and existing methods of improving the reliability of fixed joints. To improve the quality of large composite products proposed technology application in the field of end faces covered details on the contact surfaces of mating parts, the method of electrical discharge alloying (EEL) combined coating: soft, for example, of bronze, and solid - alloys group VC (or TC). Is projected to increase efficiency of large composite products (gears, rolls, universal spindles) to 24% in industrial implementation of the technology application of combined coatings on the seat surface covered in detail. Theoretical calculations found that the implementation of the technology combined coverage (alternating hard and soft annular areas of pavement), improv-

ing the coefficient of friction f to... $0,40$ $0,30$ increases the stiffness of the composite articles 10 to 15 %, and increases the force of the RAS-pressing; reduces the amount of residual deflection of 1.5 to 2.0 times the area of distribution of the fretting process on the mating surfaces with 70% to 25%; eliminates fatigue failure covering parts.

Keywords: a method to increase the reliability, fixed joints, large composite products, application technology combined coatings, the Seating surface covered in detail.

Involute spiral face couplings and gears: design approach and manufacturing technique / Alexander L. Kapelevich, Stephen D. Korosec // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4(1113). – P. 185-189.. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

This paper presents spiral face gears with an involute tooth line and an identical tooth profile in the normal section at any radius. There are two main applications for such face gears. One of them is an alternative solution with certain advantages in performance and fabrication technology to the straight tooth, Hirth, or Curvic flange couplings. Another application is when a face gear is engaged with an involute helical pinion or worm at intersecting or crossed axes.

Potential advantages of spiral face couplings and gears include high power transmission density and highly productive machining of face spiral gears.

The paper describes gear geometry analysis, and design technique of spiral face involute gears with symmetric and asymmetric tooth profiles. It also explains a hobbing method of these gears and tool design specifics, and then illustrates gear and tool design with numerical examples.

Keywords: helical gear, involute tooth, productivity, technological method, worm, crossed axes, power, torque, design procedure, gear milling, design, calculation tool.

The analysis of the energy characteristics of a rotary apparatus for hydrodynamic activation of liquids / A. Fesenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No 4(1113). – P. 190-193. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

The paper proposes a methodology for the analysis of the energy characteristics of the hydrodynamic rotary activators, which allows during the pre-selection device according to the brochures and articles to determine their approximate efficiency, analyzed the same type design hydrodynamic devices on the intensity of hydrodynamic impact on the working environment. As an example, a comparative assessment of the distribution of energy consumption in pumps designed for pumping liquid medium, and in rotary pulsation apparatus (RPA) used for hydrodynamic activation. When determining the effectiveness of the RPA considers the amount of energy expended directly on hydrodynamic and cavitation effects on the product. Comparative analysis of hydrodynamic pump and install the RPA-5 shows that the power density on the hydrodynamic processing taking into account the losses in the RPA-5 is much higher than the power density on the losses in the pump CP 1M 25/32 that is a distinctive feature of energy consumption hydrodynamic rotary activating devices.

Keywords: centrifugal pump, power, rotary machine, activation, hydrodynamic effects, the specific energy.

ЗМІСТ

К юбилею профессора Тимофеева Юрия Викторовича.....	3
<i>Тимофеев Ю.В., Фадеев В.А., Шелковой А.Н., Хицан В.Д., Клочко А.А.</i> Интеграционная технологическая подготовка промышленного предприятия р1m-решением.....	4
<i>Ковалев В.Д., Тимофеев Ю.В., Шелковой А.Н., Клочко А.А., Кравченко Д.А.</i> Технологическое обеспечение эксплуатационных параметров цилиндрических зубчатых передач при аппроксимативном решении контактно-гидродинамических задач смазки.....	11
<i>Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Романченко П.В.</i> Исследование смещения центра тяжести шлифовального круга обусловленное погрешностями его формы	20
<i>Струтинський В.Б., Перфілов І.В.</i> Обладнання для високочастотної вібраційної обробки деталей мікрорізнанням з формуванням спеціального мікропрофіля поверхні.....	23
<i>Мироненко Е.В., Шаповалов В.Ф., Клочко А.А., Палашек С.Ю., Остапович Е.В.</i> Конструкторско-технологические способы повышения производительности и качества зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов.....	28
<i>Онисько О.Р., Процак П.М.</i> Порівняльний аналіз графічних моделей бічних профілів трикутної різьби: заданого стандартом і отриманого за допомогою різця з ненульовим значенням переднього кута.....	33
<i>Добротворский С.С., Гасанов М.И., Басова Е.В., Головатый Р.В., Гаков С.А., Гнучих С.С.</i> Опыт создания современных технологий изготовления нежестких деталей с применением передовых CAD/CAM/CAE систем.....	37
<i>Кравцов А.Н.</i> Моделирование технологического обеспечения производственно-технических характеристик блочно-модульных инструментов на основе многокритериальной оптимизации.....	41
<i>Тарельник В.Б., Дзюба А.В.</i> Новый способ формирования антифрикционного баббитового слоя подшипников скольжения.....	51
<i>Панчук В.Г., Шуфлін В.В.</i> Геометричне визначення гіперболічного профілю задньої поверхні круглого фасонного радіального різця.....	57
<i>Веселовська Н.Р.</i> Розробка математичних моделей для обґрунтування алгоритмів прийняття рішень при діагностуванні верстатного комплексу з чпк в альтернативних ситуаціях.....	60
<i>Набока Е.В., Колесник М.Э.</i> Стратегическая и оперативная автоматизации системы управления подготовки производства.....	68
<i>Иванова М.С.</i> Математическое моделирование процесса обработки отверстий комбинированным осевым инструментом.....	72
<i>Клочко Ю.А., Камчатная-Степанова Е.В., Сикетина Н.Г.</i> Анализ механизмов реализации производственно-сбытовой деятельности промышленного предприятия.....	76

<i>Яким Р.С., Сліпчук А.М.</i> Проектно-конструкторські основи вдосконалення технології виготовлення шарошок із вставним твердосплавним породоруйнівним оснащенням тришарошkových бурових доліт	79
<i>Шелковой А.Н., Степанов М.С., Семченко М.С.</i> Конструкторско-технологическое проектирование гибких производственных систем методами имитационного моделирования.....	83
<i>Яковенко И.Э., Пермьяков А.А.</i> Оптимизация режимов резания при обработке инструментальными блоками.....	89
<i>Ламнауер Н. Ю.</i> Діагностика безвідмовності технологічних систем за показниками якості, що вимірюються.....	93
<i>Хавин Г.Л.</i> Образование дефектов при сверлении слоистых композитов и механизм появления расслаивания.....	96
<i>Клименко Г.П. Гузенко В.С., Полупан И.И.</i> Исследование влияния усилий закрепления режущей пластины по цилиндрическому отверстию на динамические характеристики сборного резца.....	101
<i>Konoplyanchenko E., Kolodnenko V., Atalawei W.</i> Saving disassembly at heavy-duty gas turbine compressor reengineering.....	104
<i>Иванов В.О., Карпусь В.Є., Дегтярьов І.М., Павленко І.В., Богдан В.Р.</i> Чисельне моделювання верстатних пристроїв для механічної обробки деталей типу важелів	110
<i>Исаков С.Н., Марусенко С.И.</i> Трибологическая система ультразвуковой сварки пластмасс. Тестовые расчеты	116
<i>Кузнецова А.В., Гнисько А.Н., Терещенко Т.В.</i> Прогнозирование ресурса конических передач с двояковыпукло-вогнутыми зубьями	119
<i>Гуцаленко Ю. Г.</i> Системный подход к сравнительной оценке работоспособности инструментальных материалов по стандартным регламентам стойкостных испытаний	124
<i>Лобанов В. К., Пашкова Г.И.</i> Результаты исследования сопротивления усталости технических вариантов цапф задних мостов специальных транспортных средств	129
<i>Еникеев А.Ф., Евсюкова Ф.М., Шищенко Л.А.</i> Анализ эффективности аппаратных средств управления продольной подачей шлифовального круга.....	132
<i>Kolesnyk V., Zajac J., Radchenko S., Adamian M.</i> The effect of cutting temperature on hole quality when drilling cfrp/metal stack	138
<i>Приходько О.Ю., Сліпченко С.Є.</i> Імітація поведінки технологічних систем з використанням мереж петрі.....	142
<i>Нешта А.А., Криворучко Д.В.</i> Область применения метода обработки внутренней резьбы мерным инструментом.....	145
<i>В.Г. Шкурупий</i> Аналитическое определение параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании с учетом износа зерен.....	150
<i>Новиков Ф.В., Рябенков И.А.</i> Условия уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании	154

<i>Автономова Л.В., Грозенок Е.Д., Симсон Э.А.</i> Моделирование процесса горячей раскатки колец подшипника	158
<i>Автономова Л.В., Симсон Э.А., Ягудин Д.С.</i> Оценка конструктивной прочности специализированного обрабатывающего инструмента.....	162
<i>Добротворский С.С., Гнучих С.С., Добровольская Л.Г.</i> Исследование степени деформации двухслойных титановоалюминиевых пакетов при ударном нагружении Стальным инструментом с применением cae систем	166
<i>Костюк Г.И., Миргородская Е.В., Мелкозёрова О.М.</i> Исследование величины объема нанокластера и глубин его залегания при действии ионов разных энергий, сортов и зарядов на магниевые сплавы.....	170
<i>Ступницький В.В., Доляняк Я.В.</i> Дослідження процесів наростоутворення та зношування різального інструмента за допомогою реологічного моделювання процесу різання.....	177
<i>Лебедь В.Т., Тарельник Н.В., Лашкарев О.Н., Ропьяк Л.Я.</i> Повышение качества соединения крупногабаритных составных изделий.....	181
<i>Alexander L. Kapelevich, Stephen D. Korosec</i> Involute spiral face couplings AND gears: design approach AND manufacturing technique.....	185
<i>Фесенко А.В.</i> Анализ энергетических характеристик роторных аппаратов для гидродинамической активации гидкостей.....	190
РЕФЕРАТИ.....	194
РЕФЕРАТЫ.....	200
ABSTRACTS.....	206

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХП»**

Збірник наукових праць

Серія:
Технології в машинобудуванні

№ 4 (1113) 2015

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. Ю.В. Тимофієв,
д-р техн. наук, проф. О.О. Клочко
Технічний редактор канд. техн. наук, доц. Є.В. Басова

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХП».
Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів.
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: vestms@lenta.ru.

Обл.-вид № 16–15.

Підп. до друку 28.04.2015 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 10.
Тираж 300 пр. Зам. № 3033. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Друкарня ДП ХМЗ «ФЕД»

Свідоцтво про державну реєстрацію №23752352 від 23 жовтня 1995р.
61023, Харків, вул. Сумська, 132, тел. +38 (057) 719-67-82
e-mail: alina@tfed.com.ua