

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

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Технології в машинобудуванні

№ 17 (1239) 2017

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 17 (1239). –96 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

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 наказом МОН України від 21.12.2015 № 1328 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року»

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. ЄПІФАНОВ, 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.; М. А. ТКАЧУК, 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.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: О.А. Пермяков, д-р техн. наук, проф.

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

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

Члени редколегії: С.С. Добротворський, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Ковальов, д-р техн. наук, проф.; Є.В. Мироненко, д-р техн. наук, проф.; В.С. Антонюк, д-р техн. наук, проф.; М.М. Кане, 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 №5 від 02«червня» 2017 р.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

BULLETIN
OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

Series: « Techniques in a machine industry»

№ 17 (1239) 2017

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkov
NTU «KhPI»

Collected Works. Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2017. – № 17 (1239). – 96 p.

State edition

Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy

KB № 5256 from July 2, 2001

The collection is published in Ukrainian and Russian.

Bulletin of National Technical University «KhPI» included in the «List of scientific professional editions of Ukraine, which can be published results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences», approved by order of the (MES of Ukraine) of 21.12. 2015 № 1328 «On approval decisions Certifying Board of the Ministry for academic councils of 28 December 2015»

Coordinating Board:

L. L. Tovazhnyanskyy, Dr. Tech. Sci., Prof. (**chief**);
K. A. Gorbunov, PhD. Tech. Sci., Docent. (**secretary**);
A. P. Marchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ye. I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.;
Ye. Ye. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. V. Boiko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
F. F. Hladkyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. D. Hodlevskyy, Dr. Tech. Sci., Prof.;
A. I. Hrabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof. V. H. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. D. Dmytryienko, Dr. Tech. Sci., Prof.; I. F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. V. Yepifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Yu. I. Zaitsev Dr. Tech. Sci., Prof.;
P. O. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.;
S. I. Kondrashov, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. A. Tkachuk Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; H. V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.;
O. K. Morachkovskyy, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Nikolaenko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
P. H. Pererva, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. A. Puliaiev, Dr. Tech. Sci., Prof.;
M. I. Ryshchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.;
H. M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof.

Editorial Board:

Editor: A. A. Permiakov, Dr. Tech. Sci., Prof.

Deputy editor: A. A. Klochko, Dr. Tech. Sci., Prof.

Secretary: Ye. V. Basova, PhD. Tech. Sci., Docent, M. S. Ivanova, PhD. Tech. Sci., Docent.

Members of the editorial board: S. S. Dobrotvorskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. D. Kovalev, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ye. V. Mironenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. S. Antonyuk, Dr. Tech. Sci., Prof.;
M. M. Kane, Dr. Tech. Sci., Prof.; Yu. A. Syzyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; D. V. Stalinskyi, Dr. Tech. Sci.;
M. S. Stepanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. A. Fadiev, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. D. Khitsan Dr. Tech. Sci., Prof.;
A. N. Shelkovyi, Dr. Tech. Sci., Prof.

*In April 2013 Bulletin of National Technical University «KhPI» series «Technologies in mechanical engineering» included in the directory database of periodicals **Ulrich's Periodicals Directory** (New Jersey, USA).*

Recommended for publication by the Academic Council of NTU «KhPI».

Protocol No 5 of June 02, 2017

УДК 681.513

И.П. ХАВИНА, Г.И. МОЛЧАНОВ

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОАЛИЦИЕЙ РОБОТОВ

Запропоновано рішення задачі оптимального розподілу завантаження коаліції мобільних роботів для забезпечення технологічного процесу виготовлення виробів методами лезової обробки. Рішення отримано на основі мультиагентної системи з децентралізованим управлінням за допомогою переговорів агентів системи через різні алгоритми комбінаторних аукціонів.

Ключові слова: оптимальний розподіл завантаження роботів, мультиагентна система, комбінаторний аукціон, технологічний процес лезової обробки.

Предложено решение задачи оптимального распределения загрузки коалиции мобильных роботов для обеспечения технологического процесса изготовления изделий методами лезвийной обработки. Решение получено на основе мультиагентной системы с децентрализованным управлением с помощью переговоров агентов системы через различные алгоритмы комбинаторных аукционов.

Ключевые слова: оптимальное распределение загрузки роботов, мультиагентная система, комбинаторный аукцион, технологический процесс лезвийной обработки.

A solution of the optimal distribution of load coalition mobile robots for manufacturing products of the process edge cutting processing methods. The decision taken is based on multi-agent systems with decentralized management through negotiation system agents through various algorithms for combinatorial auctions.

Keywords: optimal distribution of load robots, multi-agent systems, combinatorial auction, a technological process of cutting.

Введение. Современное машиностроительное предприятие, базирующееся на механической обработке материалов, представляет собой сложную многокомпонентную систему, содержащую большое количество связей, значительный объем материальных ресурсов и потоков информации. При этом, как правило, такое предприятие является корпорацией – объединением нескольких распределенных предприятий, что требует наличия корпоративной системы управления для оперативного решения задач управления. В то же время современной мировой тенденцией является ориентация предприятий машиностроения на безлюдные технологии. В работе рассмотрена часть производственной системы, которая обеспечивает движение материалов для реализации автоматического производственного технологического процесса (ТП) – система управления коллективом интеллектуальных мобильных транспортных роботов [1, 2].

Анализ последних исследований и литературы. Существует ряд подходов к созданию систем управления коллективом роботов: автоматные модели, роевые, "пчелиные" и "муравьиные" алгоритмы, эволюционные методы и др. [1, 3]. Современным направлением для реализации таких сложных распределенных систем управления в режиме реального времени является применение методов искусственного интеллекта в виде мультиагентных систем (МАС), характеризующихся гибкостью, поскольку, динамично реагируют на изменение среды, постоянно улучшая решения в реальном времени [4]. При мультиагентном подходе возможна реализация децентрализованного управления интеллектуальными роботами, когда каждый агент-робот самостоятельно принимает и реализует решения.

МАС строится как объединение агентов, основанных на знаниях. При этом мультиагентная система считается объектом вида

$$MAC = (A_j, E_j, R_k, ORG_l, ACT_m, COM_n, EV_p),$$

где A_j , $j = \{1, \dots, J\}$ – множество агентов, способных функционировать в некоторых средах E_i , $i = \{1, \dots, I\}$, находящихся в определенных отношениях R_l , $l = \{1, \dots, L\}$, друг с другом. Агенты могут формировать некоторые коалиции ORG_k , $k = \{1, \dots, K\}$ и обладают некоторым набором индивидуальных и совместных действий (стратегий поведения) ACT_m , $m = \{1, \dots, M\}$, включая коммуникативные действия COM_n , $n = \{1, \dots, N\}$, а также эволюционировать EV_p , $p = \{1, \dots, P\}$ [5].

Для создания МАС за каждым объектом и компонентой, участвующих в процессе производства, закрепляется свой программный агент. Например, МАС управления движением мобильных транспортных роботов может состоять из: множества агентов заказов – $A_{зак}$, которые принимают заявки на выполнение изделий; множества агентов изделий – $A_{изд}$, содержащих базу знаний операционных ТП изготовления изделий; множества агентов оборудования – $A_{оборуд}$ которые контролируют состояние оборудования и посылают заявки множеству агентов транспортных роботов – $A_{тр}$; множеству агентов складов – $A_{скл}$, которые формируют собственные базы знаний и предоставляют информацию другим агентам о наличии и параметрах заготовок, приспособлений и инструментов на складах и их параметры. Каждый из агентов множества $A_{тр}$ отвечает за управление своим транспортным роботом. Про этом, законы управления зависят от марки робота, его загруженности, скорости перемещения, наличия манипуляторов и т.д.

Первым в системе управления начинают работу агенты заказов, которые формирует заявки на изготовление изделий агентам изделий. Затем агенты из-

деля, исходя из базового ТП формируют запросы к агентам оборудования о возможности выполнения ими заданной операции. Если операция возможна, агенты оборудования формируют запрос к агентам транспортных роботов на доставку необходимых заготовок или инструментов. После выполнения операции посылается сообщение агенту соответствующего изделия об окончании операции и о принятии решения о дальнейшем транспортировании заготовки на склад, или на выполнение следующей операции ТП.

Очевидно, что ТП производства изделий зависит от координации работы коллектива транспортных роботов при выполнении всех заявок в минимальное время, и решение такой задачи в условиях распределенного производства изделий в режиме реального времени является актуальным.

Целью работы является создание системы управления коалицией мобильных транспортных роботов в режиме реального времени для цеха механообработки для обеспечения оптимального по времени ТП изготовления изделий.

Результаты исследований. Оптимальное функционирование агентов-роботов в условиях децентрализованного управления достигается за счет переговоров, которые ведутся по заранее определенным протоколам. Одним из видов протокола являются аукционы, которые показали свою эффективность при координации коллективного поведения агентов, и могут быть успешно применены при управлении процессом распределенного решения множеством агентов одной общей задачи [6-11].

В последнее время за рубежом уделяют много внимание изучению путей решения проблем распределения заданий при децентрализованной структуре управления [4, 6-12]. Этот подход, основанный на локальной оценке действий агентов с помощью целевых функций, позволяет преодолеть ограничения и недостатки централизованного решения. Т.е. решение задачи распределения наборов заданий возможно, но вычислительные затраты высоки и время их решения не достаточно для их применения в условиях реального производственного процесса, где агенты могут не обладать достаточным объемом памяти.

Для решения задачи оптимального управления коалицией роботов в работе [13] предложено использование алгоритмов аукционов, где каждый агент взаимодействует со всеми агентами и сам определяет ставки и победителя. Данная работа является продолжением работы [13].

Коллектив из транспортных роботов, свободных в данный момент времени, составляет временную коалицию. Пусть за рабочую смену $t_{см}$ агенты-роботы участвуют в работе K коалиций.

Тогда целевая функция оптимального управления транспортными роботами, работающими в коалиции в течении смены, имеет вид

$$\Phi_{тр}(U_{тр}) = \sum_{k=1}^K \Phi_k \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где Φ_k – критерий качества работы k -й ситуационной

коалиции агентов роботов, представляющий собой суммарное время выполнения заявок N_k

$$\Phi_k = \sum_{i=1}^{N_k} t_{ik} \Rightarrow \min, \quad k=1, \dots, K, \quad (2)$$

где N_k – количество заказов, выполняемых k -й коалицией; t_{ik} – время выполнения i -го заказа в k -й коалиции определяющегося соотношением

$$t_{ik} = \min_j(t_{ijk}), \quad j=1, \dots, J_k, \quad i=1, \dots, N_k, \quad (3)$$

где j – номер агента в k -й коалиции; t_{ijk} – время выполнения j -м агентом k -й коалиции i -го заказа; J_k – число агентов в k -й коалиции, а операция определения минимума учитывает только множество агентов $\{A_{тр1}, A_{тр2}, \dots, A_{трJ_k}\}$ не занятых на выполнении других заявок.

Выполнение критерия эффективности управления (1) обеспечивается последовательным выполнением ситуационных критериев эффективности (2) за счет условия (3) на всех этапах управления.

Решение задачи оптимального управления (1) – (3), реализуемое в режиме реального времени путем поэтапных аукционов внутри ситуационных коалиций агентов-роботов, требует формирования таких целевых функций агентов, которые обеспечивают наиболее эффективное решение задачи (2) для каждой ситуационной коалиции.

С другой стороны, целевые функции агентов должны стимулировать участие свободных в текущий момент времени агентов во всех формирующихся ситуационных коалициях и на всех этапах аукционов по распределению текущих заявок.

В качестве компонент целевых функций агентов транспортных роботов предложено использовать две составляющие. Первая составляющая стимулирует участие агента транспортного робота на всех этапах аукциона по распределению заявок внутри коалиции во всех доступных ему коалициях. Эта компонента представляет собой нормированное среднее значение относительного времени на транспортную операцию j -го агента при работе в k -й коалиции

$$U_j^1 = \frac{1}{N_{kj}} \left[\sum_{i=1}^{N_{kj}} (t_{ijk_{раб}} / t_{ijk_{max}}) - 1 \right] \Rightarrow \min, \quad j=1, \dots, J_k, \quad (4)$$

где N_{kj} – количество заявок, которое может выполнить j -й робот в k -й коалиции; $t_{ijk_{раб}}$ – время j -го робота на i -ю заявку, определяемое как $t_{ijk_{раб}} = t_{ijk_0} + t_{ijk_{дост}}$, где t_{ijk_0} – время перемещения транспортного робота от текущего места до места складирования по i -й заявке; $t_{ijk_{дост}}$ – время перемещения j -го транспортного робота от места складирования к месту i -й доставки; $t_{ijk_{max}}$ – максимальное время из набора $t_{ijk_{раб}}$.

Вторая составляющая целевой функции агента-робота максимально стимулирует его участие во всех ситуационных коалициях K_j , где K_j – количество коалиций в которых участвовал j -й агент-робот и представляет собой нормированное время простоя j -го транспортного робота за время рабочей смены

$$U_j^2 = 1 - \frac{1}{t_{\text{см}}} \sum_{k=1}^{K_j} t_{ik\text{раб}} \Rightarrow \min, \quad j=1, \dots, N_{\text{тр}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{см}}$ – продолжительность рабочей смены; $N_{\text{тр}}$ – количество транспортных роботов системы.

Критерии (4) и (5) должны выполняться при ограничении на суммарное время работы j -агента транспортного робота

$$\sum_{k=1}^{K_j} \sum_{i=1}^{N_{jk}} t_{ik\text{раб}} + t_{j\text{проф}} \leq t_{\text{см}}, \quad (6)$$

где $t_{j\text{проф}}$ – время, затраченное на профилактику j -го робота.

Задача оптимального управления транспортными роботами (1) – (3) реализуется через решение многокритериальной задачи оптимизации работы транспортных роботов (4) – (6) путем формирования ситу-

ационных коалиций роботов и проведения этими коалициями аукционов [12] в режиме реального времени.

Для решения поставленной задачи оптимального управления (1) – (3) за счет коалиционной оптимальной координации работы агентов-роботов, реализуемой путем решения задачи оптимизации (4) – (6) создана модифицированная модель аукциона, которая состоит из конечного числа последовательных раундов.

Стремление к выполнению критериев задачи (4) и (5) требует от каждого агента-робота участия во всех ситуационных коалициях и во всех раундах аукциона, при условии, что робот свободен.

Для демонстрации механизма аукциона представим задачу в виде направленного графа для одной коалиции из трех транспортных роботов (рис. 1).

Рассматривается частный случай, где количество заявок $N = 3$ и количество агентов $J_k = 3$. Время выполнения заявок t_{jn} , $n=1, \dots, N$ каждым j -м транспортным роботом задано согласно рис. 1,

$$\begin{aligned} t_{11} &= 20, t_{12} = 12, t_{13} = 6, \\ t_{21} &= 21, t_{22} = 10, t_{23} = 11, \\ t_{31} &= 10, t_{32} = 11, t_{33} = 8. \end{aligned}$$

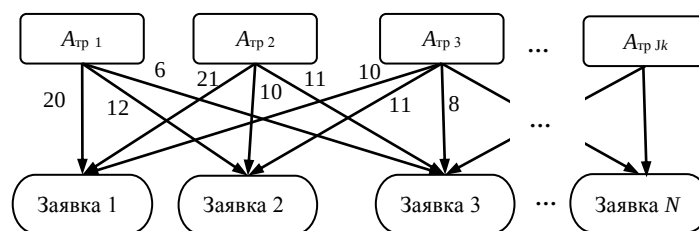


Рис. 1 – Направленный граф

Взаимодействие j -го агента транспортного робота со средой в течении каждого текущего такта характеризуется функцией оценки (ставки) P_j , на основе которого он и принимает решение о своих последующих действиях, рассчитывается как разница времен выполнения агентом двух заявок с минимальным временем $t_{\min 1}, t_{\min 2}, t_{\min 1} \leq t_{\min 2}$ $P_j = (t_{j\min 2} - t_{j\min 1}) + \varepsilon$, где ε – премия за доставку (в данной задаче постоянная величина $\varepsilon = 1$).

В дальнейшем ставка определяет величину накапливаемой итоговой функции оценки деятельности каждого агента, участвующего в раунде, и на основе ставок агент принимает решение о своих последующих действиях. Чем ставка выше, тем меньше времени агент-робот затратит на выполнение заявки, и самая большая ставка будет соответствовать самой выгодной заявке раунда.

Смысл такого расчета ставки основан на вычислении значения известного в теории игр под названием “сожаления” и в данном случае определяет размер потерь, которые понесет вся коалиция агентов, если

агент не станет победителем. Такой подход позволяет оценить размер возможного проигрыша для каждого раунда и получить оптимальное (квазиоптимальное) решение.

В первом раунде аукциона (рис. 2) получаем:

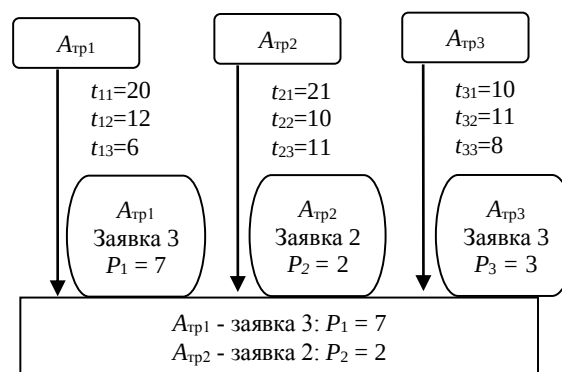


Рис. 2 – Первый раунд аукциона
для агента $A_{\text{тр}1}$ заявка 3 и временем t_{13} дает ставку $P_1 = 12 - 6 + 1 = 7$; для $A_{\text{тр}2}$ заявка 2 и временем t_{22} дает ставку $P_2 = 11 - 10 + 1 = 2$; для $A_{\text{тр}3}$ заявка 3 и временем t_{33} дает ставку $P_3 = 10 - 8 + 1 = 3$.

На выполнение заявки 3 претендуют сразу два агента 1 и 2, но ставка 1-го больше, поэтому заявку выигрывает первый агент. На заявку 2 претендует только агент $A_{тр2}$, поэтому он ее получает.

Вследствие того, что не все заявки распределены, начинается следующий, второй раунд (рис. 3). Для двух распределенных заявок в следующем раунде повышается значение времени их заявок на величину их ставок:

для $A_{тр1}$: заявка 2 $t_{12} = 12 + 2 = 14$;
 для $A_{тр2}$: заявка 3 $t_{23} = 11 + 7 = 18$;
 для $A_{тр3}$: заявка 2 $t_{32} = 11 + 2 = 13$ и
 заявка 3 $t_{33} = 8 + 7 = 15$.

Для нераспределенной заявки 1 время не изменяется.

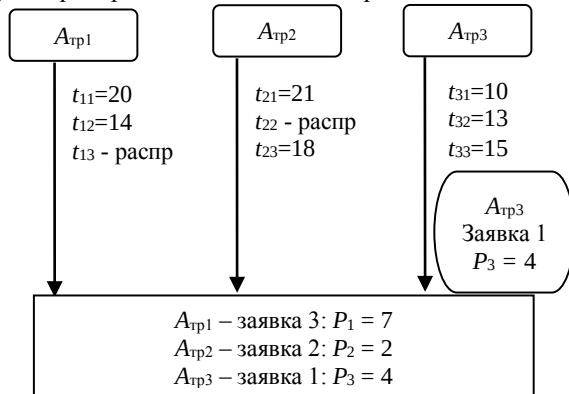


Рис. 3 – Второй раунд аукциона

После расчетов второго раунда имеем:

для $A_{тр1}$ заявка 3, ставка $P_1 = 7$ остается;
 для $A_{тр2}$ заявка 2, ставка $P_2 = 2$ остается;
 для $A_{тр3}$ заявка 1, ставка
 $P_3 = 13 - 10 + 1 = 4$ назначается.

Аукцион завершается, т.к. все заявки завершены. Итоговое время заявок для примера составит

$$\Phi_{тр} = 6 + 10 + 10 = 26.$$

При задаче с большей размерностью решение представляет собой квазиоптимальное решение.

Для компьютерного моделирования задач высокой размерности с помощью языка Java и библиотеки Jade был реализован алгоритм аукциона и создана имитационная мультиагентная система оптимального управления коалицией агентов транспортных роботов.

Тестирование созданной системы управления проводилось с помощью двух методов. Первый метод решения реализует жадный алгоритм, когда первой выполняется заявка с наилучшим показателем, второй – заявка со следующим по порядку за наилучшим показателем и т.д. Второй метод решения реализует приведенный выше многоаундовый аукцион.

На рис. 4 показаны зависимости времени, затраченного на получение оптимального решения от размерности задачи (числа заявок и количества агентов-роботов). Видно, что при сравнительно малой размерности задачи ($N_{тр} = 100$, $N = 100$) для двух рассматриваемых методов время решения поставленной задачи практически одинаково.

При повышении размерности задачи до $N_{тр} = 400$ и $N = 300$ время решения задачи на основе

жадного алгоритма непрерывно увеличивается по отношению к времени решения задачи на основе многоаундового аукциона. Для высокой размерности задачи это отношение достигает значительной величины (до 3,5 - 4 раз).

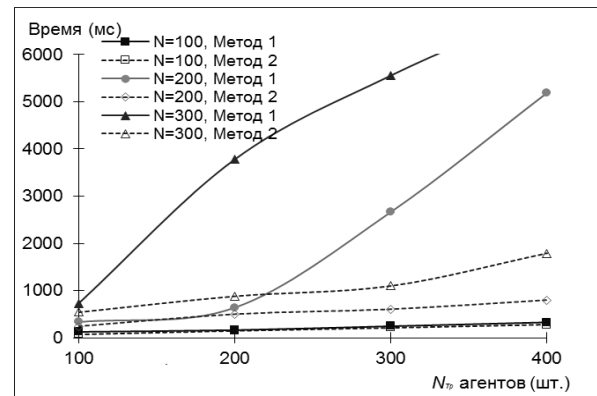


Рис. 4 – Результаты экспериментов

Полученные результаты показывает достаточно высокую эффективность применения предлагаемого подхода для систем оптимального управления технологическими процессами механообработки в режиме реального времени.

Выводы. Таким образом, впервые предложено решение задачи оптимального управления мобильными транспортными роботами для обеспечения технологического процесса изготовления изделий методами механообработки, основанное на мультиагентной системе децентрализованного типа, где оптимальное решение достигается с помощью переговоров агентов на основе аукциона. Предложенный метод управления группой транспортных роботов, обеспечивает достаточную для этого класса задач скорость решения.

В работе в качестве примера была взята задача о распределении заданий для группы роботов, которые выполнив задание опять входят в состав коалиции и вновь принимают участие в аукционе, что позволяет утверждать о применимости данного подхода к построению систем управления предприятием в реальном времени.

Дальнейшая работа будет направлена на усовершенствование алгоритмов аукциона с целью повышения скорости сходимости и точности решения.

Список литературы

1. Machining: fundamental and recent advanced / Editors I. Davim, J. Paulo. – London: Springer, – 2008. – 364 p.
2. Весткемпер Э. Введение в организацию производства / Э. Весткемпер, М. Декер, Л. Ендуби, и др. Под ред. А.И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 376 с.
3. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: Монография / А.В. Богуслаев, Ал.А. Олейник и др. Под ред. Д.В. Павленко, С.А. Субботина. – Запорожье: ОАО "Мотор Сич", 2009. – 468 с.
4. Shoham Y. Multiagent systems: Algorithmic, Game-theoretic and logical foundations. / Y. Shoham, K. Leyton-Brown. – Stanford University, University of British Columbia, 2009. – 513 с.
5. Тарасов В.Б. От мультиагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика / В.Б. Тарасов. – М.: Едиториал УРСС, 2002 – 352 с.
6. Vorobeychik Y. A game theoretic bidding agent for the ad auction game // Association for the Advancement of Artificial Intelligence,

- 2010, – pp. 6-12.
7. Amir O., Sharon G., Stern R. Multi-agent path finding as a Combinatorial auction // *Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2015. – pp. 2003-2009.
 8. Cetnarowicz K. Multi-agent system for flexible manufacturing systems management // *2-nd International Workshop of Central and Eastern Europe on Multi-Agent Systems*, Krakow, 2001, – pp. 51-60.
 9. Land A. PAUSE: A computationally tractable combinatorial auction // A. Land, S. Powell, R. Steinberg // MIT Press – 2006 – pp. 139-157.
 10. Mendoza B., Vidal J.M. Bidding Algorithms for a Distributed Combinatorial Auction // B. Mendoza, Vidal J.M. - *Proc. 6-th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Honolulu, Hawaii, May 2007, pp. 102-110.
 11. Fujishima Y. Taming the computational complexity of combinatorial auctions: Optimal and approximate approaches. In *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 548-553. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999.
 12. Etienne M.B. Implementing a Multi-agent system in Python with an auction-Based agreement approach / M.B. Etienne, S. Vester, J. Villadsen. – *Department of Informatics and Mathematical Modeling. Technical University of Denmark*. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://steenvester.com/pdf/promas11.pdf> (15.02.2017).
 13. Khavina I. Multiagent system for the optimal control of a combination of transport robots in manufacturing technological process // *International Conference Telecommunications and Computer Science, TCSET'2016*, 23-26 February, 2016, Slavske in Lviv region, 5 p.
- Bibliography (transliterated)**
1. Machining: fundamental and recent advanced. Editors I. Davim, J. Paulo. London, Springer, Publ., 2008. 364 p.
 2. Vestkemper Je. Vvedenie v organizaciju proizvodstva [Introduction to production organization] Je. Vestkemper, M. Dekker, L. Endoubi, i dr. Pod red. A.I. Grabchenko. Har'kov, NTU «KhPI». Publ., 2008. 376 p.
 3. Progressivnye tehnologii modelirovaniya, optimizatsii i intellektual'noj avtomatizatsii jetapov zhiznennogo tsikla aviacionnykh dvigatelej: Monografija [Progressive technologies of modeling, optimization and intelligent automation of the life cycle stages of aircraft engines: Monograph] / A.V. Boguslaev, A.I. Olejnik i dr. Pod red. D.V. Pavlenko, S.A. Subbotina. Zaporozh'e: OAO "Motor Sich". Publ., 2009. 468 p.
 4. Shoham Y. Multiagent systems: Algorithmic, Game-theoretic and logical foundations. / Y. Shoham Y., K. Leyton-Brown. *Stanford University, University of British Columbia*. Publ., 2009. 513 p.
 5. Tarasov V.B. Ot mul'tiagentnykh sistem k intellektual'nykh organizatsijam: filosofija, psihologija, informatika [From multi-agent systems to intellectual organizations: philosophy, psychology, informatics] / V.B. Tarasov. Moskva. Editorial URSS. Publ., 2002. 352 p.
 6. Vorobeychik Y. A game theoretic bidding agent for the ad auction game. *Association for the Advancement of Artificial Intelligence*, 2010, – pp. 6-12.
 7. Amir O., Sharon G., Stern R. Multi-agent path finding as a Combinatorial auction. *Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2015, – pp. 2003-2009.
 8. Cetnarowicz K. Multi-agent system for flexible manufacturing systems management. *2-nd International Workshop of Central and Eastern Europe on Multi-Agent Systems*, Krakow, 2001, – pp. 51-60.
 9. Land A. PAUSE: A computationally tractable combinatorial auction // A. Land, S. Powell, R. Steinberg. MIT Press.– 2006, – pp. 139-157.
 10. Mendoza V. Bidding Algorithms for a Distributed Combinatorial Auction. B. Mendoza, Vidal J.M. - *Proc. 6-th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Honolulu, Hawaii, May 2007, pp. 102-110.
 11. Fujishima Y. Taming the computational complexity of combinatorial auctions: Optimal and approximate approaches. In *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 548-553. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999.
 12. Etienne M.B. Implementing a Multi-agent system in Python with an auction-Based agreement approach. M.B. Etienne, S. Vester, J. Villadsen. – *Department of Informatics and Mathematical Modeling. Technical University of Denmark*. Available at: <http://steenvester.com/pdf/promas11.pdf> (15.02.2017).
 13. Khavina I. Multiagent system for the optimal control of a combination of transport robots in manufacturing technological process. *International Conference Telecommunications and Computer*

Поступила (received) 15.02.2017

Мультиагентна система оптимального управління коаліцією роботів / І.П. Хавіна, Г.І. Молчанов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 5–9. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-004X.

Мультиагентная система оптимального управления коалицией роботов / И.П. Хавина, Г.И. Молчанов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 5–9. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-004X.

Multi-agent systems optimal control coalition robots / I. Khavina, G. Molchanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P5–9. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хавина Інна Петрівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Вычислительная техника и программирование»; тел.: (057)-707-61-65; e-mail: inna.khavina25@gmail.com;

Хавіна Інна Петрівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Обчислювальна техніка та програмування»; тел.: (057)-707-61-65; e-mail: inna.khavina25@gmail.com;

Khavina Inna Petrivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of "Computer equipment and programming"; tel.: (057)-707-61-65; e-mail: inna.khavina25@gmail.com;

Молчанов Георгій Ігоревич – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший преподаватель кафедри «Вычислительная техника и программирование»; тел.: (057)-707-61-65; e-mail: xone@ukr.net;

Молчанов Георгій Ігоревич – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Обчислювальна техніка та програмування»; тел.: (057)-707-61-65; e-mail: xone@ukr.net;

Molchanov Heorhii Ihorovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of "Computer equipment and programming"; tel.: (057)-707-61-65; e-mail: xone@ukr.net.

УДК 621.9.02

О. Р.ОНИСЬКО, М.І.ПСЮК**АНАЛІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРОФІЛЮ ЗАМКОВОЇ НАРІЗИ ВИГОТОВЛЕНОЇ РІЗЦЯМИ ІЗ ЗАГАЛЬНИМ ПОЛОЖЕННЯМ ПЕРЕДНЬОЇ ПОВЕРХНІ ТА ЗАДАНОЇ ТОЧНІСТЮ ЇЇ ВСТАНОВЛЕННЯ**

Виготовлення конічних замкових нарізей відбувається за допомогою різців із нульовим значенням переднього статичного кута у вершинній точці і тим самим зменшуються технологічні можливості, щодо збільшення технологічної стійкості інструмента в умовах обробки важкообробних матеріалів з яких часто виготовляють бурові замки. У статті запропоновано алгоритм і прикладний програмний додаток на основі нього, який уможливило провести аналіз впливу переднього кута і кута підйому нарізі на величини відхилів половинних кутів профілю отриманої нарізі. Отримано висновки, які свідчать про можливість застосування вказаної прикладної програми у підготовці і проведенні подальших досліджень впливу точності установки інструмента, його геометричних параметрів та технологічних факторів процесу на точність отриманого профілю замкової нарізі.

Ключові слова: замкова нарізь, різець, передній кут, кут підйому нарізі, половинний кут профілю отриманої нарізі, кут нахилу різальної кромки, статичний передній кут з нульовим значенням.

Изготовление конических замковых резьбы происходит с помощью резцов с нулевым значением переднего статического угла в вершинной точке и тем самым уменьшаются технологические возможности, по увеличению технологической стойкости инструмента в условиях обработки труднообрабатываемых материалов из которых часто изготавливают буровые замки. В статье предложен алгоритм и программное приложение на основе него, которое позволяет провести анализ влияния переднего угла и угла подъема резьбы на величины отклонений половинных углов профиля полученной резьбы. Получены выводы, которые свидетельствуют о возможности применения указанного приложения в подготовке и проведении дальнейших исследований влияния точности установки инструмента, его геометрических параметров и технологических факторов процесса на точность полученного профиля замковой резьбы.

Ключевые слова: замковая резьба, резец, передний угол, угол подъема резьбы, половинный угол профиля полученной резьбы, угол наклона режущей кромки, статический передний угол с нулевым значением.

Production of the tool-joint tapered thread occurs by turning threading tool with zero static back rake angle. It decreases the technological capability to handle hard-made materials that are often used in the tool-joint tapered thread manufacturing. The article suggests application which allows you to analyze the impact of the back rake angle value and helix angle value on the value of half angles of the received thread. The conclusions indicate the possibility of using the said application in the preparation and conduct further research. This study influence the accuracy of the installation tool and its geometric parameters and process technology factors on accuracy of the tool-joint tapered thread profile.

Keywords: Tool-joint tapered thread, cutter, back rake angle, helix angle, half angles of the received thread, side rake angle, zero static back rake angle.

Вступ. У технологічному процесі виготовлення замкових гвинтових нарізей застосовують спеціальні різці, профіль різальної кромки яких у площині передньої поверхні відповідає профілю нарізі. Вказану відповідність забезпечують за рахунок нульового значення величини переднього кута. Впливом величини нахилу різальної кромки, яка відповідає куту підйому нарізі нехтують, оскільки вважають його не суттєвим. Отже виробники нарізевих різців [1,2] виготовляють їх такими, щоб забезпечити потрібний кут нахилу різальної кромки і профіль отриманої нарізі, дотримуючись при цьому нульового значення переднього кута. Такий підхід звісно забезпечує найвищу точність відтворення замкової гвинтової нарізі, однак при цьому оминають можливості підвищення стійкості інструмента за рахунок підбору величини переднього кута у залежності від міцності та твердості матеріалу замка чи труби [3]. На сьогоднішній день передбачено застосування труб нафтогазового сортаменту із межею міцністю s_b у діапазоні від 600 МПа до понад 1200 МПа. Із трьох основних параметрів, які характеризують точність гвинтової нарізі, а саме: точність половинного кута профілю, точність кроку і середнього діаметру нарізі, перший залежить від точності виконанні інструменту, а два інших від нього і від точності процесу точіння нарізі. Отже вельми актуальним є дотримання точності нарізі, а саме половинного кута профілю і кроку з одночасним забезпеченням технологічної стійкості різця за рахунок підбору потрібного значення переднього кута. Не

менш важливим при цьому є врахування точності установлення різальної частини інструменту, оскільки цей технологічний фактор може певною мірою вплинути на точність виготовлення замкової нарізі.

Отже **мета роботи** полягає у здійсненні аналізу точності виконання половинного кута профілю і кроку замкової гвинтової нарізі у залежності від кута нахилу та переднього кута, а також у залежності від точності встановлення різальної частини інструмента щодо деталі, за умови що її профіль залишається незмінним.

Постановка задачі. На основі застосування та уточнення відомих алгоритмів слід виконати спеціальну прикладну програму розрахунку осьового профілю конічної замкової нарізі, яку виготовлено різцем із загальним положенням передньої поверхні, та формою профілю різальної кромки, що відповідає профілю відповідної замкової нарізі. У програмі слід врахувати імовірні величини зміщення установлення різальної частини інструмента, які здатні вплинути на точність половинного кута та крок нарізі. Програма потрібна для здійснення аналізу впливу вказаних факторів на точність замкової нарізі.

Аналіз публікацій. Схема профілю замкової нарізі, що відповідає чинному в Україні стандарту [4] проілюстровано на рисунку 1. Тут H – висота вихідного трикутника, а P – крок нарізі. У ряді досліджень [5,6,7] доведено, що технологічно є не можливо виконати задану гвинтову нарізь, оскільки у випадку, коли площа передньої поверхні інструмента не співпадає

© О.Р.Онисько, М.І.Псюк 2017

із осьовою площиною гвинтової нарізі, то отримана гвинтова поверхня має форму не косої гелікоїди (архімедового гвинта), а конволютного гелікоїди

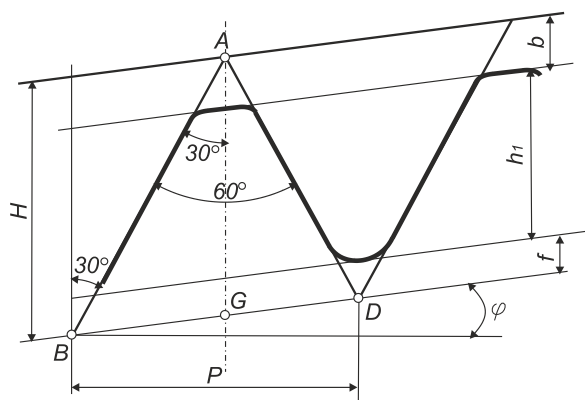


Рис. 1 – Схема профілю замкової нарізі згідно із стандартом ГОСТ 28487-90

На рисунку 2 профіль замкової нарізі відображені у координатах ZOX. Отже бічні сторони AB і AD у вказаних координатах аналітично можна представити лінійним рівнянням:

$$z = \tan 30^\circ (x - r_{\min}) + \frac{P}{2}$$

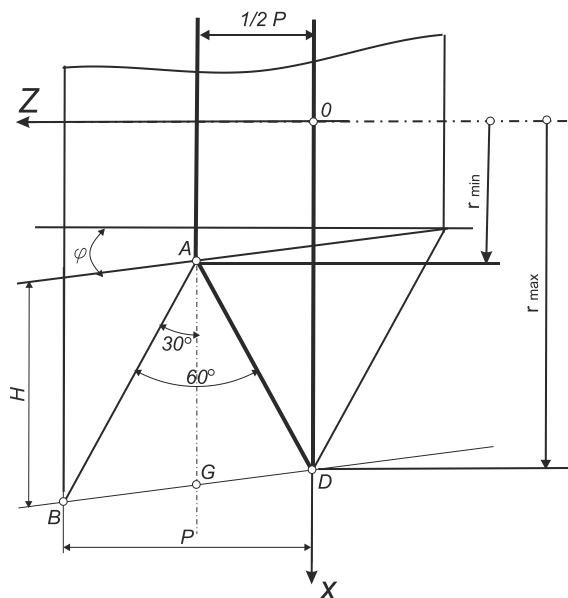


Рис. 2 – Схема профілю замкової нарізі у координатній площині ZOX.

У цій формулі і на рисунку 2 $r_{\min}$ і $r_{\max}$ це відповідно мінімальний і максимальний радіуси нарізі які можна визначити за алгоритмом, що розглянуто у [8]. Оскільки будь-яке відхилення площини передньої поверхні від осьової площини нарізі призводить до форми конволютного гвинта, то форма профілю бічних сторін AB і AD у координатах ZOX аналітично можна представити трансцендентним рівнянням [7]:

$$z(x) = \operatorname{tg}(\alpha_2) x \frac{\sin \tau}{\sin \eta} - \frac{P}{2\pi} \tau, \quad (1)$$

де

$$\tau = \eta - \arcsin\left(\frac{r_a \sin \eta}{x}\right), \quad (2)$$

Для коментарів щодо формул 1 і 2 застосуємо рисунок 3, на якому зображено схему розміщення площини передньої поверхні різця – $ABpDp$ у циліндричній системі координат.

Площина передньої поверхні різця загального положення у циліндричній системі координат. Оскільки поставлена задача вимагає застосування інструмента із ненульовими значеннями переднього кута і кута нахилу різальної кромки тому на рисунку 5 передня поверхня є площиною загального положення. Трикутник $BpADp$ дорівнює трикутнику BAD , який зображено на рисунку 1. На площині $ABpDp$ розміщені взаємно перпендикулярні відрізки $(DpSp)$ і (AC) . Відрізки перетинаються у точці E . Кут між віссю X і прямою AC це статичний передній кут γ у точці A . Задля покращення ілюстрації частина площини $ABpDp$, котра розміщена перед площиною XOY , зафарбована на світло (трикутник $DpAC$). Решта (трикутник $ACBp$) – є дещо темнішою. Таким чином, світліший трикутник $DpAC$ розміщено у октанті із позитивними значеннями аплікати Z , а темніший $(ACBp)$ – в октанті Z де апліката має від'ємні значення. Відрізок Ad' є проекцією відрізка ADp на площину XOY . Відрізок Ab' є проекцією відрізка ABp на площину XOY . Кожна із вказаних проекцій нахилена до осі X під кутами η і η_1 відповідно. У постановці задачі не передбачено розгляд профілю нарізі у її радіусних ділянках. Тому умовно вважатимемо що різальна кромка складається із лівобічної частини ADp і правобічної частини ABp .

Відрізок ADp є лівобічною різальною кромкою різця, а отже твірною гвинта. Вона розміщена під кутом α_2 до площини XOY . Відрізок ABp є правобічною різальною кромкою різця, а отже теж твірною гвинта. Вона розміщена під кутом α_3 до площини XOY . Цей кут не позначено окремо на рисунку 5, але проілюстровано трикутником $b'ABp$.

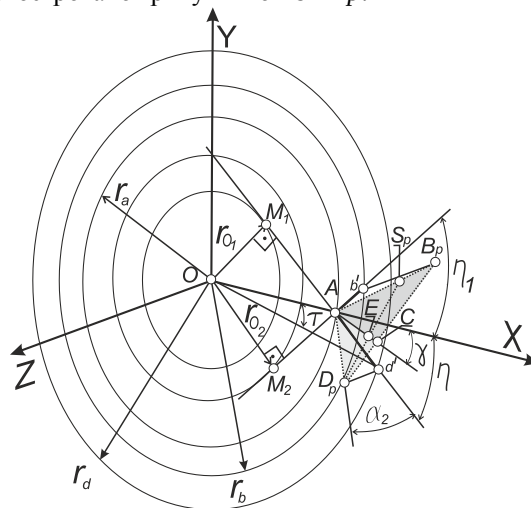


Рис. 5 – Схема розміщення площини передньої поверхні різця $ABpDp$ у циліндричній системі координат

Точка M_1 є точкою дотику прямої AM_1 до основного циліндра з радіусом r_{01} . Точка M_2 є точкою до-

тику прямої AM_2 до основного циліндра з радіусом r_{o2} . Кут τ є полярним кутом довільної точки відрізка Ad' . Аналогічно можна визначити, що кут τ_1 є полярним кутом довільної точки відрізка Ad' . Радіус r_a відповідає значенню r_{min} (див. рис.2).

На рисунку 6 показано проекцію площини передньої поверхні різця на полярну систему координат, як частину вказаної на рисунку 5 – циліндричної системи координат.

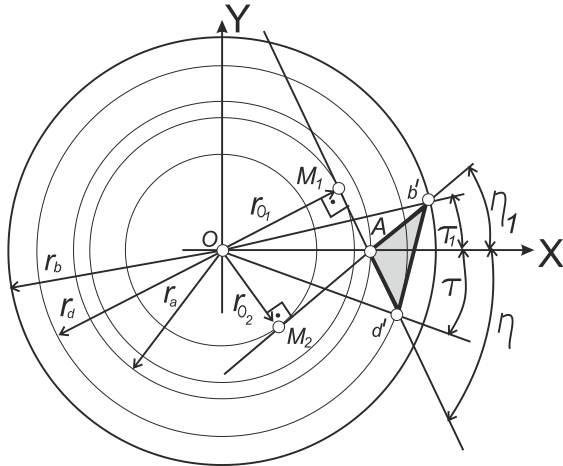


Рис. 6 – Проекція $b'A d'$ площини передньої поверхні різця $ABpDp$ у полярній системі координат

Кут τ є полярним кутом довільної точки d' , що розміщена на циліндрі з радіусом r_d . Кут τ_1 є полярним кутом довільної точки b' , що розміщена на циліндрі з радіусом r_b .

Аналітичний вираз форми профілю замкової нарізі у залежності від переднього кута у вершинній точці і кута підйому гвинта.

Форму профілю замкової нарізі умовно слід розділити на такі частини:

- пряма бічна більша частина (на рисунку 1 її виділено жирною лінією вздовж прямої AB);
- пряма бічна менша частина (на рисунку 1 її виділено жирною лінією вздовж прямої AD);
- пряма коротка частина поблизу точки A ;
- радіусні лінії спряження.

Як йшлося вище, точність нарізі регламентують точністю трьох її параметрів, серед яких крок і половинний кут профілю. Цей кут можна визначити як кут між прямою AB і прямою AG , або як кут між прямою AD і прямою AG . Відрізок AG є перпендикуляром до осі нарізі. У роботах [6,7] показано, що формули 1,2 хоч і описують трансцендентну криву, все ж у межах мінімального r_{min} і максимального r_{max} радіусів (тобто у межах власне самої нарізі, а не теоретичної гвинтової конволютної поверхні) ділянки даних ліній мають фактично прямолінійний характер. Таким чином формули 1,2 відповідають прямолінійній ділянці нарізі, що виконана за допомогою прямолінійної ділянки різальної кромки різця, яка співпадає із відрізком ADp (див. рис.5). У свою чергу інша прямолінійна частина різальної кромки, яка розміщена на відрізку ABp забезпечуватиме виконання іншого прямолінійного боку профілю нарізі за аналогічними до 1,2 формулами:

$$z(x) = tg(\alpha_3)x \frac{\sin \tau_1}{\sin \eta_1} - \frac{P}{2\pi} \tau_1, \quad (3)$$

$$\text{де } \tau_1 = \eta_1 - \arcsin\left(\frac{r_a \sin \eta_1}{x}\right), \quad (4)$$

У формулах 2,4 величини η і η_1 є функціями від значень переднього статичного кута γ у точці A , та кута нахилу різальної кромки λ , що дорівнює куту підйому конічної гвинтової замкової нарізі у її певній точці. Тож для η визначення можна застосувати такий алгоритм:

$$\eta = \gamma + \mu, \quad (5)$$

де $\mu = \frac{q}{t}$, причому:

$$q = \tan \frac{H \cdot \cos \varphi}{2 \sin(60^\circ + \varphi)};$$

$$t = \frac{H \cdot \cos \varphi}{\sin(60^\circ + \varphi)} \sqrt{\left(1 - \sin^2 30^\circ \cos^2 \lambda\right) - \tan^2(\lambda) / 4}$$

Для визначення η_1 можна використати таку формулу:

$$\eta_1 = \arcsin\left(\frac{\sin 30^\circ \sin \lambda}{\sqrt{1 - \sin^2 30^\circ \cos^2 \lambda}}\right) - \gamma. \quad (6)$$

Визначення величини половинного кута профілю отриманої нарізі.

Для визначення вказаного кута слід детальніше розглянути профіль замкової нарізі (див. рис.1), щоб виявити неточність, яка полягає у тому, що пряма AG не ділить крок P навпіл. На рисунку 7 показано схему, на якій крок P складається з двох нерівних частин: Pd і Pb .

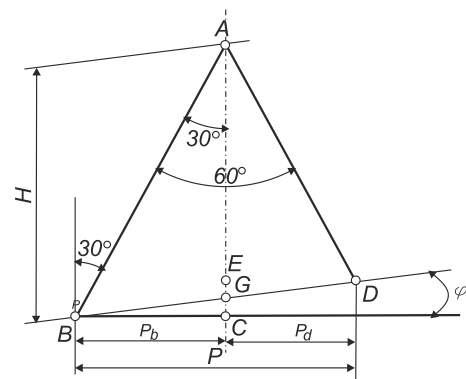


Рис. 7 – Схема для розрахунку складових кроку Pd і Pb замкової нарізі.

Користуючись рисунком 7 визначаємо величини: Pd і Pb за такими формулами:

$$P_b = \tan \frac{H \cdot \cos \varphi}{2 \sin(60^\circ - \varphi)}, \quad (7)$$

$$P_d = \tan \frac{H \cdot \cos \varphi}{2 \sin(60^\circ + \varphi)} \cdot (8)$$

Далі у точку A , яку визначено за допомогою формул 7, 8 перенесемо початок координат ZX . На рисунку 8 показано схему із плоско паралельним переміщенням початку координат ZX .

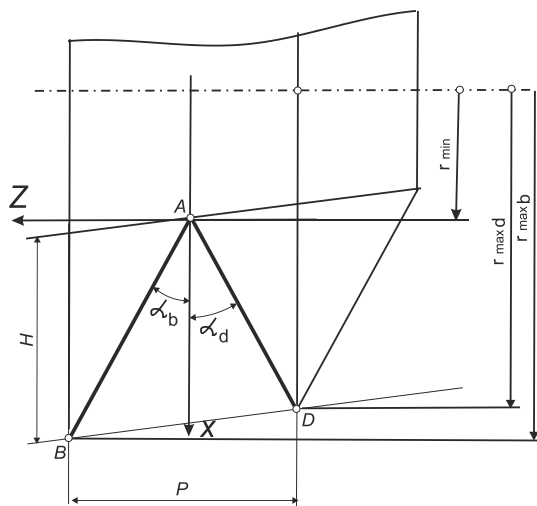


Рис. 8 – Схема для розрахунку величини половинного кута профілю отриманої нарізі.

Отже маючи таку схему розрахунку можемо застосувати формули для розрахунку половинних профільних кутів α_b і α_d замкової нарізі отриманої різцем із загальним положенням площини передньої поверхні (кути γ і λ не дорівнюють 0):

$$\alpha_b = \arctan \frac{z(r_{\max b})}{(r_{\max b} - r_{\min})}; (9)$$

$$\alpha_d = \arctan \frac{z(r_{\max d})}{(r_{\max d} - r_{\min})}, (10)$$

де $z(r_{\max b})$ це використане значення формули 3 при $x = r_{\max b}$, а $z(r_{\max d})$ це використане значення формули 1 при $x = r_{\max d}$:

$$r_{\min} = \frac{d_3}{2} + b - H + L \tan \varphi;$$

$$r_{\max d} = \frac{d_3}{2} + b + L \tan \varphi;$$

$$r_{\max b} = r_{\min} + H + P_b \tan \varphi,$$

де згідно з [4] та рисунком 1 застосовано такі умовні позначення:

H – висота вихідного профілю, φ – кут нахилу нарізі, f – зріз впадини, b – зріз вершини, d_3 – діаметр замкової нарізі на її торці.

L – відстань від торця до певного витка конічної замкової нарізі.

Визначення кроку отриманої нарізі. Крок визначається подачею на оберт, а у випадку із застосуванням повно профільних різців, а саме такі і домінують у виробництві нафтогазових труб залежить і від параметра P на різальній частині інструмента. Воче-

видь, якщо різець має одностороннє повно профільне виконання то для зовнішньої нарізі крок по впадинах відповідатиме подачі на оберт, а вершини формуватимуться різцем, а отже будуть зміщені відносно впадин на певні величини δ_b і δ_d , які можна визначити за такими формулами:

$$\delta_b = P_b(1 - \cos \lambda); (11)$$

$$\delta_d = P_d(1 + \cos \lambda). (12)$$

На рисунку 9 проілюстровано схему, яка пояснює вказані формули.

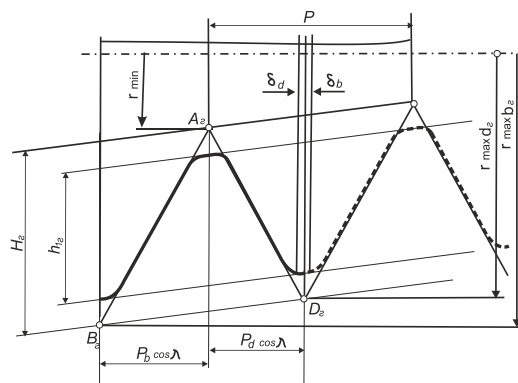


Рис. 9 – Схема для розрахунку неточності кроку та середнього діаметру отриманої нарізі.

Величина висоти вихідного профілю H внаслідок нахилу передньої площини різця на кут γ зміниться і стане меншою:

$$H_z = H \cos \gamma. (13)$$

В такий сам спосіб зміниться величина висоти профілю h_1 :

$$h_{1z} = h_1 \cos \gamma. (14)$$

Аналогічних змін зазнають висота профілю h , а також та середній діаметр d_{cp} .

Визначення величини половинного кута профілю отриманої нарізі із врахуванням імовірних величин зміщення установаження різальної частини різця.

На рисунку 10 показано схему для розрахунку залежності точності половинного кута від вертикального зміщення вершини різця.

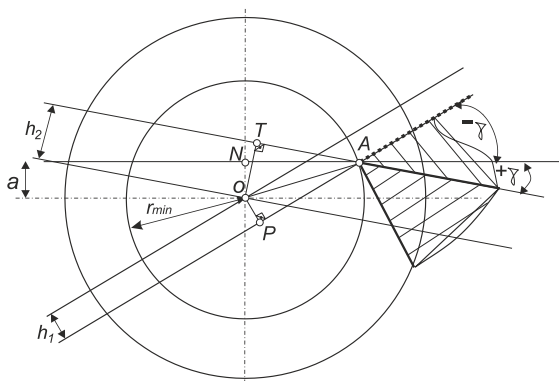


Рис. 10 – Схема для розрахунку неточності залежності точності половинного кута від вертикального зміщення вершини різця.

На вказаній схемі вершина різальної частини різця A зміщена відносно осової площини деталі з центром у точці O на величину a , що відповідає довжині відрізка NO . На схемі зображено два варіанти різальної частини – із додатним і від’ємним зміщенням переднього кута γ . У випадку додатного значення зміщення переднього кута площина передньої поверхні розміщена щодо осі деталі на відстані $-h_2$, якщо передній кут має від’ємне значення зміщення до аналогічної величини позначено як $-h_1$.

Зі схеми можна отримати такі вирази для визначення означених відстаней:

$$h_1 = r_{\min} \sin(\gamma - \arcsin(\frac{a}{r_{\min}}));$$

$$h_2 = r_{\min} \sin(\gamma + \arcsin(\frac{a}{r_{\min}}));$$

На основі цих рівнянь 15,16 враховуючи знак величини зміщення переднього кута можна запропонувати єдине рівняння:

$$h_{\text{зміщ}} = r_{\min} \sin(\gamma_{\text{зміщ}} + \arcsin(\frac{a}{r_{\min}}))$$

і на його основі створити формулу для розрахунку додаткового переднього кута, що є функцією вертикального зміщення і зміщення і неточності переднього кута:

$$\gamma_1 = \arcsin(\frac{h_{\text{зміщ}}}{r_{\min}}).$$

Відтепер формула 5 набуде такого вигляду:

$$\eta = \gamma + \gamma_1 + \mu,$$

Враховуючи, те що може бути зміщення не тільки $\gamma_{\text{зміщ}}$, але і аналогічне йому $\lambda_{\text{зміщ}}$ то величину μ у формулі 15 слід розраховувати не як функцію від λ , а як функцію $(\lambda + \lambda_{\text{зміщ}})$.

За аналогією формула 6 у випадку врахування вертикального і кутових зміщень набуде такого вигляду:

$$\eta_1 = \arcsin\left(\frac{\sin 30^\circ \sin(\lambda_{\text{зміщ}} + \lambda)}{\sqrt{1 - \sin^2 30^\circ \cos^2(\lambda_{\text{зміщ}} + \lambda)}}\right) - \gamma - \gamma_1$$

Проведення розрахунків. На основі запропонованої вище послідовності рівнянь створено програмний застосунок для отримання автоматизованого розрахунку величини половинних кутів профілю отриманої різцем конічної замкової нарізі. Оскільки усіх замкових нарізей за стандартом [4] є 27 і вони виконані за п’ятьма формами профілю і двома величинами конусності то у межах статті варто обмежитися трьома типорозмірами замкових нарізей, а саме:

- за найменшим діаметром, тобто нарізь 3-65;
- за найбільшим діаметром, тобто нарізь 3-203;
- нарізь 3-121, діаметр якої має середнє значення.

Величина переднього кута подається у діапазоні від 0° до $\pm 11^\circ$. В кожному разі найбільше значення переднього кута у кожній із семи таблиць узалежнено від максимального відхилення одного із половинних ку-

тів, яке дорівнює $30,5 \pm 0,05^\circ$ (Допуск на половинний кут профілю за стандартом [4] становить $\pm 0,5^\circ$).

Першою представлені розрахунки без врахування зміщень і тільки для нарізі 3-65

Замок 3-65

Діаметр більшої основи конуса $D_1 - 65,1$ мм

Крок – 6,35 мм

Висота вихідного профілю $H - 5,471$ мм

Конусність 1: 6

При відстані від торця - 0 мм, кут підйому нарізі, $\lambda = 2,61^\circ$.

Таблиця 1– Значення половинних профільних кутів замкової нарізі при різних значеннях статичного переднього кута у вершинній точці (Замок 3-65, відстань від торця - 0 мм, кут підйому нарізі, $\lambda = 2,61^\circ$)

Бікпро- філюча- різь	Значення статичного переднього кута γ° у вершинній точці							
	0	5	8	10	11	-5	-8	-10
AD	29,91	29,87	29,92	29,97	30,01	30,14	30,34	30,50
AB	29,93	30,08	30,25	30,40	30,48	29,90	29,96	30,03

У наступних таблицях усяди враховані зміщення, а саме:

Вертикальне 0,1 мм

Кутове, $\gamma^\circ 0,1^\circ$

Кутове, $\lambda^\circ 0,1^\circ$

Позначка * вказує на те, що розрахунок проведено при таких показниках зміщень:

Вертикальне 0,2 мм

Кутове, $\gamma^\circ 0,2^\circ$

Кутове, $\lambda^\circ 0,2^\circ$

Усі наступні розрахунки виконані для початкового витка, тобто за нульової відстані від торця і для останнього витка, тобто при максимальній відстані від торця нарізі. Це зроблено для того, щоб врахувати вплив на точність половинного кута профілю одночасно двох факторів: величини радіуса нарізі, яка зростає від торця до збігу нарізі і значення кута підйому, який зменшується у цьому ж напрямку.

Таблиця 2– Значення половинних профільних кутів замкової нарізі при різних значеннях статичного переднього кута у вершинній точці (Замок 3-65, відстань від торця - 0 мм, кут підйому нарізі, $\lambda = 2,61^\circ$)

Бікпро- філюча- різь	Значення статичного переднього кута γ° у вершинній точці									
	0	5	8	8*	10	11	-5	-8	-8*	-10
AD	29,92	29,87	29,92	29,92	29,98	30,02	30,16	30,37	30,40	30,54
AB	29,92	30,09	30,27	30,29	30,42	30,50	29,90	29,97	29,99	30,05

Таблиця 3 – Значення половинних профільних кутів замкової нарізі при різних значеннях статичного переднього кута у вершинній точці (Замок 3-65, відстань від торця – 60,13 мм, кут підйому нарізі, $\lambda=1,80^\circ$)

Бік профілю	Значення статичного переднього кута γ° у вершинній точці									
	0	5	8	8*	10	11	5	8	8*	-10
AD	29,94	29,92	29,98	29,99	30,05	30,10	30,16	30,36	30,38	30,52
AB	29,95	30,12	30,29	30,31	30,44	30,53	29,95	30,02	30,03	30,11

Замок 3-121

Діаметр більшої основи конуса D_1 – 121,71 мм

Крок – 5,08 мм

Висота вихідного профілю H – 5,471 мм

Конусність 1: 4

При відстані від торця – 0 мм, кут підйому нарізі, $\lambda=1,04^\circ$, при відстані від торця – 86,13 мм, кут підйому нарізі, $\lambda=0,7^\circ$.

Таблиця 4 – Значення половинних профільних кутів замкової нарізі при різних значеннях статичного переднього кута у вершинній точці (Замок 3-121, відстань від торця – 0 мм, кут підйому нарізі, $\lambda=1,04^\circ$)

Бік профілю	Значення статичного переднього кута γ° у вершинній точці										
	0	5	8	8*	10	11	5	8	8*	-10	-11
AD	29,95	29,99	30,09	30,10	30,20	30,26	30,11	30,29	30,31	30,44	30,53
AB	29,95	30,08	30,25	30,26	30,39	30,47	30,00	30,11	30,12	30,23	30,29

Таблиця 5 – Значення половинних профільних кутів замкової нарізі при різних значеннях статичного переднього кута у вершинній точці (Замок 3-121, відстань від торця – 86,13 мм, кут підйому нарізі, $\lambda=0,7^\circ$)

Бік профілю	Значення статичного переднього кута γ° у вершинній точці										
	0	5	8	8*	10	11	5	8	8*	-10	-11
AD	29,96	30,00	30,12	30,12	30,23	30,29	30,11	30,28	30,29	30,43	30,51
AB	29,96	30,09	30,25	30,26	30,39	30,47	30,01	30,13	30,13	30,24	30,31

Замок 3-203

Діаметр більшої основи конуса D_1 – 203,20 мм

Крок – 6,35 мм

Висота вихідного профілю H – 5,471 мм

Конусність 1: 4

При відстані від торця – 0 мм, кут підйому нарізі, $\lambda=0,75^\circ$, при відстані від торця – 149,1 мм, кут підйому нарізі, $\lambda=0,51^\circ$.

Таблиця 6 – Значення половинних профільних кутів замкової нарізі при різних значеннях статичного переднього кута у вершинній точці (Замок 3-203, відстань від торця – 0 мм, кут підйому нарізі, $\lambda=0,75^\circ$)

Бік профілю	Значення статичного переднього кута γ° у вершинній точці										
	0	5	8	8*	10	11	5	8	8*	-10	-11
AD	29,95	30,00	30,12	30,13	30,23	30,30	30,09	30,26	30,28	30,41	30,50
AB	29,97	30,09	30,25	30,26	30,39	30,48	30,03	30,16	30,17	30,27	30,34

Таблиця 7 – Значення половинних профільних кутів замкової нарізі при різних значеннях статичного переднього кута у вершинній точці (Замок 3-203, відстань від торця – 149,1 мм, кут підйому нарізі, $\lambda=0,51^\circ$)

Бік профілю	Значення статичного переднього кута γ° у вершинній точці										
	0	5	8	8*	10	11	5	8	8*	-10	-11
AD	29,95	30,01	30,13	30,14	30,25	30,32	30,09	30,25	30,26	30,40	30,49
AB	29,98	30,09	30,25	30,26	30,39	30,48	30,04	30,17	30,17	30,29	30,36

Висновки.

1. Теоретичний розрахунок величин половинних кутів осевого профілю отриманих конічних нарізей ліг в основу програмного алгоритму, що уможливило здійснити аналіз залежності величин вказаних кутів від величини переднього кута різця та кута підйому нарізі.

2. Величини лівого і правого половинного кута конічної замкової нарізі сильно відрізняються між собою в міру збільшення величини переднього кута різця.

3. Величина половинного кута із коротшого боку (AD) в діапазоні додатних значень переднього кута зростає повільніше ніж величина половинного кута з довшого боку (AB).

4. Величина половинного кута із довшого боку (AB) в діапазоні від'ємних значень переднього кута зростає повільніше ніж величина половинного кута з довшого боку (AD).

5. Величина половинних кутів досягає максимально допустимих значень при значеннях переднього кута $\pm 11^\circ$, а в окремих випадках при $\pm 10^\circ$.

6. Відмінність між величинами половинних кутів при мінімальній і максимальній величині підйому

нарізі є не дуже суттєвою бо становить для всіх замкових нарізей 0,01-0,02°.

7. Тангенціальне зміщення величиною 0,1 мм вкупі із неточністю переднього кута і кута нахилу різальної кромки величиною 0,1° спонукає до збільшення половинного кута профілю нарізі на 0,01-0,02°.

8. Величина відхилу половинного кута профілю не перевищує 0,16°, якщо величина статичного переднього кута у вершинній точці лежить у межах від -5° до 5°.

У подальших дослідженнях, варто зосередитися на таких аспектах аналізу точності профілю замкової нарізі:

- більш детальному розгляді впливу величини переднього кута на величину половинного кута профілю у діапазоні 5–9°;

- створенні програмного застосунку з використанням формул 11,12,13,14 для числового аналізу впливу переднього кута на зміну кроку і робочої висоти профілю замкової нарізі;

- створення теоретичного алгоритму для аналізу точності профілю замкової нарізі із застосуванням представленого у статті алгоритму вкупі із впливовими технологічними параметрами нарізоточіння.

Список литературы

1. 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
2. Thread_turning/thread_turning_brochure_english.pdf. [Electronic resource]://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Turning/. -Last access: 2017. – Title from the screen
3. Фомин Е. В. Повышение стойкости и точности резьбовых резцов на основе моделирования процесса резьбонарезания [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 Фомин Евгений Владимирович – М., 2007. – 206 с. – Библиогр.: с. 194–202.
4. ГОСТ 28487-90. Межгосударственный стандарт. Резьба коническая замковая для элементов буровых колонн. Профиль. Размеры. Допуски (с Изменением N 1 [Текст]. Утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 05.06.80 № 2578. М.: «Стандартинформ», 2010. – 75с.
5. Онисько О.Р. Визначення профілю різальної частини різця з подвійним нахилом передньої поверхні для формування трикутної різби труб нафтогазового сортаменту. [Текст] / О.Р.Онисько, В.П.Патра, Б.Я.Прийбуш // Нафтогазова енергетика.— 2015.—2(24).— С. 77–81
6. Онисько О.Р.Порівняльний аналіз графічних моделей бічних профілів трикутної різби: заданого стандартом і отриманого за допомогою різця з ненульовим значенням переднього кута. [Текст]/О.Р.Онисько, П. М. Процак//Вісник НТУ «ХПІ».–2015.– №4 (1113), С.31–36.

7. Онисько О.Р. Про технологічну неможливість відтворення теоретично точного профілю гвинтової різби токарним різцем[Текст] / О.Р.Онисько // Вісник ЖДТУ. Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Збірник наукових праць.— 2015.—15.—С. 87–100.
8. Онисько О.Р. Моделювання бічного профілю різальної кромки у залежності від геометричних параметрів різців призначених для виготовлення замкової нарізі/ О. Р. Онисько, // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 50–53. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079- 004X

References (transliterated)

1. 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
2. Thread_turning/thread_turning_brochure_english.pdf. [Electronic resource]://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Turning/. -Last access: 2017. – Title from the screen
3. Fomyn E. V. Povyshenye stoykosty y tochnosty rez'bovykh reztsov na osnove modelirovaniya protsessa rez'bonarezaniya [Increased durability and precision thread cutting tools based on simulation threading processio. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Moskow, 2007. 206 p.
4. GOST 28487-90. Mezhhosudarstvennyy standart. Rez'ba konicheskaya zamkovaya dlya elementov burylnykh kolonn. Profyl'. Razmery. Dopusky (s Yzmeneniyem N 1 [Interstate standards. Conical thread lock for drill string elements. Profile. Dimensions. Tolerances]. Moscow. Standartynform Publ., 2010. 75p.
5. Onys'ko O.R., Patra V.I., B.Ya. Prybush. Vyznachennya profilu ryzal'noyi chastyny ryztsya z podvynym nakhylom predn'oyi pov'erkhni dlya formuvannya trykutnoyi ryz'by trub naftohazovoho sortamentu. [Determining the profile of the cutting tool with dual tilt the front surface to form a triangular thread of the oil and gas pipes assortment] . Naftohazova enerhetyka.Publ., 2015., no. 2(24). pp. 77–81.
6. Onys'ko O.R., Protsak P. M. Porivnyal'nyy analiz hrafichnykh modeley bichnykh profiliv trykutnoyi ryz'by: zadanoho standartom i otrymanoho za dopomohoyu ryztsya z nenul'ovym znachenniyam predn'oho kuta.[Comparative analysis of graphical models side triangular thread profiles: standard and set obtained using a cutter with a non-zero value of the front corner]. Visnyk NTU «KhPI», Publ., 2015., no. 4 (1113), pp. 31–36.
7. Onys'ko O.R. Pro tekhnolohichnu nemozhlyvist' vidtvorennya teoretichno tochnoho profilu hvyntovoyi ryz'by tokarnym ryztsem [About the technological impossibility of playing theoretically exact profile screw thread turning tools] Visnyk ZhDTU. Protsey mekhanichnoyi obrobky v mashynobuduvanni: Zbirnyk naukovykh prats'— 2015.—15.—S. 87–100.
8. Onys'ko O.R. Modelyuvannya bichnoho profilu ryzal'noyi kromky u zalezhnosti vid heometrychnykh parametriv ryztsiv pryznachenykh dlya vyhotovlennya zamkovoyi narizi [Modeling the side profile of cutting edge depending on the geometrical parameters of cutting tools for the manufacture of the tool –joint tapered thread] Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnolohiyi u mashynobuduvanni. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2016. – № 33 (1205). – S. 50–53.

Поступила (received) 19.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз забезпечення точності профілю замкової нарізі виготовленої різцями із загальним положенням передньої поверхні та заданої точністю її встановлення / О.Р.Онисько, М.І.Псюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 10–17. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0023.

Анализ обеспечения точности профиля замковой резьбы изготовленной резцами с общим положением передней поверхности и заданной точностью ее установки / О.Р.Онисько, М.И.Псюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 10–17. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0023.

Analysis to ensure the accuracy of the tool-joint tapered thread profile manufactured by lathe tool with tool face general provisions and set accuracy of installation / O. Onysko, M. Psiuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series:

Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17(1239). – P. 10–17. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Онисько Олег Романович — канд. тех. наук, ІФНТУНГ, доцент кафедри компютеризованого машинобудівного виробництва м. Івано-Франківськ; тел.: 0954885401, e-mail: onysko.oleg@gmail.com;

Онисько Олег Романович — канд. тех. наук, ІФНТУНГ, доцент кафедри компютеризованого машинобудівного виробництва м. Івано-Франківськ; тел. 0954885401, e-mail: onysko.oleg@gmail.com;

Onysko Oleh Romanovych — Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Associate Professor at the Department of computerized machine manufacture; tel.: 0954885401, e-mail: onysko.oleg@gmail.com;

Псюк Микола Іванович – аспірант, ІФНТУНГ кафедра компютеризованого машинобудівного виробництва м. Івано-Франківськ; тел.: 0953404816, e-mail: nick.psiuk@gmail.com;

Псюк Николай Иванович – аспірант, ІФНТУНГ, аспірант кафедри компютеризованого машинобудівного виробництва м. Івано-Франківськ; тел.: 0953404816, e-mail: nick.psiuk@gmail.com;

Psiuk Mykola Ivanovych – postgraduate, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Associate Professor at the Department of computerized machine manufacture; tel.: 0953404816, e-mail: nick.psiuk@gmail.com.

УДК 621.923.9

А. О. ГНАТЮК

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ТОЧНОСТІ ПРИ ШЛІФУВАННІ ПРОФІЛЮ ЦІВКОВОГО КОЛЕСА ГЕРОТОРНОЇ ПАРИ В УМОВАХ ПЛАНЕТАРНОГО ОБКАТУ

В роботі представлено дослідження залежності параметрів точності внутрішнього профілю цівкового колеса героторної пари від технологічних факторів, отриманих в ході реалізації методу шліфування колеса в умовах планетарного обкату. Обробка здійснювалась абразивними інструментами з різною формою профілю. Залежність отримана у вигляді поліноміальної моделі, в ході здійснення програми ротатбельного плану другого порядку. У відповідності з отриманими моделями, побудовані поверхні відгуку, локалізовані області оптимуму, в яких досягається найменше значення відхилень. Експериментально визначена стійкість інструментів, розроблені рекомендації щодо застосування різних типів геометрії профілю інструментів. За отриманими показниками обробки, зроблено висновок щодо прийнятності впровадження методу шліфування у виробництво. Створено передумови конструктивної реалізації методу обробки на універсальному технологічному обладнанні.

Ключові слова: цівкове колесо, героторна пара, метод шліфування, планетарний обкат, точність.

В работе представлено исследование зависимости параметров точности внутреннего профиля цевочного колеса героторной пары от технологических факторов, полученных в ходе реализации метода шлифования колеса в условиях планетарной обкатки. Обработка осуществлялась абразивными инструментами с разной формой профиля. Зависимость получена в виде полиномиальной модели, в ходе осуществления программы ротатбельного плана второго порядка. В соответствии полученным моделям, построены поверхности отклика, локализованные области оптимума, в которых достигается наименьшее значение отклонений. Экспериментально определена стойкость инструментов, разработаны рекомендации по применению различных типов геометрии профиля инструментов. По полученным показателям обработки, сделан вывод о приемлемости внедрения метода шлифования в производство. Созданы предпосылки конструктивной реализации метода обработки на универсальном технологическом оборудовании.

Ключевые слова: цевочное колесо, героторная пара, метод шлифования, планетарный обкат, точность.

The paper presents research correlation of precision parameter of internal profile in bobbin wheel of gerotor, from technological factors, obtained in the course of gear generating grinding method. Grinding was carried out using abrasive tools with a different shape of the profile. Correlation was obtained in the form of a polynomial model, of second order rotatable plan program. According obtained models, was constructed response surface, localized optimum area in which is reached the lowest value deviations. Experimentally determined resistance of tools, developed recommendations for the use of different types of tool profile geometry. According to figures obtained by processing the conclusion of the admissibility of the introduction in manufacturing of the grinding method. Created the preconditions of constructive implementation of the processing method on the universal process equipment.

Keywords: bobbin wheel, gerotor, grinding method, planetary gear generation, precision.

Вступ. Зачеплення героторної пари на сьогоднішній день знайшло широке застосування в різних гідравлічних машинах – насосах, героторних гідромоторах, насосах-дозаторах, а також машинах і механізмах, де необхідно досягти високих передаточних відношень. Зачеплення утворюють два колеса – внутрішній сателіт із зовнішнім зубчатим вінцем і зовнішнє цівкове колесо із внутрішнім зубчатим вінцем і кількістю зубців на один більше, ніж у сателіта. Зубчатий профіль сателіта окреслений еквідистантою до вкороченої епіциклоїди [9], профіль цівкового колеса окреслений масивом дуг постійного радіусу (цівками). Зубчатий профіль сателіта є більш технологічний у виготовленні, оскільки не перешкоджає доступу різального інструменту. Внутрішній профіль цівкового колеса є менш технологічний, має місце ускладнений доступ різального інструменту до оброблюваної поверхні. Розміри інструменту обмежені діаметром внутрішнього профілю, що впливає на його жорсткість. Враховуючи високу точність виготовлення робочих профільних поверхонь коліс, актуальними є розробки і дослідження методів кінцевої фінішної обробки нетехнологічного профілю цівкового колеса. Бажано щоб обробка здійснювалась в умовах обкату, при якому досягаються найбільш висока точність і ефективність зубообробки.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз патентної та науково-технічної літератури показує, що для обробки внутрішнього профілю цівкового колеса, який окреслений цівками постійного радіусу або обвідною

сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд, існує ряд специфічних методів і засобів для їх здійснення [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Для реалізації деяких з них застосовується дуже дорогі спеціалізовані верстати, для ряду інших – спеціальний складний інструмент та оснастка. Окрім лезової та абразивної обробки, існують методи вирізання на електроерозійних верстатах та спікання з порошкових матеріалів. Порошкова металургія посіла провідне місце у світовому обсязі виробництва коліс героторної пари. Водночас такий метод має суттєві недоліки, а саме:

- точність деталей лежить в межах 12-9 квалітету (за умови повторного пресування в калібруючих прес-формах);

- низька гнучкість методу, недоцільність його застосування в серійному виробництві.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. При високій твердості деталі (близько 60 HRC), частина з відомих методів виявляється непридатною для застосування. Сюди відносяться методи зубодовбання багатозубими і однозубими довбачами [6, 8]. Відсутні методи обробки, які б відрізнялись простотою інструменту, його відносною дешевизною, з можливістю швидкого відновлення ріжучих властивостей. Також серед розглянутих методів обробки практично відсутня інформація щодо оціночних показників (точність, шорсткість), які досягаються при здійсненні того чи іншого методу. Для удосконалення процесу фінішної обробки цівкового колеса героторної пари, розроблена альтернативна

© О.А. Гнатюк, 2017

прогресивна схема шліфування його внутрішнього профілю, в умовах планетарного обкату [9].

Метою даної статті є дослідження показників точності профілю цівкового колеса, отриманих після шліфування в умовах планетарного обкату. Отримані в ході дослідження дані, дозволять зробити висновок про доцільність впровадження методу шліфування [9] у виробництво.

Викладення основного матеріалу дослідження. Сутність обробки профілю цівкового колеса, описаного в патенті [9], пояснюється рис. 1, де схематично зображено зачеплення коліс 1 і 2. На цій же схемі представлений один із варіантів здійснення цівковим колесом руху обкату. Для забезпечення такого руху, центроїда 4 радіусом R , яка жорстко пов'язана із колесом 2, обкатується без ковзання по зовнішній стороні центроїди 3 радіусом r , яка пов'язана із нерухомим сателітом 1. В процесі обкату, центр центроїди 4 описує колову траєкторію 5. Швидкість обкату задається вхідною частотою ($n_{\text{вх}}$) обертання центру центроїди колеса по коловій траєкторії, відносно центру нерухомої центроїди. Одночасно колесо 2 здійснює обертальний рух навколо миттєвої вісі з частотою $n_{\text{вих}}$, яка пов'язана із частотою $n_{\text{вх}}$ співвідношенням:

$$n_{\text{вих}} = n_{\text{вх}} / z_2. \quad (1)$$

де z_2 – число зубців цівкового колеса, $z_2 = z_1 + 1$;

z_1 – число зубців сателіта.

Під час обробки, сателіт замінюється ріжучим інструментом, який утворює з оброблюваним профілем колеса 2 верстатне зачеплення. На цій же схемі представлені основні конструктивні параметри для побудови зачеплення – радіуси центроїдів, ексцентриситет зачеплення e , радіус центрів цівки $R_{\text{цв}}$, радіус цівки $r_{\text{ц}}$.

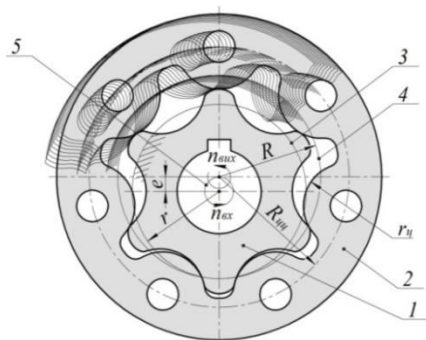


Рис. 1 – Схема обкату цівкового колеса навколо нерухомого сателіту: 1 – сателіт; 2 – цівкове колесо; 3 – центроїда сателіта; 4 – центроїда цівкового колеса; 5 – траєкторія, описана центром колеса в процесі обкату

Необхідною умовою обкату є дотримання наступного співвідношення:

$$r/R = e \cdot z_1 / e \cdot z_2 \quad (2)$$

Реалізувати представлену на рис. 1 схему, можливо за допомогою спеціальних пристосувань [1, 5], або на верстаті з ЧПУ, поєднавши колову інтерполяцію і обертання колеса навколо програмованої вісі С. Майбутньому інструменту для здійснення процесу

формоутворення, необхідно частково або повністю надати елементи геометрії спряженого взаємоогинаємого профілю. Такими елементами можуть бути випуклі та увігнуті ділянки профілю сателіту.

Принцип проектування інструментів і фрагмент оснастки для здійснення методу шліфування [9], представлені на рис. 2.

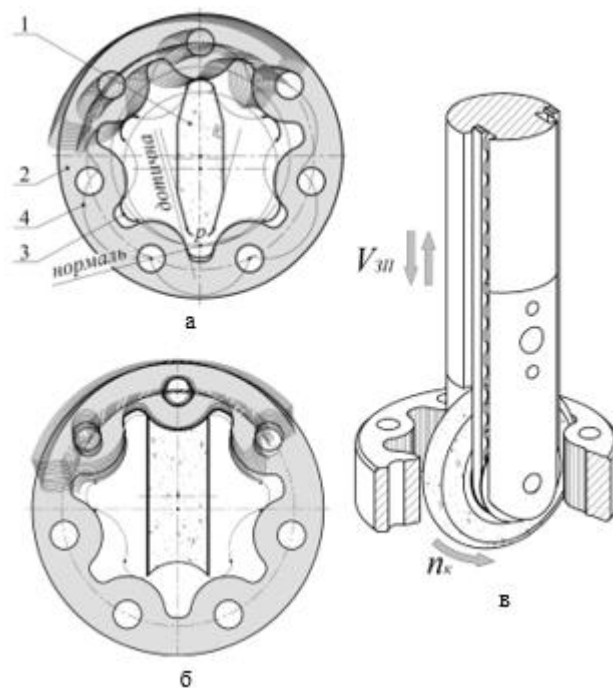


Рис. 2 – Шліфувальні круги для здійснення обробки цівкового колеса в умовах планетарного обкату: а – круг з випуклою формою профілю; б – круг з увігнутою формою профілю; в – круг встановлений в оправці і рухи для здійснення процесу шліфування

Для профілювання круга 1 з випуклою формою профілю (див. рис. 2, а), використовується ділянка еквідистанти 4 до епіциклоїди 3, яка обмежена двома сусідніми точками контакту з цівковим колесом 2. При цьому полюс зачеплення центроїдів p , лежить на вертикальній вісі симетрії і через нього проходить спільна нормаль до епіциклоїди 3 і її еквідистанти 4.

Увігнута ділянка (див. рис. 2, б), утворюється відтинанням випуклих ділянок, що використовуються в попередній схемі на рис. 2, а. В кінцевих точках увігнутого профілю, необхідно виконати округлення, із-за низької стійкості гострих абразивних кромки.

Для здійснення процесу шліфування, інструменту необхідно надати обертання з частотою n_k і зворотно-поступальні рухи паралельно оброблюваній поверхні, зі швидкістю $V_{\text{шп}}$. Для цього необхідна спеціальна оснастка – оправка, в яку встановлюється шліфувальний круг (рис 2, в). Шліфувальний круг встановлюється на вісь, яка має зубчатий шків. Обертання на цей шків передається від окремого привода через пасову зубату передачу. Вісь із кругом в свою чергу встановлюються в корпусі оправки, який кріпиться до інших елементів верстату.

Опис обладнання та оснастки для проведення експериментальних досліджень. Для здійснення

схеми шліфування [9] в реальних виробничих умовах, була розроблена та виготовлена спеціальна оснастка, адаптована до вертикального фрезерного оброблювального центру моделі BMV-850 MILLSTAR (Тайвань) з ПЧПУ FANUC, представленого на рис. 3. Оснастка включає в себе пристосування для профільного шліфування внутрішніх поверхонь і пристосування для надання цівковому колесу руху обкату. Перше пристосування кріпиться до пінолі шпинделя обробного центру, друге встановлюється на його двокоординатному столі. Обидва пристосування мають власні приводи з можливістю регулювання частот.



Рис. 3 – Обробний центр з ЧПУ моделі BMV-850 MILLSTAR, оснащений пристосуванням для профільного шліфування внутрішніх поверхонь і пристосуванням для відтворення руху обкату

Пристосування для профільного шліфування внутрішніх поверхонь (див. рис. 4) включає в себе привід 1 (MF 907079 Hauser) в чавунному корпусі, оправку 2, із закріпленням на ній шліфувальним кругом 3. Оправка базується в посадковий отвір в корпусі привода. Корпус привода має фланець, на якому розміщені кріпильні отвори. За допомогою цього фланцю, привід разом із оправкою, жорстко приєднується до елементів ОЦ через адаптер 4, який базується на циліндричну частину пінолі і кріпиться до її фланцю.

Пристосування для надання цівковому колесу руху обкату (див. рис. 4) включає в себе планетарний редуктор внутрішнього зачеплення 5, який встановлюється на поворотний стіл 6 (мод. РКВ 7205-4003). Поворотний стіл базується на плиті 7, яка має змогу повертатись в незакріпленому стані навколо вісі поворотного стола для здійснення наладки. Також на плиті встановлений мотор-редуктор 8 (універсальний колекторний електродвигун УВ-061-М64, поєднаний з черв'ячним редуктором) та зубчаста передача 9 ($z=11/z=35$). Передача крутного моменту між мотор-редуктором, зубчастою передачею і поворотним столом відбувається через муфти 10.

Більш детально принцип роботи пристосування для відтворення руху обкату пояснюється кінематичною схемою, яка представлена на рис. 5. Від мотор-редуктора 1, обертовий рух передається до зубчатої пари 2 і далі на черв'як 3, який приводе в рух черв'ячне колесо 4.



Рис. 4 – Загальний вигляд оснастки для здійснення розробленого методу шліфування цівкового колеса ГП в реальних умовах: 1 – привід шліфувального круга Hauser MF 907079; 2 – оправка; 3 – шліфувальний круг; 4 – адаптер; 5 – пристосування для відтворення руху обкату; 6 – поворотний стіл РКВ 7205-4003; 7 – плита рухома; 8 – привід руху обкату УВ-061-М64; 9 – зубчата передача; 10 – муфти

Черв'ячна пара знаходиться в корпусі 5 поворотного стола. Обертання черв'ячного колеса приводить до обертання корпусу 6 планетарного редуктора. В середині корпусу 6 розміщена передача внутрішнього зачеплення, яку утворюють колесо 7 і обойма 8 із внутрішнім зубчатим вінцем.

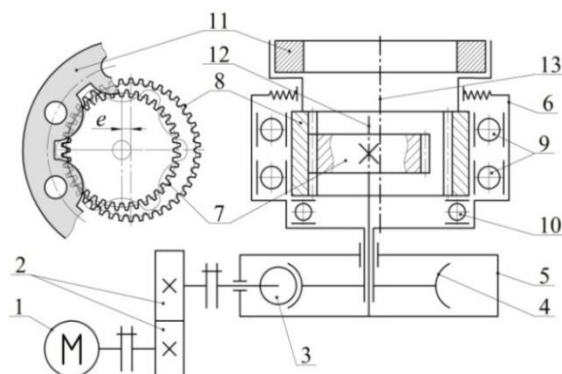


Рис. 5. Кінематична схема пристосування для відтворення руху обкату: 1 – мотор-редуктор; 2 – зубчата передача ($z=11/z=35$); 3 – черв'як, 4 – черв'ячне колесо; 5 – корпус поворотного стола; 6 – еквівалентне колесо, що імітує сателіт; 8 – обойма із внутрішнім зачепленням; 9 – радіальні підшипники; 10 – упорний підшипник; 11 – оброблюване цівкове колесо; 12 – вісь обертання стола (вісь обкату); 13 – миттєва вісь обертання цівкового колеса

Зачеплення колеса 7 і обойми 8 є еквівалентним зачепленню героторної пари і має теж саме передавальне відношення. Колесо 7 пов'язане із корпусом 6

поворотного столу і повністю нерухоме. Обойма 8 має змогу обертатись за рахунок двох радіальних підшипників 9 і одного упорного 10, які знаходяться в корпусі 6. Обойма 8 жорстко пов'язана із оброблюваним цівковим колесом 11. Відповідно, в процесі роботи, колесо 11 отримує від обойми 8 рух по коловій траєкторії, навколо вісі 12 і обертання навколо ексцентрично розташованої миттєвої вісі 13, яка одночасно є геометричною віссю корпусу 6. Відстань між осями 13 і 14 рівна ексцентриситету героторної пари.

Оправка для встановлення шліфувального круга являє собою окремий вузол, представлений на рис 6, який складається з корпусу 1, притискної планки 2, перехідного вкладиша 3. Шліфувальний круг базується на вісь 4, яка разом із зубчатим шківом являє собою єдину конструкцію. На валу електродвигуна, в порожнині його корпусу, встановлений зубчатий шків, від якого через зубчатий пас, оберти надаються шківу вісі 4. Круг притискається гайкою 5, яка додатково фіксується гвинтом 6, для запобігання послаблення сили затиску. В порожнині шківа розміщено дві пари радіально-упорних підшипників 7. Між ними розміщується опорний валик 8, кінці якого частково базуються у внутрішніх обоймах підшипників. Одночасно торці обойм упираються в опорні торці валика. В корпусі і притискній планці містяться отвори, в які запресовані шипи 9, на конічні поверхні яких базуються внутрішні обойми підшипників 7. Притискна планка 2 кріпиться до корпусу за допомогою двох штифтів 10 і гвинта 11. При цьому створюється натяг для точного центрування круга відносно вісі шипів і уникнення зазорів. В залежності від ширини круга, змінний перехідний вкладиш 3 може мати різну товщину.

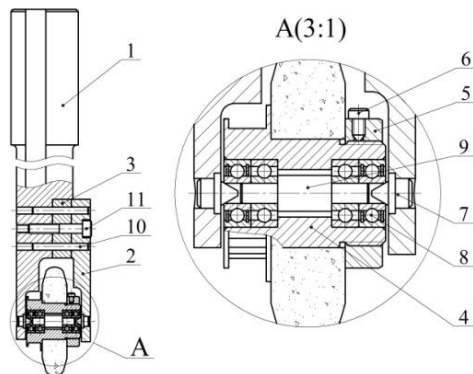


Рис. 6 – Конструктивне виконання оправки зі встановленим шліфувальним кругом

Для виготовлення інструментів, були використані дискові круги з прямим профілем, з послідовною правкою алмазним олівцем на профіleshліфувальному оптичному верстаті 395МФ10. Робочі характеристики кругів приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Робочі характеристики шліфувальних кругів

Характеристика	Позначення згідно стандарту
Абразивний матеріал	14А Електрокорунд нормальний ГОСТ 2424-83
Зернистість	F120-F150 ГОСТ Р 52381-2005
Твердість круга	Р (СТ-2) ГОСТ Р 52587-2006
Структура	Щільна (4) ГОСТ 2424-83
Зв'язка	Керамічна (K5)

Планування та здійснення експерименту. Для проведення експериментальних досліджень був обраний ротатбельний центральний композиційний план другого порядку [10], який включає в себе повний факторний експеримент з 8ми дослідів та додаткові досліді в зіркових точках (6 дослідів) і в центрі плану (6 дослідів). Загальна кількість дослідів складає 20. Рівні та інтервали варіювання факторів зведені до таблиці 2. Матриця ротатбельного плану наведена в таблиці 3. Параметр оптимізації – точність форми цівкового колеса δf . Матриця планування експерименту для обробки різними інструментами залишатиметься однаковою.

Фактори, вплив яких досліджувався ході проведення експерименту – три основні керовані режими обробки – вхідна частота обкату ($n_{вх}$), швидкість зворотно-поступального руху (осциляції) інструменту ($V_{зп}$) і частота обертання круга (n_k).

Таблиця 2 – Рівні та інтервали варіювання факторів

Найменування фактору	Позначення	Кодовані рівні факторів				
		0	+1	−1	Зіркові точки	
					+1,682	−1,682
					Натуральний масштаб	
Вхідна частота обкату (X_1)	$n_{\text{вх}}$ (хв ^{−1})	1,5	2	1	2,34	0,66
Швидкість зворотно-поступального руху (X_2)	$V_{\text{зп}}$ (п.х./хв)	60	80	40	93,63	26,36
Частота обертання круга (X_3)	$n_{\text{к}}$ (хв ^{−1})	800 0	9000	7000	9681,8	6318,2

Таблиця 3 – Матриця ротатбельного плану

№	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1
4	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
5	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
7	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
9	+1	-1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0	0
10	+1	+1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0	0
11	+1	0	-1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0
12	+1	0	+1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0
13	+1	0	0	-1,68	0	0	+2,83	0	0	0
14	+1	0	0	+1,68	0	0	+2,83	0	0	0
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Зміна частоти обертання мотор-редуктора і як наслідок частоти $n_{вх}$, здійснювалось за допомогою лабораторного автотрансформатора ЛАТР-1М (220В, 9А), шляхом плавної зміни живлячої напруги. Точне

значення частоти обертання на валу мотор-редуктора встановлювалось за допомогою оптичного тахометру DT-2234C. Значення швидкості зворотно-поступальних рухів інструменту $V_{зп}$, задавалось управляючою програмою, за допомогою функції робочих переміщень F. Зміна частоти обертання круга, здійснювалась за допомогою частотного перетворювача Danfoss VLT AQUA Drive FC202.

Попередня обробка внутрішнього профілю – фрезерування, з послідовним загартуванням заготовок до 60...62 HRC. Матеріал заготовок – сталь ШХ15 ГОСТ 801-78. Припуск на радіус цівки – 0,1...0,15 мм. Параметри цівкового колеса, що підлягають контролю, приведені на рис. 7.

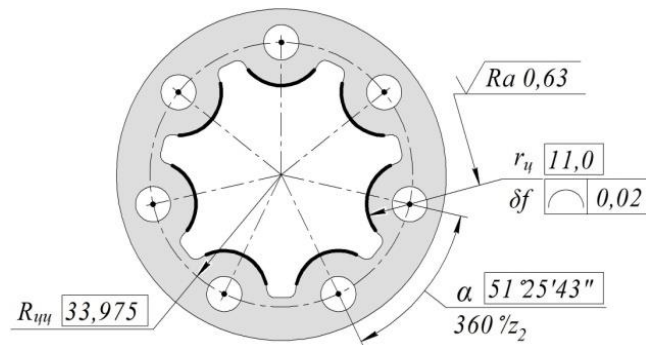
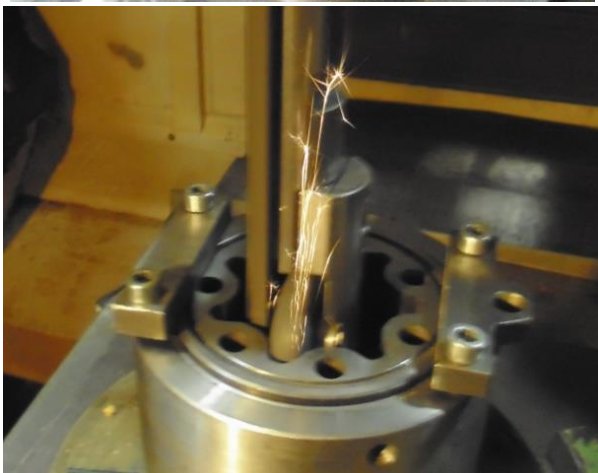


Рис. 7 – Контрольовані параметри цівкового колеса

Фрагменти шліфування цівкового колеса в реальних виробничих умовах представлені на рис.8.



а



б

Рис. 8 – Процес шліфування внутрішнього профілю цівкового колеса в умовах планетарного обкату: а – кругом з випуклою формою профілю; б – кругом з увігнутою формою профілю

Точність форми профілю вимірювалась на координатно-вимірювальній машині Contura G2 CARL ZEISS (див. рис. 9) по 10ти точкам уздовж активної (задіяної в роботі) ділянки дуги цівки і враховує параметри r_{ψ} , $R_{\psi\psi}$, α .



Рис. 9 – Вимірювання параметрів цівкового колеса на координатно-вимірювальній машині Contura G2 (Carl Zeiss)

Статистична обробка отриманих даних. За отриманими в ході експериментів значеннями, були побудовані гістограми розсіювання величини

відхилення форми заданого профілю δf , при обробці кругами з випуклою та увігнутою формою профілів (рис. 10)

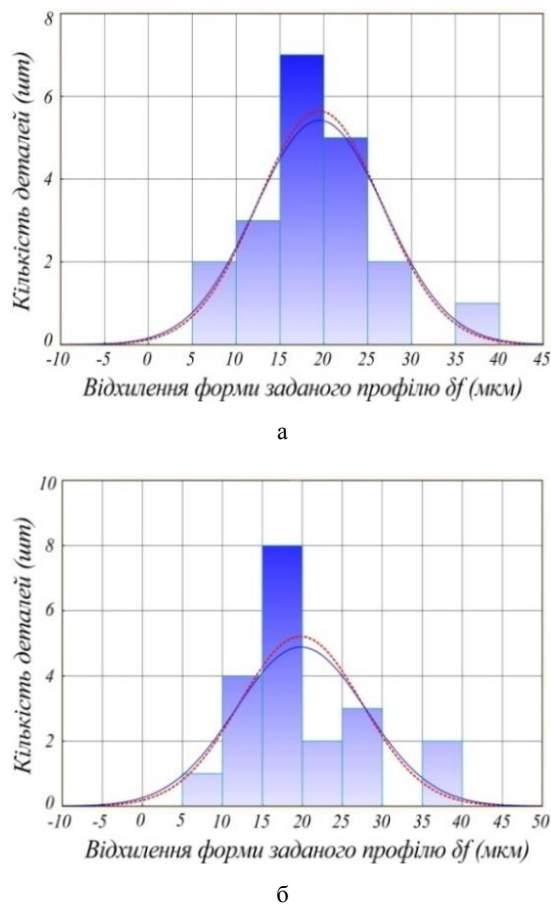


Рис. 10 – Вимірювання параметрів цівкового колеса на координатно-вимірній машині Contura G2 (Carl Zeiss): а, б – залежності щодо вимірюваного профілю

Аналіз гістограм показує, що зміна технологічних факторів в заданих межах має суттєвий вплив на величину поля розсіювання показників точності. Так, при обробці кругом з випуклим профілем, поле розсіювання параметру δf знаходиться в межах 6,5...35,9 мкм, а при обробці увігнутим профілем – 5,7...38,3 мкм.

В результаті розрахунку коефіцієнтів регресій, отримані математичні моделі (ММ) впливу технологічних факторів на параметр оптимізації δf , у вигляді поліномів другого порядку:

- ММ відхилення δf при обробці кругом з випуклою формою профілю:

$$Y_1 = 19,083 + 6,019 \cdot X_1 + 3,484 \cdot X_2 - 3,026 \cdot X_3 + 1,464 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,113 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,163 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,19 \cdot X_1^2 + 1,412 \cdot X_2^2 + 0,403 \cdot X_3^2 \quad (3)$$

- ММ відхилення δf при обробці кругом з увігнутою формою профілю:

$$Y_2 = 18,748 + 4,684 \cdot X_1 + 5,674 \cdot X_2 - 2,77 \cdot X_3 + 1,101 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,575 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,576 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,661 \cdot X_1^2 + 2,625 \cdot X_2^2 - 1,197 \cdot X_3^2 \quad (4)$$

По результатам перевірки моделей за критерієм значимості, були побудовані діаграми Парето (див. рис. 11), які відображають ступінь впливовості факторів та їх взаємодій, на параметр δf .

По результатам перевірки моделей за критерієм значимості, були побудовані діаграми Парето (див. рис. 11), які відображають ступінь впливовості факторів та їх взаємодій, на параметр δf .

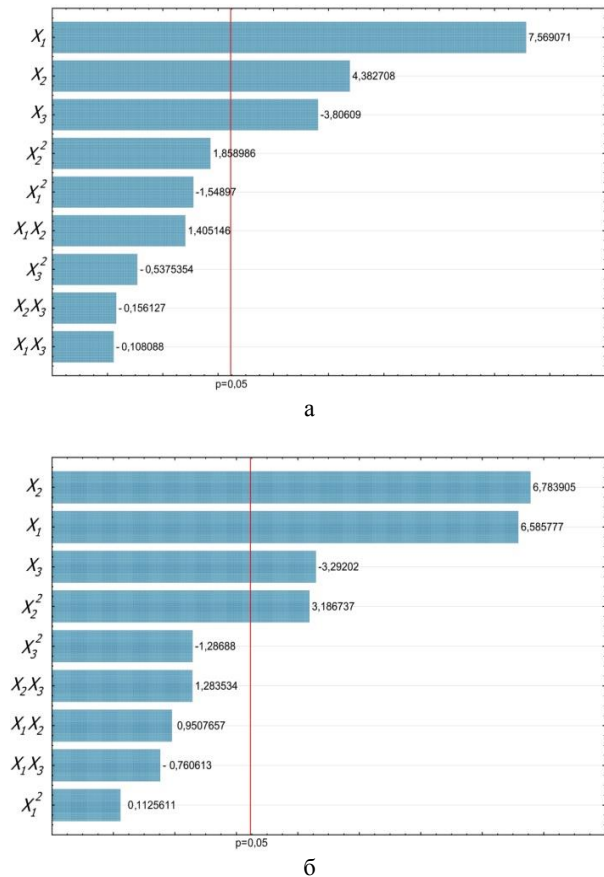


Рис. 11 – Діаграми Парето впливу факторів та їх комбінацій на величину δf : а – при обробці кругом з випуклою формою профілю; б – при обробці кругом з увігнутою формою профілю

Діаграми Парето на рис. 10, а, вказують на найбільшу значимість вхідної частоти n_{ex} . Другорядними по значимості є швидкість зворотно-поступальних рухів $V_{зп}$ і частота обертання круга n_k . При обробці кругом з увігнутою формою профілю, більш вагомою виявилась швидкість $V_{зп}$ (рис. 10, б). Усі без винятку ММ містять не значимі коефіцієнти при квадратичних членах X_i^2 , що вказує на необхідність перерахунку коефіцієнта b_0 за правилом найменших квадратів [11]. Після перерахунку, виключення не значимих коефіцієнтів і переходу від кодованих до натуральних значень, ММ приймають вигляд:

- для обробки кругом з випуклою формою:

$$\delta f = 15,213 + 12,037 \cdot n_{ex} + 0,174 \cdot V_{зп} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot n_k \quad (5)$$

- для обробки кругом з увігнутою формою:

$$\delta f = 33,46 + 9,367 \cdot n_{ex} - 0,517 \cdot V_{зп} - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot n_k + 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot V_{зп}^2 \quad (6)$$

Для кожної ММ були побудовані поверхні відгуку (див. рис. 11), що виражають залежність параметру δf від найвпливовіших факторів n_{ex} і $V_{зп}$.

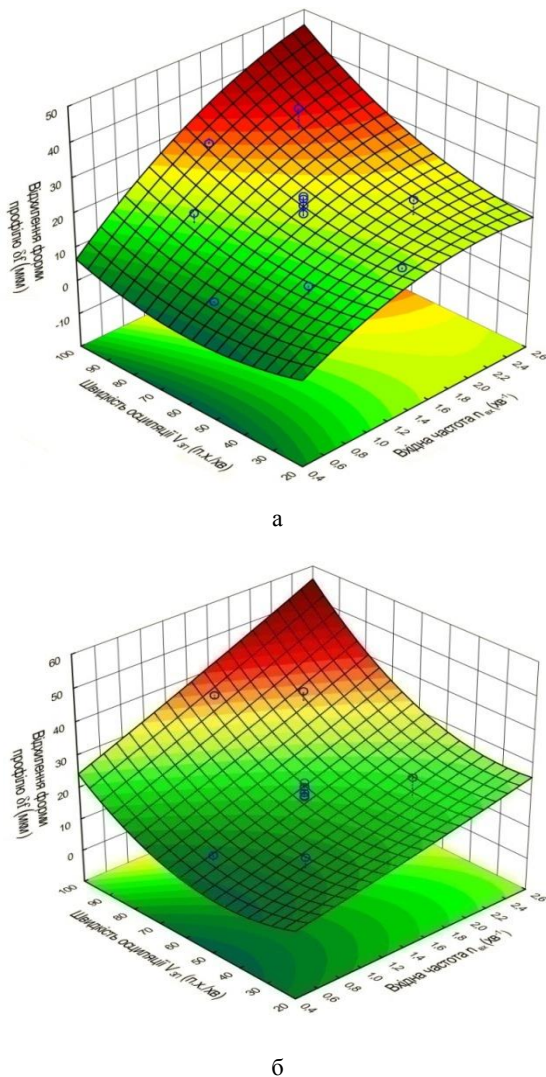


Рис. 11 – Залежність параметру оптимізації δf від технологічних факторів n_{ex} і $V_{зп}$: а – при обробці кругом з випуклою формою профілю; б – при обробці кругом з увігнутою формою профілю

Мінімальне значення δf для обробки кругом з випуклим профілем, було отримано при $n_{ex}=0,66 \text{ хв}^{-1}$, $V_{зп}=55 \text{ п.х./хв}$, $n_k=8200 \text{ хв}^{-1}$. Для круга з увігнутим профілем – при $n_{ex}=0,66 \text{ хв}^{-1}$, $V_{зп}=47 \text{ п.х./хв}$, $n_k=9000 \text{ хв}^{-1}$. Зростання значення n_{ex} , веде до збільшення величин пружних відтисків інструменту від поверхні деталі у всіх фазах обкату. Одночасно, високі значення $V_{зп}$ призводять до надмірних вібрацій. В результаті, при одночасному збільшенні $V_{зп}$ і n_{ex} , процес шліфування стає надмірно навантаженим, що супроводжується збільшенням значення відхилення δf . Оптимального балансу показників точності і шорсткості слід очікувати при мінімальних значеннях n_{ex} і близьких до нульового рівня значеннях $V_{зп}$.

В ході експерименту було встановлено, що стійкість круга з випуклим профілем складає 4 безперервно оброблені цівки. Для круга з увігнутим

профілем цей показник складає 12 цівок. В силу низької стійкості, круг з випуклим профілем бажано виготовляти на гальванічній основі з надтвердих матеріалів (наприклад КНБ), як такий, що не потребує періодичної правки. Круг з увігнутим профілем може бути виготовлений із більш дешевих матеріалів на керамічній зв'язці.

Висновки. Результатом представленого дослідження стало встановлення залежності показника відхилення форми профілю цівкового колеса від технологічних параметрів, що супроводжують процес шліфування в умовах планетарного обкату. Отримані показники точності та шорсткості свідчать про відповідність вимогам на рис. 7, та дають підстави стверджувати, що метод [8] прийнятний для впровадження у виробництво серійного типу.

Метод шліфування може бути здійснено на універсальних трьохкоординатних верстатах з ЧПУ, з вертикальним розташуванням шпинделя, які є досить поширені на виробництвах. Таким чином, для обробки за наведеною схемою, достатньо здійснити недорогу модернізацію, замість покупки спеціального обладнання. Також результати дослідження свідчать про можливість застосування недорогих абразивних інструментів на керамічній зв'язці, переважно з увігнутою формою профілю, за умови періодичної правки. Для застосування інструменту з випуклим профілем, необхідна більш міцна гальванічна зв'язка, але зникає необхідність у періодичній правці.

Список литературы

1. Лобастов В. К. А. с. 860956, СССР. Приспособление для обработки зубчатых колес, профили которых очерчены огибающими семейства внецентроидных эпи- и гипоциклоид и их эквидистантами / В. К. Лобастов. – 1981.
2. Холм. С. Пат. 3817000, США. Пристрій для виготовлення радіусного елемента набору героторної передачі / С. Холм. – 1974.
3. Елбін. С. Чабек. Пат. 4346534, США. Пристрій для хонінгування циклоїдальної поверхні / С. Елбін Чабек. – 1982.
4. Білграм Х. Пат. 1798059А, США. Верстат для виготовлення роторів / Х. Білграм, М. Хіл. – 1931.
5. Харлі Г. Пат. 4058938, США. Метод і пристрій для шліфування внутрішніх зубців зубчатих коліс / Г. Харлі, З. Ізенман. – 1977.
6. Хіл М. Пат. 2578187, США. Метод виготовлення роторів / М. Хіл. – 1951.
7. Добротворський С. С. Комп'ютерне проектування та моделювання технологічних процесів високошвидкісного фрезерування загартованих сталей / С. С. Добротворський, Є. В. Басова та ін. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні: збірник наукових праць. – 2015. – № 822. – С. 7–13.
8. Підгаєцький М. М. Пат. 55734А, Україна. Спосіб обробки внутрішніх зубців зовнішнього зубчастого колеса позациентроїдного внутрішнього цівкового зачеплення / М. М. Підгаєцький, О. І. Скібінський, А. О. Валявський. – 2003.
9. Скібінський О. І. Пат. 110823С2, Україна. Спосіб шліфування внутрішнього профілю зовнішнього колеса героторної передачі в умовах планетарного обкату / О. І. Скібінський, А. О. Гнатюк, М. М. Підгаєцький. – 2016.
10. Скібінський О. І. Визначення умов існування спряженої огинаючої сім'ї ексідистант до вкорочених епіциклоїд в циклоїдальній передачі внутрішнього зачеплення / О. І. Скібінський, В. І. Гуцул, А. О. Гнатюк. // Вісник НТУУ «КПІ». – Київ, 2014, №1(70) – С. 159-165.
11. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

References (transliterated)

1. Lobastov V. K. *Prisposoblenie dlya obrabotki zubchatyih koles, profili kotoryih ochercheni ogibayuschimi semeystva vnetsentroidnyih epi- i gipotsikloid i ih ekvidistantami* [Device for processing gears profiles of which delineated tangent curves of the cycloidal curves family and their equidistant]. USSR author's certificate, no. 860956, 1981.
2. Holm S. *Pristry dlya vigotovlennya radlunogo elementa naboru gerotornoYi peredachI* [Apparatus for producing the ring member of a gerotor gear set]. USA Patent, no. 3817000, 1974.
3. Albin S. *Czubak. Prystryi dlya honinguvannya tsykloidalnoy poverhni* [Apparatus for honing cycloidal surfaces]. USA Patent, no. 4346534, 1982.
4. Bilgram H. *Verstat dlya vigotovlennya rotoriv* [Machine for making rotors] USA Patent, no. 1798059, 1931.
5. Harle. H. *Method i pristryi dlya shlifuvannya vnutrishnih zubtsiv zubchatih kolls* [Method and apparatus for grinding the tooth flanks of internally-toothed gear wheels]. USA Patent, no 4058938, 1977.
6. Hill M. *Metod vigotovlennya rotoriv* [Method for making rotors]. USA Patent, no. 2578187, 1951.
7. Dobrotvorsky S.S., Basova E.V., ets. *Komp'yuterne proektuvannya ta modelyuvannya tekhnologichny'x procesiv vy'sokoshvy'dkisknogo frezeruvannya zagartovany'x* [Computer design and simulation processes high-speed milling hardened steels] *Visnyk Nacional'nogo universy'tetu «L'vivs'ka politexnika». Seriya: Opty'mizaciya vy'robny'chy'x procesiv i tekhnichny'j kontrol' u mashynobuduvanni ta pry'ladobuduvanni : zbirny'k naukovy'x pracz'.* 2015. No 822. pp. 7–13.
8. Pidgaetskyi M. M., Skibinskyi O. I., Valyavskiy O. A. *Sposib obrobky vnutrishnih zubtsiv zovnishnogo zubchastogo kola pozasentroidnogo vnutrshnogo tssvkovogo zacheplennya* [Method for processing internally toothed of internal profile of external gear wheel in center cycloidal transmission]. UA patent, no. 55734A, 2003.
9. Skibinskyi O. I., Gnatyuk A. O., Pidgaetskyi M. M. *Sposib shlifuvannya vnutrshnogo profilu zovnyshnogo kola gerotornoYi peredachi v umovah planetarnogo obkату* [Method for grinding internal profile of external gear wheel of gerotor]. UA patent, no. 110823C2, 2016.
10. Skibinskyi O. I. *Vyznachennya umov isnuvannya spryazhenoyi ohynayuchoyi simeystva ekvidystant do vkorochnykh epitsykloidy v tsykloidalniy peredachi vnutrshnoho zacheplennya* [Conditions determination of existence of tangent curve to family of equidistant curves of the shortened epicycloids in epicyclic transmission internal gear] / O. I. Skibinskyi, V. I. Gutsul, A. O. Gnatyuk // *Visnyk NTUU "KPI"* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI"]. Kyiv, NTUU "KPI" Publ., 2014, no. 1(70), pp. 159–165.
11. Spiridonov A. A. *Planyrovanye eksperymenta pry yssledovanii tekhnologicheskyykh protsessov* [Planning an experiment of research technological processes] / A. A. Spiridonov // *M.: Mashinostroenie Publ.*, 1981, 184 p.

Поступила (received) 10.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Експериментальні дослідження показників точності при шліфуванні профілю цівкового колеса героторної пари в умовах планетарного обкату / А. О. Гнатюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 18–25. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Експериментальные исследования показателей точности при шлифовании профиля цевочного колеса героторной пары в условиях планетарной обкатки / А. А. Гнатюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – №17 (1239). – С. 18–25. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0023.

Research precision parameters for generating gear grinding bobbin wheel profile of gerotor / A. Gnatyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P. 18–25. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гнатюк Андрій Олександрович – аспірант Центральноукраїнського (Кіровоградського) Національного технічного університету, м. Кропивницький (Кіровоград); тел.: (066) 437-50-30; e-mail: andrej.gnatyuk@gmail.com;

Гнатюк Андрей Александрович – аспирант Центральноукраинского (Кировоградского) Национального технического университета, г. Кропивницкий (Кировоград); тел.: (066) 437-50-30; e-mail: andrej.gnatyuk@gmail.com;

Gnatyuk Andriy Oleksandrovych – Postgraduate Student of Central Ukrainian (Kirovograd) National Technical University, Kropyvnytskyi (Kirovograd), tel.: (066) 437-50-30; e-mail: andrej.gnatyuk@gmail.com.

УДК 621.039.57

*С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, Б.А. АЛЕКСЕНКО, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ***ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ ВЛАГИ С ПОВЕРХНОСТИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИТ**

Проведене практичне експериментальне дослідження впливу мікрохвильового випромінювання на процес десорбції вологи з поверхневого шару молекулярних сіт, що використовуються в адсорбційних осушувачах стислого повітря. У зв'язку з широким розповсюдженням технологій, які потребують якісного стислого повітря, що використовується у сучасному промисловому виробництві, зазначена технологія потребує вдосконалення з метою підвищення якості продукції, що виробляється, і зниження виробничих витрат підприємств. Результат проведеного дослідження показав застосовність енергії мікрохвильового випромінювання з метою регенерації молекулярних сіт в пристроях підготовки повітря адсорбційного типу.

Ключові слова: осушувач, стисле повітря, вологовміст, мікрохвильове випромінювання, адсорбція, регенерація.

Проведено практическое экспериментальное исследование влияния воздействия микроволнового излучения на процесс десорбции влаги с поверхностного слоя молекулярных сит, используемых в адсорбционных осушителях сжатого воздуха. В связи с широким распространением технологий, нуждающихся в качественном сжатом воздухе, используемом в современном промышленном производстве, указанная технология нуждается в совершенствовании с целью повышения качества производимой продукции и снижения производственных затрат предприятий. Результат проведенного исследования показал применимость энергии микроволнового излучения с целью регенерации молекулярных сит в устройствах подготовки воздуха адсорбционного типа.

Ключевые слова: математичне моделювання, дисперсні композити, метод згладжених частинок SPH.

A practical experimental study of the effect of microwave radiation on the process of moisture desorption from the surface layer of molecular sieves used in the adsorption compressed air dryers. Due to the wide spread of technology, requiring high-quality compressed air that is used in modern industrial production, said the technology needs to be improved in order to increase product quality and reduce production costs of enterprises. The result of the study showed the applicability of microwave energy to regenerate the molecular sieves, used in adsorption dryers.

Keywords: dryer, compressed air, moisture, microwave radiation, adsorption, regeneration.

Введение. Как было показано [1], осушенный сжатый воздух является необходимым в промышленности не только как источник энергии, но и как компонент используемый в различных технологических процессах.

В настоящей публикации будет рассмотрено применение микроволнового излучения с целью десорбции влаги с поверхности молекулярных сит в процессе получения осушенного сжатого воздуха.

Анализ последних исследований и литературы. Обзор работ и исследований по поставленной тематике свидетельствует о том, что основное внимание разработчиков и производителей оборудования воздухоподготовки уделяется разработкам методов повышения производительности и снижения энергопотребления оборудования, носящих экстенсивный характер. При этом, проблеме интенсификации процесса десорбции молекулярных сит, разработке новых технологий, помимо известной общепринятой продувки осушенным или прогретым воздухом, уделяется недостаточно внимания как в области теоретических исследований, так и в области практического использования [5]. Основное внимание разработчиков осушающего оборудования с нагревной регенерацией приковано к такой важной, с точки зрения энергосбережения, проблеме как рекуперация тепловой энергии, используемой в процессе десорбции. Также инженеры стремятся к максимальному снижению непроизводительных затрат тепловой энергии на нагрев сопутствующих элементов оборудования, вплоть до перенесения источника нагрева непосредственно в полости адсорбционных колонн.

Между тем, применение альтернативных источников энергии может стать серьезной альтернативой общепринятым технологиям регенерации адсорбентов.

Целью настоящей статьи является изучение характера влияния микроволнового излучения на процесс десорбции влаги с поверхности молекулярного сита.

Постановка проблемы. Повышение требований к качеству сжатого воздуха, используемого в современном производстве, диктует острую необходимость совершенствования конструкции осушителей адсорбционного типа, с целью повышения их производительности и надежности при параллельном снижении уровня энергопотребления.

В настоящей работе рассматривается проблема подготовки воздуха с использованием адсорбционных осушителей, использующих новую технологию регенерации, показывается необходимость применения дополнительных источников энергии с целью интенсификации процесса регенерации адсорбента, экспериментально прослеживается зависимость интенсивности десорбции влаги с поверхности молекулярных сит, а также определяются основные направления улучшения конструкции промышленных адсорбционных осушителей.

Материалы исследований. В ходе проводимого исследования протекание процесса десорбции оценивается по такому параметру как остаточное влагосодержание в слое подопытного вещества после воздействия микроволнового излучения.

Исследование проводится с использованием испытательного стенда с техническими характеристиками, указанными в приложении (см. прил. 2.) Процесс протекает в радионепрозрачной камере объемом 30 дм³ с использованием стандартной частоты 2450 МГц [2], генерируемой магнетроном ОМ75Р.

Воздействию микроволнового излучения подвергается слой адсорбирующего вещества сухой массой 150 г., при глубине засыпки 2 см.

© С.С. Добротворский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская, 2017

Испарение десорбируемой влаги из ёмкости, содержащей адсорбирующее вещество, происходит с поверхности площадью 85 см². Последующее удаление влаги из полости камеры осуществляется при помощи продувки камеры осевым вентилятором производительностью 1,5 м³/мин.

Влагосодержание молекулярного сита, как основной параметр, характеризующий его способность к дальнейшей адсорбции, возможно наиболее точно оценить лишь косвенно, по снижению влажности воздуха, продуваемого через адсорбирующее вещество, по причине того, что выпускаемые датчики измерения влажности предназначены для работы в обтекающих датчик газообразных средах. Непосредственное же внедрение чувствительного элемента датчика влажности в структуру адсорбирующего вещества не представляется возможным из-за: 1] физической особенности характера процесса адсорбции, происходящего непосредственно в микропористой структуре на поверхности молекулярного сита, 2] неизбежной погрешности показаний интегрированного датчика при прямом контакте с микропористой структурой молекулярного сита и, что самое основное, 3] невозможности при помощи интегрированного чувствительного элемента контролировать влагосодержание всего объема испытываемого вещества в целом.

Исходя из вышеприведенных соображений, авторами принято решение об использовании силикагеля-индикатора, позволяющего визуально оценить протекание процесса десорбции во всём объеме испытываемого вещества, с некоторым ущербом точности определения влажности. Так, в качестве испытываемого вещества применен силикагель КСШГ индикаторный, ГОСТ 8984-75, позволяющий визуально контролировать процесс десорбции в режиме реального времени. Содержание влаги в слое в конкретный момент времени оценивается и фиксируется по изменению окраса индикаторного силикагеля путем сопоставления его цвета с цветом, указанным в Процентной цветовой шкале оценки (см. рис. 1.). Процентная цветовая шкала оценки отображает уровень насыщения влагой силикагеля индикаторного с расчетной влагоемкостью 27 % при относительной влажности 60 %.

Оценка эффективности осушки силикагеля с использованием микроволновой энергии рассчитывается как отношение (1) тепловой энергии, используемой для процесса испарения воды к тепловой энергии, вырабатываемой магнетроном в процессе сушки.

$$\eta = \frac{m_w \times \lambda_w}{P \times t} \quad (1)$$

где η – эффективность (%); P – мощность (Вт); m_w – масса испаренной влаги (кг), λ_w Удельная теплота парообразования/конденсации воды (2257 кДж/кг), t – время (ч).

По условиям эксперимента процессы предварительной адсорбции и десорбции протекают при нулевой компрессии, относительная влажность продувочного воздуха на входе составляет 55 ... 60 % и в процессе исследования дополнительно не снижается, ко-

лебания температуры продувочного воздуха на входе в камеру находятся в пределах +23 ... +26 °С.

Мощность микроволнового излучения [4] в процессе эксперимента изменяется в пределах 20 ... 100 %, от максимальной, что составляет 180 ... 900 Вт по методу измерения выходной мощности МЭК-705.

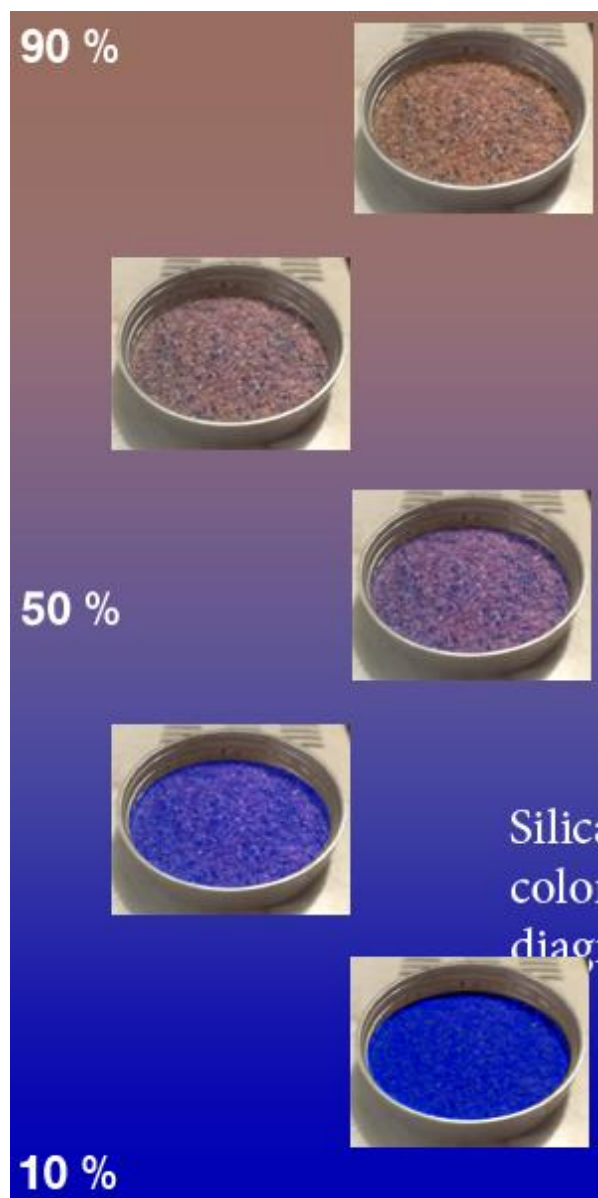


Рис. 1 – Процентная цветовая шкала оценки и сопоставление образцов испытываемого материала на цветовое соответствие.

Результаты исследования. В результате проведенного эксперимента опытно подтверждена возможность и целесообразность использования микроволнового излучения в процессе десорбции влаги с поверхностного слоя молекулярных сит.

Установлена зависимость интенсивности протекания процесса десорбции от времени воздействия и уровня мощности воздействующего на адсорбент микроволнового излучения, графически представленная на графике (рис. 1.).

Результаты исследования, полученные с использованием процентной цветовой шкалы оценки хоро-

шо, коррелируются с результатами взвешивания массы испытуемого материала в ходе эксперимента (прил. 1., рис.2) с интервалом 30 сек.

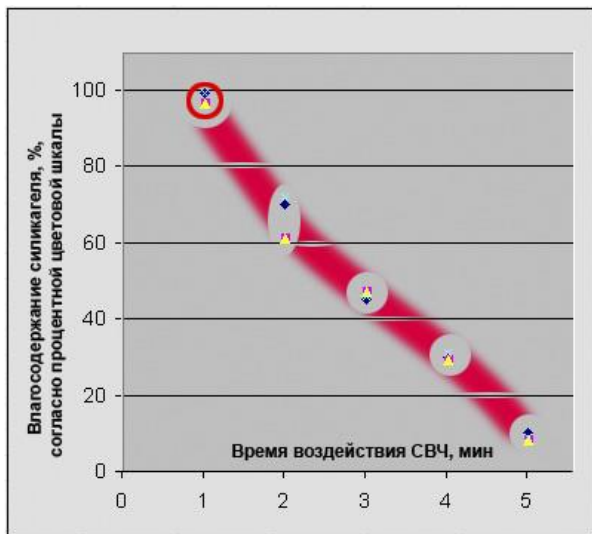


Рис. 2 – Зависимость интенсивности протекания процесса десорбции от времени воздействия СВЧ

В ходе изучения зависимости влияния мощности воздействующего микроволнового излучения на время десорбции адсорбента до уровня влагодержания не менее 10 % по визуальной оценке в соответствии с процентной цветовой шкалой оценки, установлена прямая линейная зависимость времени сушки адсорбента от уровня мощности микроволнового излучения, воздействующего на испытуемое вещество (рис. 3).

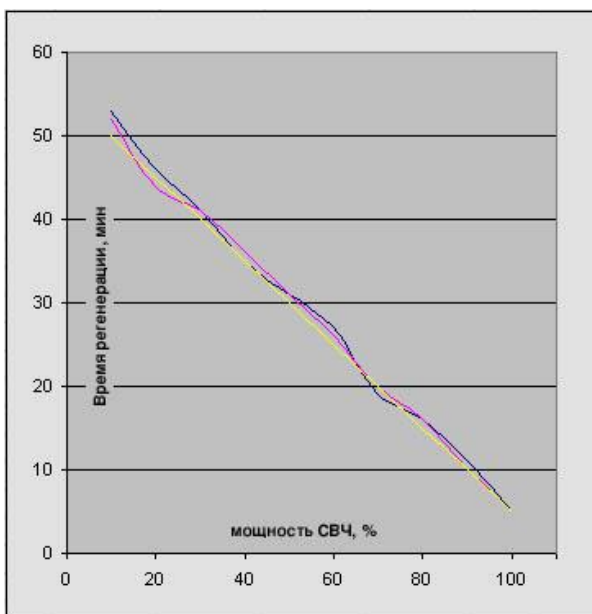


Рис. 3 – Зависимость времени десорбции адсорбента от мощности воздействующего микроволнового излучения

Практические разработки. В настоящее время в мировой практике неизвестны конструкции адсорбционных осушителей, использующих энергию микро-

волнового излучения на этапе удаления влаги из адсорбента.

Как указано [1], в практике постройки адсорбционных осушителей используются методы регенерации путем обдува его предварительно нагретым, либо предварительно осушенным воздухом [4]. При этом энергия, необходимая для осуществления процесса регенерации тратится на повышение влагеёмкости продувочного воздуха и, во-первых, технологически ограничена и не может быть значительно увеличена с целью интенсификации процесса регенерации; и, во-вторых, (в случае использования способа горячей регенерации) не может быть стопроцентно использована по назначению, из-за возникновения дополнительных энергозатрат по разогреву продувочных воздуховодов и прочих сопутствующих элементов оборудования.

Применение микроволнового излучения с целью десорбции влаги с поверхности молекулярных сит позволяет избежать непроизводительных затрат энергии в силу воздействия микроволнового излучения непосредственно на молекулы десорбируемой влаги.

Таким образом, как показано в [1] об особенностях практического использования оборудования, целью повышения эффективности работы адсорбционных осушителей, улучшения их массогабаритных характеристик, в том числе, для использования в мобильных агрегатах, требуется повышение интенсивности регенерации заданного объема адсорбирующего вещества.

Проведенный эксперимент практически доказывает возможность достижения поставленной цели путем внесения дополнительных видов энергии на этапе регенерации, и, в частности, путем использования энергии микроволнового излучения в качестве основной.

Следует отметить, что работы в этом направлении носят экспериментальный характер и осушители, в конструкции которых используются дополнительные или альтернативные виды энергии на этапе регенерации, в настоящее время на отечественных производственных предприятиях не внедряются [5].

Выводы. Результат проведенного исследования показывает применимость энергии микроволнового излучения с целью регенерации молекулярных сит в устройствах подготовки воздуха адсорбционного типа.

Проведенный эксперимент открывает перспективу для дальнейших исследований воздействия микроволнового излучения на процесс десорбции молекулярных сит в условиях, максимально приближенных к практическим, и к созданию действующего инновационного образца промышленного оборудования.

Приложение 1 – Масса испытуемого материала при проведении 4-х экспериментов

Масса испытуемого материала, г, в ходе экспериментов					
	Время, мин	Эксперимент №			
		I	II	III	IV
0	0:00	193	193	195	194
1	0:30	189	189	191	189
2	1:00	185	184	187	185
3	1:30	180	180	182	181
4	2:00	176	176	178	177
5	2:30	172	172	174	172

Продолжение прилож. 1

6	3:00	168	167	169	168
7	3:30	163	163	165	164
8	4:00	159	159	161	159
9	4:30	155	154	156	155
10	5:00	151	150	152	151

Приложение 2 – Параметры установки, использованной при проведении эксперимента

Характеристики испытательного стенда		
Параметр		Значение
1	Частота излучаемая	2450 МГц
2	Мощность максимальная	1 кВт
3	Диапазон регулировки мощности	10 ... 100
4	Производительность вентилятора	1,5 м³/мин
5	Объем камеры	35 дм³
6	Протокол связи с ПК	RS232
7	Параметры электропитания	220в AC

Список литературы

1. Добровольский С.С. Аспекты применения адсорбционных осушителей для обеспечения сжатым воздухом оборудования плазменной резки. // С.С. Добровольский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Технологии в машиностроении. Х.: НТУ "ХПИ", 2015. – Вып.1149. – С. 73-77.

2. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации тепловых процессов/ Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. – Саратов: Изд. Саратов. ун-та, 1983. – 140 с.
3. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот: пер. с англ. / Г. Пюшнер. — М.: Энергия, 1968. — 312 с.
4. Мельгунов, М.С. Короткоцикловая безнагревная адсорбция / М.С. Мельгунов // Промышленный катализ в лекциях / под общ. ред. А.С. Носкова. – М., 2009. – Вып. 8. – С. 62–105.
5. Липа А.И. Кондиционирование воздуха. Основы и теории. Современные технологии обработки воздуха. Изд. второе, перераб., доп., Одесса: ОГАХ. Издательство «Издательство ВМВ», 2010 – 607 с, ил.

Bibliography (transliterated)

1. Dobrovolsky S.S. Aspekty primeneniya adsorbtsionnykh osushiteley dlya obespecheniya szhatyim vozduhom oborudovaniya plazmennoy rezki. Kharkov: NTU «KhPI», 2014. Print.
2. Arhangel'skiy Yu.S. Sverkhvysokochastotnyye nagrevatelnyye ustanovki dlya intensifikatsii teplovykh protsessov/ Yu.S. Arhangel'skiy, I.I. Devyatkin. Saratov: Izd. Sarat. un-ta, 1983. 140 p.
3. Pyushner G. Nagrev energiyey sverkhvysokikh chastot: per. s angl. G. Pyushner. Moscow. Energiya, 1968. 312 p..
4. Melgunov, M.S. Korototsiklovaya beznagrevnaya adsorbtsiya. Promyshlennyy kataliz v lektsiyakh / pod obsch. red. A.S. Noskova. Moscow, 2009. Vol 8. PP. 62–105.
5. Lipa A.I. Konditsionirovanie vozduha. Osnovy I teorii. Sovremennyye tehnologii obrabotki vozduha. Izd. vtoroe, pererab., dop., Odessa: OGAH. Izdatelstvo: «Izdatelstvo VMV», 2010 – 607p..

Поступила (received) 05.03.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Влияние микроволнового излучения на интенсивность процесса десорбции влаги с поверхности молекулярных сит/ С.С. Добровольский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239) – С. 26–29. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Вплив мікрохвильового випромінювання на інтенсивність процесу десорбції вологи з поверхні молекулярних сит/ С.С. Добровольський, Б.О. Алексенко, Л.Г. Добровольська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 17 (1239) – С. 26–29. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Influence of microwave radiation on the intensity of the moisture desorption from the surface of the molecular sieves / S. Dobrovolsky, B. Aleksenko, L. Dobrovolska // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 17 (1239). – P. 26–29. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Добровольський Сергій Семенович - доктор технічних наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: sдобро@mail.ru.

Добровольский Сергей Семенович – доктор технических наук, профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: sдобро@mail.ru.

Dobrovolsky Sergey Semenovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: sдобро@mail.ru.

Алексенко Борис Олександрович - аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Алексенко Борис Александрович – аспірант Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Aleksenko Boris Aleksandrovich – postgraduate of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Добровольська Людмила Георгіївна - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

Добровольская Людмила Георгиевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

Dobrovol'skaya Lyudmila Georgiyevna - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

УДК 621.9-114

В. О. ІВАНОВ, В. Є. КАРПУСЬ, С. М. ВАЩЕНКО, Й. ЗАЯЦЬ, А. І. КАРМАЗА**СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОЕКТУВАННЯ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ**

Забезпечення механічної обробки деталей на металорізальних верстатах неможливе без застосування верстатних пристроїв. Вони є невід'ємною частиною замкненої технологічної системи «верстат – верстатний пристрій – різальний інструмент – заготовка» та чинять значний вплив на точність та якість обробки поверхонь деталей машин. У роботі визначено структурні етапи процесу проектування верстатних пристроїв і виявлено інформаційні зв'язки між ними для забезпечення комплексного підходу. Розроблено структурно-функціональну модель процесу проектування верстатних пристроїв, яка передбачає технологічний аналіз об'єкту обробки, синтез та оптимізацію компоновки верстатних пристроїв, інженерно-виробничий аналіз системи «верстатний пристрій – заготовка» для заданих виробничих умов, а також виявлено функціональні та інформаційні зв'язки між етапами, що дозволяє реалізувати комплексний підхід до проектування верстатних пристроїв.

Ключові слова: верстат, верстатний пристрій, компоновка, проектування, технологічний аналіз, багатокритеріальна оптимізація, інженерний аналіз, САПР ВП, CAFD-система.

Обеспечение механической обработки деталей на металлорежущих станках невозможно без применения станочных приспособлений. Они являются неотъемлемой частью замкнутой технологической системы «станок – приспособление – режущий инструмент – заготовка» и значительно влияют на точность и качество обработки поверхностей деталей машин. В работе определены структурные этапы процесса проектирования станочных приспособлений и выявлены информационные связи между ними для обеспечения комплексного подхода. Разработана структурно-функциональная модель процесса проектирования станочных приспособлений, которая предусматривает технологический анализ объекта обработки, синтез и оптимизацию компоновок станочных приспособлений, инженерно-производственный анализ системы «станочное приспособление – заготовка» для заданных производственных условий, а также выявлены функциональные и информационные связи между этапами, что позволяет реализовать комплексный подход к проектированию станочных приспособлений.

Ключевые слова: станок, станочное приспособление, компоновка, проектирование, технологический анализ, многокритериальная оптимизация, инженерный анализ, САПР СП, CAFD-система.

Machining of parts on the metal-cutting machine tools could not be ensured without use of fixtures. They are the integral part of the closed-loop technological system “machine tool – fixture – cutting tool – workpiece” and make the significant impact on the accuracy and quality of machining of machine parts surfaces. The work presents the structural steps of fixture design and determines the data flows between them to ensure the complex approach. The structural-functional model of the process of fixture design has been developed, which provides the manufacturing analysis of the workpiece, synthesis and optimization of fixture configurations, engineering and production analysis of the system “fixture – workpiece” for set production conditions, and also functional connections and data flows between steps have been determined. The above-mentioned allows realizing of the complex approach to the fixture design.

Keywords: machine tool, fixture, configuration, design, manufacturing analysis, multicriteria optimization, verification, computer-aided fixture design, CAFD system.

Вступ

У сучасному машинобудуванні основним викликом є протиріччя між необхідністю зменшення витрат часу на проектування та виготовлення виробів та ускладненням конструкції виробів. За останні 15 років номенклатура виробів збільшилася більше ніж у 2 рази, їх складність постійно підвищується, зростають вимоги до точності та якості виробів [1, 2]. Сьогодні ринок потребує більше різновидів продукції, а отже, обладнання та процеси повинні бути більш гнучкими, щоб забезпечити потреби ринку та скоротити витрати часу виходу продукції на ринок. Це обумовлює необхідність розроблення та впровадження принципово нових конструкторсько-технологічних рішень для реалізації процесів, які мають бути спрямовані на інтенсифікацію та автоматизацію виробництва [3].

Одним із перспективних напрямків інтенсифікації конструкторсько-технологічної підготовки виробництва є розроблення та впровадження систем автоматизованого проектування верстатних пристроїв (САПР ВП), які дозволяють у автоматизованому режимі проектувати верстатні пристрої (ВП), оцінювати їх ефективність та розробляти необхідну конструкторсько-технологічну документацію.

Існуючі на даний час САПР ВП обмежені в своїй функціональності, що обумовлює низьку якість проектування, збільшує обсяг конструкторських робіт,

що спричиняє зростання витрат часу на проектування ВП. Для уникнення цієї проблеми раціональним є створення принципово нової САПР ВП, що зробить проектування більш якісним, забезпечуючи аналіз, синтез, оптимізацію компоновки ВП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В умовах сучасного машинобудівного виробництва, що характеризується нестабільністю номенклатури та обсягів випуску продукції, актуальним є раціональний вибір ВП, до яких висуваються наступні вимоги [4–8]: забезпечення заданої точності обробки; гнучкість, достатня для обробки деталей у межах технічної характеристики верстата; механізоване або автоматизоване переналагодження при переході до обробки деталей іншого типорозміру; висока жорсткість деталей та складальних одиниць, здатних сприймати значні сили різання та забезпечувати максимальне використання потужності обладнання; інструментальна доступність для обробки максимальної кількості поверхонь за один установ; високий рівень уніфікації деталей та складальних одиниць, що забезпечує зниження вартості ВП; висока функціональна та технологічна надійність ВП і його елементів; економичність. Основні вимоги при створенні ВП зведено до шести груп, враховуючи фізичні та точнісні можливості, вимоги до рівноважного стану системи, ефективність, інструментальну доступність, ергономічність [9].

© В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, С. М. Ващенко, Й. Заяць, А. І. Кармаза, 2017

Процес проектування ВП слід розглядати з позиції, що в процесі експлуатації ВП контактує з зовнішнім середовищем, зокрема заготовкою, різальним інструментом, верстатом, верстатником. Зовнішнє середовище створює певні обмеження, що безпосередньо впливають на структуру ВП і процес проектування [10, 11].

На сьогодні накопичений багаторічний досвід розроблення та впровадження САПР ВП, які значно прискорили та вдосконалили процес проектування ВП, дозволяючи конструкторам на стадії проектування комплексно проаналізувати властивості майбутнього ВП до його виготовлення.

За призначенням САПР ВП, які у англомовному середовищі називаються CAFD-системи, поділяються на системи, призначені для проектування спеціальних [12], збірних [13–15] та переналагоджуваних ВП [12, 16]. Ґрунтовний огляд існуючих САПР оснастки та САПР ВП розглянуто у роботах [9, 12, 14, 17–23] та ін.

За ступенем автоматизації САПР ВП традиційно класифікують на інтерактивні (I-CAFD), напівавтоматизовані (Semi-AFD) та автоматизовані (AFCD) [16].

Аналіз існуючих САПР ВП показав, що типова структура [21] складається з чотирьох модулів, які забезпечують поетапне вирішення задачі формування структури технологічної операції, визначення виробничих умов, синтез компонувань ВП та інженерний аналіз спроектованого ВП.

Основними завданнями CAFD-систем, більшість яких призначена для операцій механічної обробки заготовок, є [24]:

- визначення функціональних поверхонь заготовки та вибір відповідних стандартизованих нерегульованих функціональних елементів із бази даних;
- компонування ВП із обраних елементів;
- аналіз компонувань ВП здебільшого за одним критерієм (наприклад, точність установа заготовки, жорсткість компонування, металомісткість, ергономічність тощо);
- розроблення конструкторської документації (складальне креслення, специфікація, схема складання та налагодження компонування ВП).

Подальший розвиток CAFD-систем можливий, перш за все, за рахунок вдосконалення їх функціональності. Насамперед, це впровадження математичного апарату для багатокритеріального вибору найвигідніших компонувань ВП із числа конкуруючих варіантів, причому перелік та кількість критеріїв можуть змінюватися або доповнюватися відповідно до заданих умов виробництва. Доведено доцільність формування бібліотек функціональних елементів на основі системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв [6], яка є найефективнішою в умовах багатомономенклатурного виробництва. Для оцінки похибок, які виникають внаслідок пружних деформацій під дією сил різання необхідним є виконання скінченноелементного аналізу компонувань ВП із

урахуванням динамічних характеристик. Перспективним є оснащення CAFD-систем інструментом для розмірного аналізу 3D моделей компонувань ВП із метою врахування похибки виготовлення функціональних елементів ВП при подальших розрахунках. Актуальним є розроблення 3D анімацій процесів складання та налагодження компонувань ВП, що дозволить скоротити витрати підготовчо-заклучного часу, пов'язаного з налагодженням ВП до експлуатації.

Метою дослідження є визначення структурних етапів процесу проектування ВП і виявлення інформаційних зв'язків між ними для забезпечення повного циклу конструювання, оптимізації та інженерного аналізу ВП для заданих виробничих умов.

Матеріал і результати дослідження.

1 Автоматизоване проектування верстатних пристроїв у комп'ютерно-інтегрованій системі виробництва

Комп'ютерно-інтегрована система виробництва (CIM) забезпечує вирішення задач проектування (CAD), аналізу та оптимізації (CAE), розроблення технології виготовлення виробів (CAPP), автоматизацію процесу виробництва (CAM) та контролю (CAQ), автоматизоване проектування технологічної оснастки (CAT) та системи автоматизованого проектування ВП (CAFD). На рис. 1 показано місце САПР ВП у структурі комп'ютерно-інтегрованої системи виробництва, налагоджені інформаційні зв'язки якої забезпечують скорочення витрат часу та вартості проектування, підвищення якості розроблених конструкторсько-технологічних рішень (рис. 2).

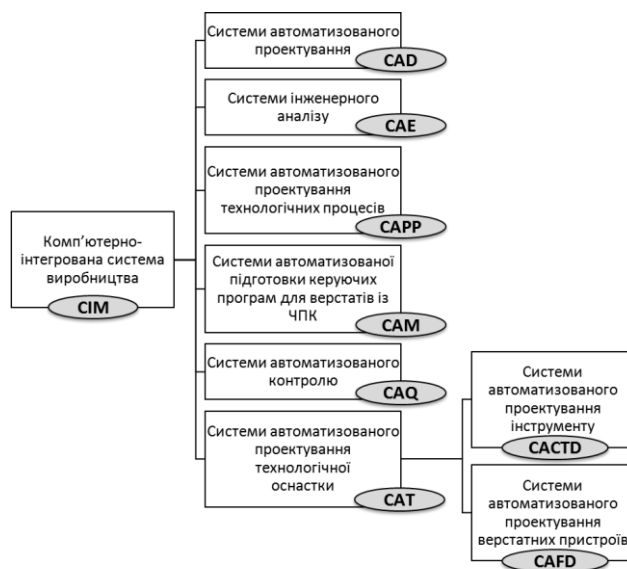


Рис. 1 – Загальна структура комп'ютерно-інтегрованої системи виробництва

CAFD-системи можна інтегрувати з CAD/CAE/CAPP/CAM системами, а отже, виконувати повний цикл проектування, аналізу, синтезу та виготовлення ВП. Отже, процес проектування ВП повинен

будуватися з урахуванням інтеграції з вище переліченими системами. На рис. 3 наведено місце CAFD-систем серед інших автоматизованих систем та їх інформаційні взаємозв'язки.

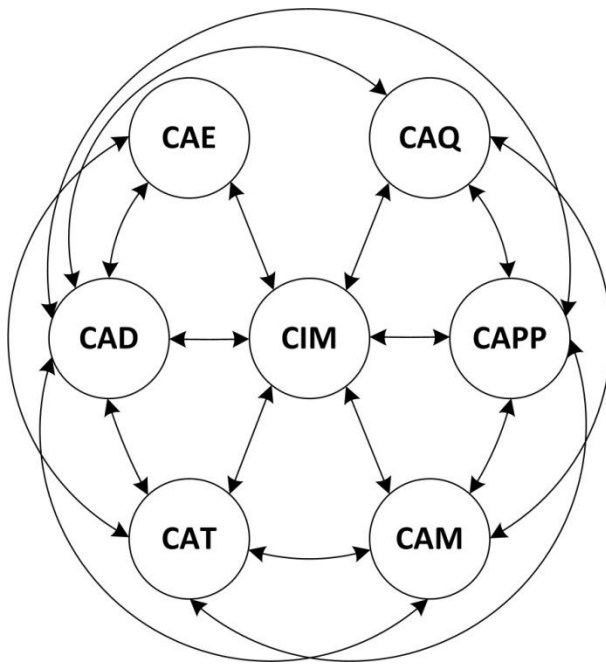


Рис. 2 – Інформаційні зв'язки у комп'ютерно-інтегрованій системі виробництва

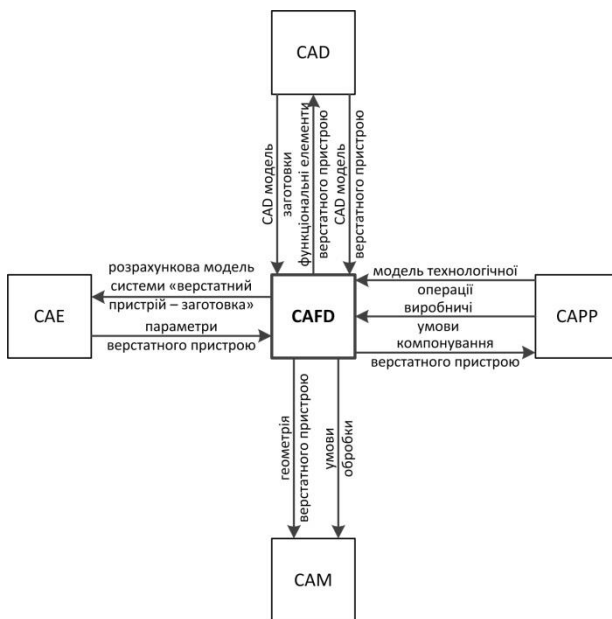


Рис. 3 – Місце САПР ВП серед інших систем та їх інформаційні взаємозв'язки

2 Контекстна діаграма структурно-функціональної моделі процесу проектування верстатних пристроїв

На початковому етапі створення САПР ВП важливо зрозуміти всі процеси, які необхідно автоматизувати. Процес проектування ВП процес розглядається з позиції інженера-конструктора. Найбільш зручним інструментом моделювання процесів є структур-

но-функціональне моделювання за стандартом IDEF0 [25].

У IDEF0 система розглядається як сукупність взаємодіючих етапів або функцій. Такий підхід є принциповим, оскільки функції системи аналізуються незалежно від об'єктів, якими вони оперують. Це дозволяє більш чітко змодельовати логіку та взаємодію процесів проектування.

Процес проектування ВП є трудомістким і потребує опрацювання великого обсягу інформації, яку прийнято класифікувати на постійну та змінну. Постійна інформація, яка може бути нормативна (державні стандарти, довідники, каталоги, рекомендації, вимоги, нормативні та керівні документи тощо) та експертна (накопичені знання інженера-конструктора), характеризує об'єкт, відомості про які відомі до початку процесу проектування ВП. Змінною є інформація, яка піддається змінам при кожній новій проектній задачі та класифікується на вхідну (завдання на проектування), проміжну (генерується у процесі роботи і використовується при взаємодії модулів системи) та вихідну (результати проектування).

Інформаційна підтримка процесу проектування ВП виконується за допомогою розробленої бази даних [26], яка складається з 15 прикладних бібліотек, та охоплює весь спектр необхідної інформації: конструкторсько-технологічного, нормативно-довідкового, загальноінженерного та оптимізаційно-розрахункового характеру [27].

Для створення діаграм процесу проектування за нотацією IDEF0 використано програму AllFusion Process Modeler 7 (BPwin). Першим етапом моделювання є створення контекстної діаграми структурно-функціональної моделі процесу проектування ВП (рис. 4), яка у найбільш узагальненому вигляді описує процес проектування ВП. Запропоновано комплексний підхід проектування ВП, який складається з трьох структурних етапів, кожний з яких є логічним продовженням попереднього (рис. 5). Так, на основі вхідних даних здійснюється технологічний аналіз заготовки, на основі якого відбувається синтез конкуруючих варіантів компоновки ВП і виконується багатокритеріальна оптимізація, результат якої є основою для інженерно-виробничого аналізу системи «верстатний пристрій – заготовка». Такий підхід є принципово новим для галузі проектування ВП, комплексно вирішуючи завдання конструювання, оптимізації та інженерного аналізу ВП для заданих виробничих умов, що вкрай важливо для сучасного машинобудівного виробництва.

3 Технологічний аналіз об'єкту обробки

Аналіз 3D моделі передбачає ідентифікацію функціональних поверхонь заготовки, які можуть бути: оброблювані; базові; поверхні під притискачі. Це дозволяє отримати інформацію про: геометрію (форму) поверхонь; просторове розташування певних поверхонь відносно інших; розмірні характеристики поверхонь (довжина, ширина, висота, діаметр). Із креслення (або іншої супроводжувальної документації) необхідно отримати інформацію: поле допуску для кожної з поверхонь; шорсткість поверхонь; марку матеріалу; твердість матеріалу заготовки; вид термічної обробки; інші технічні вимоги.

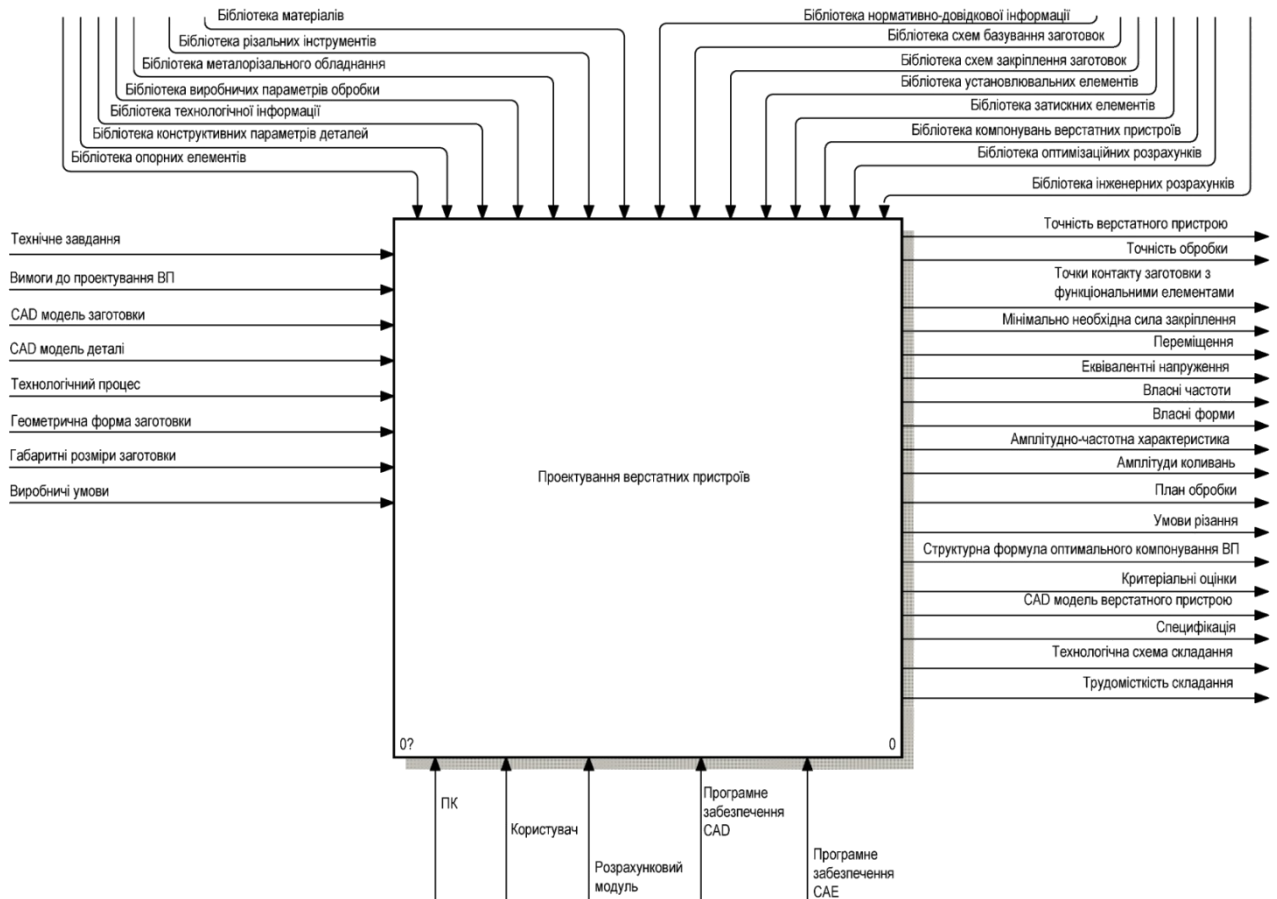


Рис. 4 – Контекстна діаграма процесу проектування верстатних пристроїв

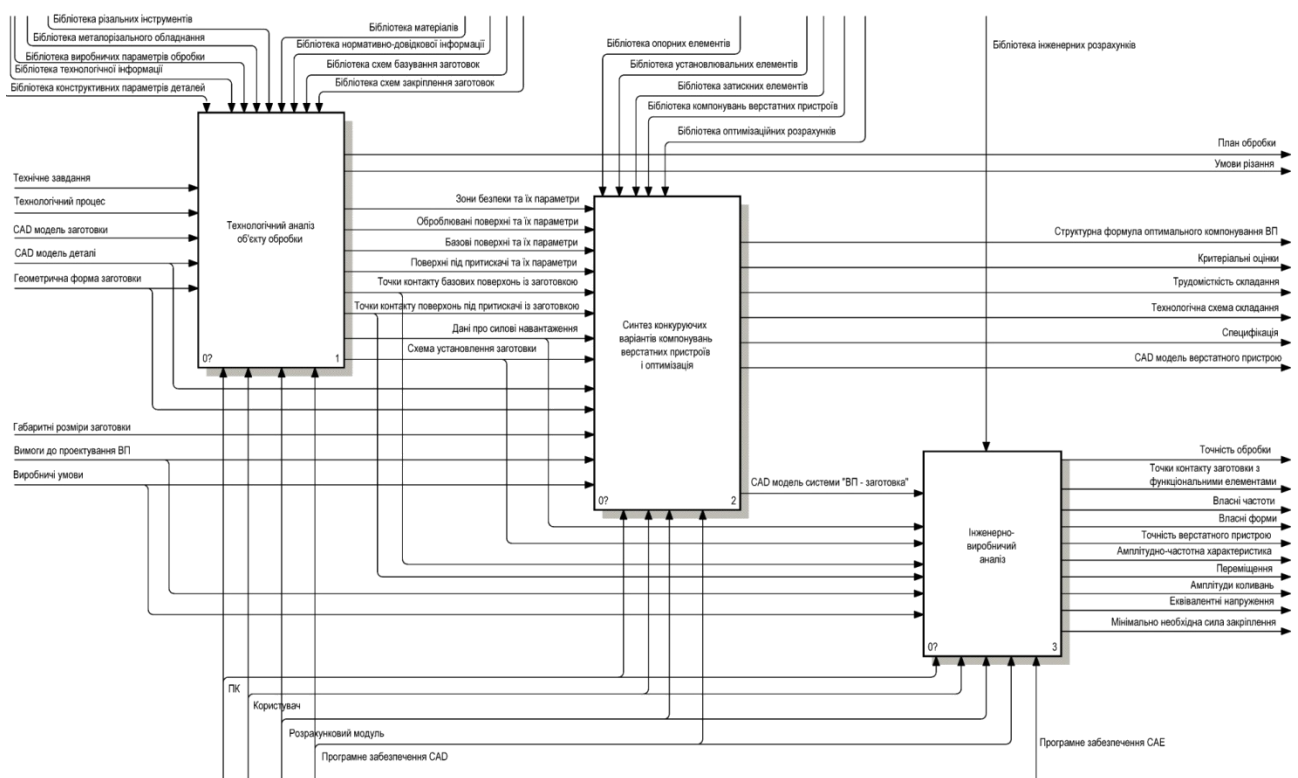


Рис. 5 – Декомпозиція процесу проектування верстатних пристроїв

На основі інформації про оброблювані поверхні, формується план обробки поверхонь. На даному етапі визначаються: принципова схема обробки поверхонь; режими різання (глибина різання, подача, швидкість різання); сила різання; необхідна потужність верстата.

Сукупність базових поверхонь реалізують теоретичну схему базування із визначенням точок контакту заготовки з установлювальними елементами ВП. Аналіз поверхонь під притискачі дозволяє вибрати одну з типових схем закріплення, а також точки контакту заготовки з затискними елементами.

Розроблена методика визначення точок контакту заготовки з функціональними елементами ВП дозволяє обґрунтовано обирати оптимальні рішення для кожної проектної ситуації.

На основі плану обробки, схем базування та закріплення заготовки формується схема установлення та обробки заготовки з вказівкою величин та напрямків дії сил різання та закріплення у визначеній системі координат.

4 Синтез та оптимізація компоновань верстатних пристроїв

На даному етапі виконується два процеси – синтезу та оптимізації. На основі виявлених взаємозв'язків, інформаційних потоків, а також розроблених правил і методик, враховуючи конфігурацію заготовки, параметри функціональних поверхонь, обрані схему базування та схему закріплення заготовки, обираються установлювальні та затискні елементи, які відповідають заданим параметрам. Відповідно до габаритних розмірів і геометричної форми заготовки, а також заданим вимогам до проектування ВП здійснюється вибір опорних елементів. Це дозволяє сформувати сукупності конкуруючих варіантів опорних, установлювальних і затискних елементів. Далі на їх основі та з урахуванням раніше створених компоновань ВП, які містяться у базі даних, відбувається формування конкуруючих варіантів компоновань ВП за розробленим алгоритмом [28].

Впровадження оптимізаційних розрахунків дозволяє обирати оптимальне компоновання ВП для конкретних виробничих умов на основі багатокритеріальної оптимізації. Першочергово вибираються критерії оптимальності, які відповідають проектній задачі, ранжуються за важливістю, формується система обмежень. Далі, використовуючи систему оптимізації [29] та нормативно-довідкову інформацію з бази даних, здійснюється вибір компоновань ВП, які задовольняють системі обмежень. Для компоновань ВП, які залишились внаслідок накладання технічних обмежень, виконується розрахунок чисельних параметрів за кожним критерієм оптимальності. Далі здійснюється багатокритеріальна оптимізація [30]. У результаті оптимізаційної задачі отримуємо структурну формулу оптимального компоновання ВП та розраховані критеріальні оцінки. Знаючи коди функціональних елементів, що входять до структурної формули оптимального компоновання ВП, та інформацію з бібліотек функціональних елементів, здійснюється складання ВП за розробленою методикою просторового позиціонування структурних елементів системи «ВП – заготовка».

5 Інженерно-виробничий аналіз

Проведення інженерного аналізу є надзвичайно важливим етапом, оскільки це дозволяє прогнозувати параметри майбутнього ВП ще на етапі проектування. Для кожної проектної задачі існує можливість вибору задач та формування плану дослідження системи «ВП – заготовка» з урахуванням вимог до проектування ВП та виробничих умов. Структурно-функціональною моделлю передбачається можливість виконання розрахунків: на точність обробки деталей за методикою [31]; дослідження стійкості рівноважного стану системи «верстатний пристрій – заготовка» [32], дослідження напружено-деформованого стану [33], проведення модального аналізу [34] та гармонічного аналізу [35, 36].

На основі запропонованої структурно-функціональної моделі процесу проектування ВП обґрунтовано та розроблено структуру САПР ВП, яка складається з 5 модулів та підсистеми, яка забезпечує інформаційну підтримку процесу проектування, до складу якої входять 15 прикладних бібліотек [37].

Висновки

Розроблено структурно-функціональну модель процесу проектування ВП, яка передбачає технологічний аналіз об'єкту обробки, синтез та оптимізацію, інженерно-виробничий аналіз системи «ВП – заготовка», а також встановлено функціональні та інформаційні зв'язки між етапами, що реалізовує комплексний підхід до організації процесу проектування ВП.

Функціональні можливості розробленої САПР ВП у автоматизованому режимі забезпечують пошук оптимального компоновання ВП для заданих виробничих умов, зменшують терміни виконання проектних процедур та підвищують ефективність проектування.

Список літератури

1. The Future of Manufacturing: Bringing the real and virtual world together [Електронний ресурс] // Siemens AG. – 2015. – Режим доступу: <http://w3.siemens.com/topics/global/en/industry/future-of-manufacturing/Documents/feature-infografik/all/en/index.html?stc=wwcg102138#/conclusions/469>.
2. Bi Z.M., Lang S.Y.T., Verner M., Orban P. Development of Reconfigurable Machines. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, Vol. 39, pp. 1227–1251, doi: 10.1007/s00170-007-1288-1.
3. Карпуть В. Є. Інтенсифікація процесів механічної обробки: монографія / В. Є. Карпуть, В. О. Іванов, О. В. Котляр та ін.; за ред. В. Є. Карпуся. – Суми : Сумський державний університет, 2012 – 436 с., doi: 10.13140/2.1.3953.7604.
4. Обратимая технологическая оснастка для ГПС / Н. Д. Жолткевич, И. Я. Мовшович, А. С. Кобзев и др. – К. : Техніка, 1992. – 216 с.
5. Карпуть В. Е. Современные требования к технологической оснастке станков с ЧПУ / В. Е. Карпуть, В. А. Иванов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2008. – № 22. – С. 23–35.
6. Карпуть В. Е. Универсально-сборные переналаживаемые приспособления / В. Е. Карпуть, В. А. Иванов // Вестник машиностроения. – 2008. – № 11. – С. 46–50.
7. Karpus V. E., Ivanov V. A. Universal-Composite Adjustable Machine-Tool Attachments. Russian Engineering Research, 2008, Vol. 28, Issue 11, pp. 1077–1083, doi: 10.3103/S1068798X08110105.
8. Пермяков А. А. К вопросу об унификации установочно-зажимных приспособлений агрегатированного оборудования / А. А. Пермяков, И. Я. Яковенко // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2016. – № 33 (1205). – С. 38–41.
9. Boyle I., Rong Y., Brown D. A Review and Analysis of Current Computer-Aided Fixture Design Approaches. International Journal

- of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, Vol. 27, pp. 1–12, doi: 10.1016/j.rcim.2010.05.008.
10. Ракович А. Г. Автоматизация проектирования приспособлений для металлорежущих станков. – М. Машиностроение, 1980. – 136 с.
 11. Pehlivan S., Summers J. A Review of Computer-aided Fixture Design with Respect to Information Support Requirements. International Journal of Production Research, 2008, Vol. 46, No. 4, pp. 929–947, doi: 10.1080/00207540600865386.
 12. Rong Y., Huang S.H., Hou Z. Advanced Computer-aided Fixture Design. Elsevier Academic Press, New York (2005).
 13. Rong Y., Zhu, Y. Computer-Aided Fixture Design. Marcel Dekker, New York (1999).
 14. Nee A.Y.C., Senthil Kumar A., Tao Z.J. An Advance Treatise on Fixture Design and Planning. World Scientific, Singapore (2004).
 15. Rong Y. Chapter 4. Computer-Aided Modular Fixture Design. In: Leondes C.T. (ed.) Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems. Vol. 4: Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing (CAD/CAM), pp. 103–170. World Scientific, Singapore (2003).
 16. Nee A.Y.C., Whybrew K., Senthil Kumar A. Advanced Fixture Design for FMS. Springer-Verlag, London (1995).
 17. Hargrove S.K., Kusiak A. Computer-aided Fixture Design: A Review. International Journal of Production Research, 1994, Vol. 32, pp. 733–753, doi: 10.1080/00207549408956967.
 18. Жолткевич Г. Н. Автоматизация проектирования технологической оснастки: теория и практика / Г. Н. Жолткевич. – К. : Техніка, 1998. – 263 с.
 19. Bi Z.M., Zhang W.J. Flexible Fixture Design and Automation: Review, Issues and Future Directions. International Journal of Production Research, 2001, Vol. 39, pp. 2867–2894, doi: 10.1080/00207540110054579.
 20. Kang X., Peng Q. Recent Research on Computer-Aided Fixture Planning. Journal of Recent Patents on Mechanical Engineering, 2009, Vol. 2, pp. 8–18, doi: 10.2174/2212797610902010008.
 21. Wang H., Rong Y., Li H., Price S. Computer-Aided Fixture Design: Recent Research and Trends. Journal of Computer-Aided Design, 2010, Vol. 42, pp. 1085–1094, doi: 10.1016/j.cad.2010.07.003.
 22. Vukelic D., Tadic B., Luzanin O. et al. A Rule-based System for Fixture Design. Scientific Research and Essays, 2011, Vol. 6 (27), pp. 5787–5802, doi: 10.5897/SRE11.1138.
 23. Parvaz H., Nategh M.J. A Pilot Framework Developed as a Common Platform Integrating Diverse Elements of Computer Aided Fixture Design. International Journal of Production Research, 2013, Vol. 51, No. 22, pp. 6720–6732, doi: 10.1080/00207543.2013.832000.
 24. Иванов В. О. Сучасні САФД-системи у машинобудуванні та перспективи розвитку / В. О. Иванов, В. Є. Карпусь // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво : тези доповідей Десятої всеукр. молод. науково-техн. конф., 26–30 жовтня 2010 р., Суми. – Суми : СумДУ, 2010. – С. 62–64.
 25. Методология IDEFO [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://alice.pnzgu.ru/case/caseinfo/bpwin/part3.php>.
 26. Свідомство про реєстрацію авторського права на твір № 70511, Україна, Комп'ютерна програма "Database for Fixture Design" / Иванов В. О., Ващенко С. М., Багрий Я. В.; авторські майнові права – Сумський державний університет; дата реєстрації 17.02.2017.
 27. Иванов В. А. База данных – основа проектирования станочных приспособлений / В. А. Иванов, Я. В. Багрий // Прогрессивные технологии и процессы : сборник статей Междунар. молод. научно-техн. конф., 25–26 сентября 2014 г., Курск. – С. 243–247.
 28. Карпусь В. Е. Выбор оптимальной компоновки универсально-сборных переналаживаемых приспособлений / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Вестник машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 3–9.
 29. Karpus V.E., Ivanov V.A. Choice of Optimal Construction of Modular Reusable Fixtures. Russian Engineering Research, 2012, Vol. 32, Issue 3, pp. 213–219, doi: 10.3103/S1068798X12030124.
 30. Карпусь В. Є. Оптимізація механічної обробки тіл обертання: монографія / В. Є. Карпусь, О. В. Котляр, В. О. Иванов; за ред. В. Є. Карпуся. – Харків : НТМТ, 2012. – 296 с., doi: 10.13140/RG.2.1.3518.8967.
 31. Ivanov V., Dehtiarov I., Pavlenko I. Mathematical Model of the Fixture Flexibility Impact on Machining Accuracy of Levers. Acta Mechanica Slovaca, 2016, Vol. 20, Issue 2, pp. 6–15.
 32. Павленко І. В. Забезпечення умов стійкості заготовки у верстатному пристрої зі схемою базування за трьома площинами / І. В. Павленко, В. О. Иванов // Вісник ШНАУ : науковий журнал. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2015. – № 11 (27). – С. 23–26.
 33. Иванов В. О. Оцінювання нелінійної жорсткості функціональних елементів верстатних пристроїв / В. О. Иванов, І. В. Павленко // Машинобудування очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : матеріали Шістнадцятої міжнар. молод. науково-техн. конф., 26–29 жовтня 2016 р., Суми. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – С. 23–24.
 34. Курилов Б. М. Застосування комп'ютерних засобів для дослідження динаміки механічної системи «верстатний пристрій – заготовка» / Б. М. Курилов, І. В. Павленко, В. О. Иванов // Сучасні технології у промисловому виробництві: матер. наук.-техн. конф. викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій : у двох частинах, 18–21 квітня 2017 р., Суми. – Суми : Сумський державний університет, 2017. – Ч. 1. – С. 149.
 35. Павленко І. В. Математическая модель динамики системы «станочное приспособление – заготовка» на примере схемы базирования по трём плоскостям / И. В. Павленко, В. А. Иванов, Б. Н. Курилов, С. О. Чигрин // Безопасность и проектирование конструкций в машиностроении : сборник научных трудов Междунар. научно-техн. конф., 25–26 октября 2015 г., Курск. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2015. – С. 119–122.
 36. Иванов В. А. Гармонический анализ системы «станочное приспособление – заготовка» на примере схемы базирования по трём плоскостям / В. А. Иванов, И. В. Павленко, Б. Н. Курилов и др. // Инновации в металлообработке: взгляд молодых специалистов : сборник научных трудов Междунар. научно-техн. конф., 2–3 октября 2015 г., Курск. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2015. – С. 158–161.
 37. Ivanov V., Vashchenko S., Rong Y. Information Support of the Computer-aided Fixture Design System. Proc. of 12th Int. Conf. ICTERI'2016, Kyiv, Ukraine, June 21–24, 2016, CEUR-WS.org, online CEUR-WS.org/Vol-1614/paper_37.pdf.

References (transliterated)

1. The Future of Manufacturing: Bringing the real and virtual world together. – Siemens AG. – 2015. – Available at: <http://w3.siemens.com/topics/global/en/industry/future-of-manufacturing/Documents/feature-infografik/all/en/index.html?stc=wwcg102138#/conclusions/469>.
2. Bi Z.M., Lang S.Y.T., Verner M., Orban P. Development of Reconfigurable Machines. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, Vol. 39, pp. 1227–1251, doi: 10.1007/s00170-007-1288-1.
3. Karpus V.E., Ivanov V.O., Kotliar O.V. et al. Intensyfikacija procesiv mehaničnoj obrobky [Intensification of Manufacturing Processes]; edited by V. E. Karpus. Sumy, Sumy State University, 2012, 436 p., doi: 10.13140/2.1.3953.7604.
4. Zholtkevich N.D., Movshovich I.Ja., Kobzev A.S. et al. Obratimaja tehnologicheskaja osnastka dlja GPS [Reusable Tooling for FMS]. Kyiv, Tehnika, 1992, 216 p.
5. Karpus V.E., Ivanov V.A. Sovremennyye trebovaniya k tehnologicheskoy osnastke stankov s ChPU [Modern Requirements to Tooling for CNC Machine Tools]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008, No. 22, pp. 23–35.
6. Karpus V.E., Ivanov V.A. Universal'no-sbornye perenalazhivaemye prispособlenija [Modular Readjusted Attachments]. Vestnik mashinostroeniya, 2008, no. 11, pp. 46–50.
7. Karpus V.E., Ivanov V.A. Universal-Composite Adjustable Machine-Tool Attachments. Russian Engineering Research, 2008, Vol. 28, Issue 11, pp. 1077–1083, doi: 10.3103/S1068798X08110105.
8. Permjakov A.A., Jakovenko I.Ja. K voprosu ob unifikacii ustanovочно-zazhimnyh prispособlenij agregativirovannogo oborudovaniya [Concerning Unification of Locating-and-Clamping Fixtures of Modular Equipment]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2016, No. 33 (1205), pp. 38–41.
9. Boyle I., Rong Y., Brown D. A Review and Analysis of Current Computer-Aided Fixture Design Approaches. International Journal of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, Vol. 27, pp. 1–12, doi: 10.1016/j.rcim.2010.05.008.

10. Rakovich A.G. Avtomatizacija proektirovanija prisposoblenij dlja metallorazhushhih stankov [Automation of Fixture Design for Metal-cutting Machine Tools]. Moscow, Mashinostroenie, 1980, 136 p.
11. Pehlivan S., Summers J. A Review of Computer-aided Fixture Design with Respect to Information Support Requirements. International Journal of Production Research, 2008, Vol. 46, No. 4, pp. 929–947, doi: 10.1080/00207540600865386.
12. Rong Y., Huang S.H., Hou Z. Advanced Computer-aided Fixture Design. Elsevier Academic Press, New York (2005).
13. Rong Y., Zhu, Y. Computer-Aided Fixture Design. Marcel Dekker, New York (1999).
14. Nee A.Y.C., Senthil Kumar A., Tao Z.J. An Advance Treatise on Fixture Design and Planning. World Scientific, Singapore (2004).
15. Rong Y. Chapter 4. Computer-Aided Modular Fixture Design. In: Leonides C.T. (ed.) Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems. Vol. 4: Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing (CAD/CAM), pp. 103–170. World Scientific, Singapore (2003).
16. Nee A.Y.C., Whybrew K., Senthil Kumar A. Advanced Fixture Design for FMS. Springer-Verlag, London (1995).
17. Hargrove S.K., Kusiak A. Computer-aided Fixture Design: A Review. International Journal of Production Research, 1994, Vol. 32, pp. 733–753, doi: 10.1080/00207549408956967.
18. Zholtkevich G.N. Avtomatizacija proektirovanija tehnologicheskoy osnastki: teorija i praktika [Automation of Tooling Design: Theory and Practice]. Kyiv, Tehnika, 1998, 263 p.
19. Bi Z.M., Zhang W.J. Flexible Fixture Design and Automation: Review, Issues and Future Directions. International Journal of Production Research, 2001, Vol. 39, pp. 2867–2894, doi: 10.1080/00207540110054579.
20. Kang X., Peng Q. Recent Research on Computer-Aided Fixture Planning. Journal of Recent Patents on Mechanical Engineering, 2009, Vol. 2, pp. 8–18, doi: 10.2174/2212797610902010008.
21. Wang H., Rong Y., Li H., Price S. Computer-Aided Fixture Design: Recent Research and Trends. Journal of Computer-Aided Design, 2010, Vol. 42, pp. 1085–1094, doi: 10.1016/j.cad.2010.07.003.
22. Vukelic D., Tadic B., Luzanin O. et al. A Rule-based System for Fixture Design. Scientific Research and Essays, 2011, Vol. 6 (27), pp. 5787–5802, doi: 10.5897/SRE11.1138.
23. Parvaz H., Nategh M.J. A Pilot Framework Developed as a Common Platform Integrating Diverse Elements of Computer Aided Fixture Design. International Journal of Production Research, 2013, Vol. 51, No. 22, pp. 6720–6732, doi: 10.1080/00207543.2013.832000.
24. Ivanov V.O., Karpus V.E. Suchasni CAFD-sistemi u mashinobuduvanni ta perspektivi rozvitku [Modern CAFD Systems in Manufacturing Engineering and Future Trends]. Mashinobuduvannya Ukraïni ochima molodih: progresivni idei – nauka – virobnictvo : tezi dopovidej Desjatoj vseukr. molod. naukovo-tehn. konf., 26–30 zhovtnja 2010 r., Sumy [Proc. of 10th All-Ukrainian Scientific and Technical Conf.]. Sumy, Sumy State University, 2010, pp. 62–64.
25. Metodologija IDEF0 [Methodology of IDEF0]. – Available at: <http://alice.pnzgu.ru/case/caseinfo/bpwin/part3.php>.
26. Ivanov V.O., Vashchenko S.M., Bahrii Y.V. Computer Program “Database for Fixture Design”. Certificate for copyright № 70511, Ukraine, date of registration 17.02.2017.
27. Ivanov V.A., Bahrii Y.V. Baza dannyh – osnova proektirovanija stanochnyh prisposoblenij [Database – the Foundation of Fixture Design]. Progressivnye tehnologii i process [Progressive Technologies and Processes], Kursk, 2014, pp. 243–247.
28. Karpus V.E., Ivanov V.A. Vybór optimal'noj komponovki universal'no-sbornykh perenalazhivaemykh prisposoblenij [Selection of Optimal Assembling of Universal-Modular Re-adjustable Attachments]. Vestnik mashinostroeniya, 2012, No. 3, pp. 3–9.
29. Karpus V.E., Ivanov V.A. Choice of Optimal Construction of Modular Reusable Fixtures. Russian Engineering Research, 2012, Vol. 32, Issue 3, pp. 213–219, doi: 10.3103/S1068798X12030124.
30. Karpus V.E. Optimizacija mehanichnoi obrobki til obertannja [Optimization of Manufacturing Processes of Rotational Parts]; edited by V. E. Karpus. Kharkiv, NTMT, 2012, 296 p., doi: 10.13140/RG.2.1.3518.8967.
31. Ivanov V., Dehtiarov I., Pavlenko I. Mathematical Model of the Fixture Flexibility Impact on Machining Accuracy of Levers. Acta Mechanica Slovaca, 2016, Vol. 20, Issue 2, pp. 6–15.
32. Pavlenko I.V., Ivanov V.O. Zabezpechennja umov stijkosti zagotovki u verstatnomu pristroji zi shemoju bazuvannja za tr'oma ploschhinami [Ensuring of the Workpiece Stability Conditions in the Fixture with Locating Scheme on Three Planes]. Sumy, Visnik SNAU [Bulletin of Sumy National Agrarian University], 2015, No. 11 (27), pp. 23–26.
33. Ivanov V.O., Pavlenko I.V. Ocinjuvannja nelinejnoi zhorstkosti funkcional'nih elementiv verstatnih pristroiv [Estimation of Nonlinear Stiffness of Functional Elements of Fixtures]. Mashinobuduvannya ochima molodih: progresivni idei – nauka – virobnictvo : tezi dopovidej Desjatoj vseukr. molod. naukovo-tehn. konf., 26–29 zhovtnja 2016 r., Sumy [Proc. of 16th Int. Scientific and Technical Conf.]. Sumy, Sumy State University, 2010, pp. 23–24.
34. Kurilov B.M., Pavlenko I.V., Ivanov V.O. Zastosuvannja komp'yuternih zasobiv dlja doslidzhenja dinamiki mehanichnoi sistemi «verstatnij pristirij – zagotovka» [Using Computer Applications for Investigation of the Dynamics of Mechanical System “Fixture – Workpiece”]. Suchasni tehnologii u promisl'ovomu virobnictvi: mater. nauk.-tehn. konf. vkladachiv, spivrobotnikov, aspirantiv i studentiv fakul'tetu tehnicnih sistem ta energoefektivnih tehnologii : u dvoh chastinah, 18–21 kvitnja 2017 r., Sumy [Proc. of Scientific and Technical Conf.]. Sumy, Sumy State University, 2017, Vol. 1, p. 149.
35. Pavlenko I.V., Ivanov V.A., Kurilov B.N. et al. Matematicheskaja model' dinamiki sistemy «stanochnoe prisposoblenie – zagotovka» na primere shemy bazirovanija po trjom ploskostjam [Mathematical Model of the Dynamics of Mechanical System “Fixture – Workpiece” with Locating Scheme on Three Planes]. Bezopasnost' i proektirovanie konstrukcij v mashinostroenii [Safety and Construction Design in Manufacturing Engineering]. Kursk, South-West State University, 2015, pp. 119–122.
36. Ivanov V.A., Pavlenko I.V., Kurilov B.N. et al. Garmonicheskij analiz sistemy «stanochnoe prisposoblenie – zagotovka» na primere shemy bazirovanija po trjom ploskostjam [Harmonic Analysis of the system “Fixture – Workpiece” with Locating Scheme on Three Planes]. Innovacii v metalloobrabotke: vzgljad molodyh specialistov [Innovations in Machining: Opinion of Young Specialists]. Kursk, South-West State University, 2015, pp. 158–161.
37. Ivanov V., Vashchenko S., Rong Y. Information Support of the Computer-aided Fixture Design System. Proc. of 12th Int. Conf. ICTERI'2016, Kyiv, Ukraine, June 21–24, 2016, CEUR-WS.org, online CEUR-WS.org/Vol-1614/paper_37.pdf.

Поступила (received) 03.04.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Структурно-функціональне моделювання процесу проектування верстатних пристроїв / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, С. М. Ващенко, Й. Заяць, А. І. Кармаза // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 30–37. – Бібліогр.: 37 назв. – ISSN 2079-004X.

Структурно-функциональное моделирование процесса проектирования станочных приспособлений / В. А. Иванов, В. Е. Карпусь, С. М. Ващенко, Й. Заяць, А. И. Кармаза // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 30–37. – Библиогр.: 37 назв. – ISSN 2079-004X.

Structural-functional simulation of fixture design / V. Ivanov, V. Karpus, S. Vashchenko, J. Zajac, A. Karmaza // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P. 30–37. – Bibliogr.: 37. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Іванов Віталій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету, м. Суми; тел.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua.

Иванов Виталий Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, станков и инструментов Сумского государственного университета, г. Сумы; тел.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua.

Ivanov Vitalii Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools of Sumy State University, Sumy; tel.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua.

Карпуть Владислав Євгенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків.

Карпуть Владислав Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной механики, Национальной академии Национальной гвардии Украины, г. Харьков.

Karpus Vladyslav Evhenovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering of National Academy of National Guard of Ukraine, Kharkiv.

Ващенко Світлана Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету, м. Суми.

Ващенко Светлана Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных наук Сумского государственного университета, г. Сумы.

Vashchenko Svitlana Mykhailivna – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of Department of Computer Sciences of Sumy State University, Sumy.

Йожеф Заяць – кандидат технічних наук, професор, декан факультету виробничих технологій Технічного університету м. Кошице, м. Прешов.

Йожеф Заяць – кандидат технических наук, профессор, декан факультета производственных технологий Технического университета г. Кошице, г. Прешов.

Jozef Zajac – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Professor, Dean of the Faculty of Manufacturing Technologies of Technical University of Kosice, Presov.

Кармаза Андрій Іванович – студент факультету технічних систем та енергоефективних технологій Сумського державного університету, м. Суми.

Кармаза Андрей Иванович – студент факультета технических систем и энергоэффективных технологий Сумского государственного университета.

Karmaza Andrii Ivanovych – MSc student of the Faculty of Technical Systems and Energy Efficient Technologies of Sumy State University, Sumy.

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, О. С. КЛЕНОВ**УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ И ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Наведено аналітичні залежності для визначення основних параметрів силової напруженості процесу різання: складових сили різання, енергоємності обробки, умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу, що дозволило визначити умови підвищення продуктивності лезової та абразивної обробки. Показано, що чим більше умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу, тим менше складові сили різання, енергоємність обробки та вище продуктивність обробки. Тому при лезовій обробці можна досягти значно більшої продуктивності, ніж при абразивній обробці в зв'язку з меншими значеннями інтенсивності тертя в зоні різання, енергоємності обробки та радіальної складової сили різання.

Ключові слова: процес різання, лезова обробка, абразивна обробка, складові сили різання, енергоємність обробки, продуктивність обробки.

Приведены аналитические зависимости для определения основных параметров силовой напряженности процесса резания: составляющих силы резания, энергоёмкости обработки, условного угла сдвига обрабатываемого материала, что позволило определить условия повышения производительности лезвийной и абразивной обработки. Показано, что чем больше условный угол сдвига обрабатываемого материала, тем меньше составляющие силы резания, энергоёмкость обработки и выше производительность обработки. Поэтому при лезвийной обработке можно достичь значительно большей производительности, чем при абразивной обработке в связи с меньшими значениями интенсивности трения в зоне резания, энергоёмкости обработки и радиальной составляющей силы резания.

Ключевые слова: процесс резания, лезвийная обработка, абразивная обработка, составляющие силы резания, энергоёмкость обработки, производительность обработки

Analytical dependences are given to determine the main parameters of the strength of the cutting process: the components of the cutting force, the energy intensity of the treatment, the conventional shear angle of the processed material, which made it possible to determine the conditions for improving the productivity of blade and abrasive processing. It is shown that the greater the relative shear angle of the processed material, the smaller the components of the cutting force, the energy intensity of the treatment, and the higher the processing capacity. Therefore, with blade cutting, a much higher productivity can be achieved than with abrasive treatment due to the lower values of the friction intensity in the cutting zone, the energy intensity of the treatment, and the radial component of the cutting force.

Key words: cutting process, blade processing, abrasive machining, cutting force components, power consumption of processing, processing capacity

Постановка проблемы. В настоящее время на практике широко используются методы лезвийной и абразивной обработки. При этом все чаще на операциях предварительной обработки применяются методы шлифования, вытесняя традиционные методы лезвийной обработки, а на операциях окончательной обработки, наоборот, вместо абразивной обработки применяют лезвийную обработку, обеспечивая более высокие показатели качества и точности обрабатываемых поверхностей деталей. Такой выбор методов обработки обусловлен их технологическими возможностями, определяемыми главным образом энергоёмкостью и производительностью обработки. Поэтому их знание открывает новые перспективы развития технологии машиностроения, связанные с применением современных металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и прогрессивных конструкций инструментов с износостойкими покрытиями. В связи с этим в работе предложен новый теоретический подход к определению и анализу условий уменьшения силовой напряженности процессов резания лезвийными и абразивными инструментами и повышения производительности обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1- 3, 7] приведены методики определения параметров силовой напряженности процесса резания, основанные на результатах экспериментальных исследований, которые справедливы для частных условий обработки и не позволяют в обобщенном виде произвести расчет таких параметров силовой напряженности процесса резания, как составляющие силы резания, энергоёмкость обработки, коэффициент усадки стружки и др. Это затрудняет анализ техно-

логических закономерностей процесса резания и условий повышения его эффективности. Особо это относится к высокоточной обработке ответственных деталей, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Поэтому установление указанных аналитических зависимостей имеет большое теоретическое и практическое значение при решении задач повышения точности, качества и производительности механической обработки.

Цель работы – теоретическое определение и анализ условий уменьшения энергоёмкости и повышения производительности механической обработки и на их основе обоснование наиболее эффективных направлений применения методов лезвийной и абразивной обработки.

Основной материал. В работе разработана математическая модель механики процесса резания, позволяющая с единых позиций оценить технологические возможности повышения производительности и качества обработки. На основе аналитического определения и анализа параметров силовой напряженности процесса резания обоснованы условия повышения его эффективности.

Предположим, что на обрабатываемый материал со стороны движущегося инструмента действует система двух сил, состоящая из тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания (рис. 1,а).

Под действием этих сил обрабатываемый материал деформируется. В нем возникают касательные напряжения τ в плоскостях, расположенных под углом β к направлению движения инструмента. Для определе-

© Ф.В. Новиков, О.С. Кленов, 2017

ния положения плоскости, в которой касательное напряжение τ максимально и в которой произойдет сдвиг материала, необходимо спроецировать составляющие силы резания P_z и P_y на плоскость, расположенную под углом β , и определить касательное напряжение:

$$\tau = \frac{\sin \beta}{a \cdot \delta} \cdot (P_z \cdot \cos \beta - P_y \cdot \sin \beta), \quad (1)$$

где a, δ – толщина и ширина среза, м.

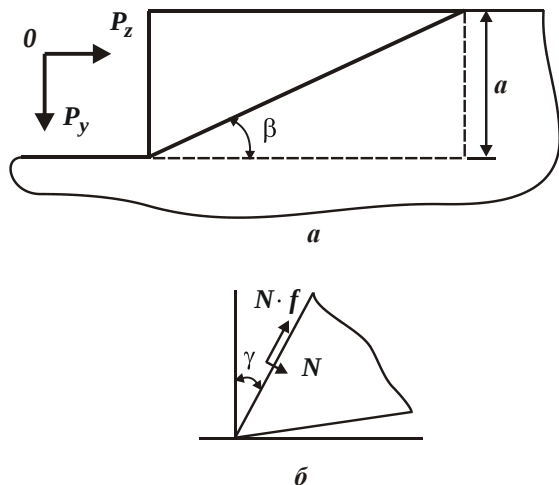


Рис. 1 – Расчетная схема параметров стружкообразования: а – при резании; б – схема сил, действующих на передней поверхности инструмента

С учетом $K_{pez} = P_z / P_y$ получено:

$$\tau = \frac{P_y}{a \cdot \delta} \cdot (0,5 \cdot K_{pez} \cdot \sin 2\beta - \sin^2 \beta). \quad (2)$$

Касательное напряжение τ имеет максимум от угла β . Поэтому, подчиняя функцию τ условию экстремума $\tau'_{\beta} = 0$, получена зависимость для определения экстремального значения угла β – условного угла сдвига обрабатываемого материала:

$$\operatorname{tg} 2\beta = K_{pez}. \quad (3)$$

С увеличением угла β коэффициент резания K_{pez} неограниченно увеличивается. При условии $\beta \rightarrow 45^\circ$ имеем $K_{pez} \rightarrow \infty$, что соответствует условию одноосного сжатия снимаемого припуска (в виде прямолинейного бруса) продольной силой P_z .

С учетом соотношения $\operatorname{tg} 2\beta = \frac{\sin 2\beta}{\sqrt{1 - \sin^2 2\beta}}$ и (3)

зависимость (2) можно преобразовать:

$$K_{pez}^2 \cdot (1 - \sin^2 2\beta) = \sin^2 2\beta, \quad (4)$$

откуда

$$\sin 2\beta = \frac{K_{pez}}{\sqrt{1 + K_{pez}^2}}; \quad (5)$$

$$\sin^2 \beta = \frac{\left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 2\beta}\right)}{2} = \frac{\left(1 - \sqrt{1 - \frac{K_{pez}^2}{1 + K_{pez}^2}}\right)}{2}. \quad (6)$$

Подставляя зависимости (5) и (6) в (2), после преобразования получено:

$$\tau = \frac{P_y}{2 \cdot a \cdot \delta} \cdot \left(\sqrt{1 + K_{pez}^2} - 1\right). \quad (7)$$

Умножая числитель и знаменатель зависимости (7) на сопряженную величину $\left(\sqrt{1 + K_{pez}^2} + 1\right)$, имеем:

$$\tau = \frac{P_y}{2 \cdot a \cdot \delta} \cdot \frac{K_{pez}^2}{\left(1 + \sqrt{1 + K_{pez}^2}\right)}. \quad (8)$$

Принимая условие $\tau = \tau_{cd\delta}$ из зависимости (8) определяется радиальная составляющая силы резания:

$$P_y = \frac{2 \cdot a \cdot \delta \cdot \tau_{cd\delta}}{K_{pez}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pez}^2}\right), \quad (9)$$

где $\tau_{cd\delta}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг, Н/м².

Соответственно тангенциальная составляющая силы резания P_z и условное напряжение резания σ (энергоемкость обработки) аналитически опишутся:

$$P_z = K_{pez} \cdot P_y = \frac{2 \cdot a \cdot \delta \cdot \tau_{cd\delta}}{K_{pez}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pez}^2}\right); \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{P_z}{a \cdot \delta} = \frac{2 \cdot \tau_{cd\delta}}{K_{pez}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pez}^2}\right), \quad (11)$$

где $\sigma_{сж} \approx 2 \cdot \tau_{cd\delta}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м².

Коэффициент резания K_{pez} может изменяться в широких пределах: $0 < K_{pez} < \infty$. При резании абразивным инструментом $K_{pez} < 1$, при резании лезвийным инструментом $K_{pez} \geq 1$. С увеличением K_{pez} , исходя из зависимости (11), условное напряжение резания σ (энергоемкость обработки) уменьшается.

Для условия $K_{pez} < 1$ имеем:

$$\sigma = \frac{\tau_{cd\delta}}{K_{pez} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot \sqrt{1 + K_{pez}^2}} - \frac{1}{(4 + K_{pez}^2)} \right]}. \quad (12)$$

Как видно, уменьшить условное напряжение резания σ можно увеличением коэффициента резания $K_{рез}$. Таким образом показано, что условное напряжение резания σ (энергоемкость обработки) зависит от коэффициента резания $K_{рез}$ и предела прочности обрабатываемого материала на сдвиг $\tau_{сдв}$.

С учетом тригонометрического соотношения $tg 2\beta = \frac{2 \cdot tg \beta}{1 - tg^2 \beta}$ и зависимости (3) условное напряжение резания σ (энергоемкость обработки), описываемое зависимостью (11), принимает упрощенный вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{tg \beta}. \quad (13)$$

Как видно, энергоемкость обработки σ вполне однозначно определяется условным углом сдвига обрабатываемого материала β : чем он больше, тем меньше σ , что согласуется с известными экспериментальными данными.

Коэффициент резания $K_{рез}$ можно выразить через силы N и $N \cdot f$, возникающие на передней поверхности инструмента (рис. 1, б, рис. 2):

$$\begin{cases} P_z = N \cdot \cos \gamma + N \cdot f \cdot \sin \gamma \\ P_y = N \cdot \sin \gamma + N \cdot f \cdot \cos \gamma \end{cases}, \quad (14)$$

где f – коэффициент трения;
 γ – передний угол инструмента.

Откуда

$$K_{рез} = \frac{1 + f \cdot tg \gamma}{f - tg \gamma}. \quad (15)$$

С увеличением переднего угла инструмента γ и уменьшением коэффициента трения f (учитывая доминирующую роль знаменателя в зависимости (15)) коэффициент резания $K_{рез}$ увеличивается, что приводит к уменьшению σ . Этим показано, что наиболее энергоемкими являются процессы абразивной обработки, характеризующиеся небольшими значениями $K_{рез} < 1$ вследствие отрицательных передних углов режущих зерен. Процессы лезвийной обработки менее энергоемки.

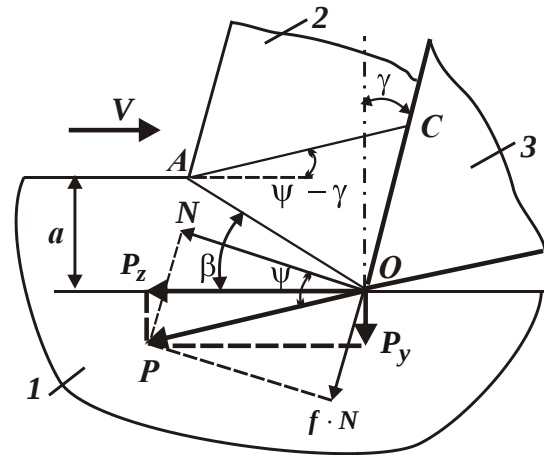


Рис. 2 – Расчетная схема параметров стружкообразования при резании: 1 – обрабатываемый материал; 2 – образующая стружка; 3 – режущий инструмент

Наименьшей энергоемкостью обладают процессы обработки металлов давлением. Теоретические результаты согласуются с экспериментальными данными. Например, по данным Швеца В. В. (табл. 1 [4]), энергия, затрачиваемая на сьем материала, меньше, а производительность обработки больше при резании лезвийным инструментом. По мере уменьшения отношения a_z / R (где a_z – толщина среза, м; R – радиус округления режущей кромки инструмента, м), т.е. с переходом от точения к разворачиванию и шлифованию, энергия, затрачиваемая на сьем материала, увеличивается, что связано с ухудшением условий стружкообразования в процессе резания.

Операции обработки металлов давлением [4] характеризуются наименьшей энергоемкостью, что также согласуется с приведенными теоретическими результатами. С учетом $tg \psi = f$ зависимость (15) принимает вид:

$$K_{рез} = ctg(\psi - \gamma), \quad (16)$$

где ψ – условный угол трения на передней поверхности инструмента.

Сравнивая зависимости (3) и (16), получено:

$$\beta = 45^\circ + \frac{\gamma - \psi}{2}. \quad (17)$$

Эта зависимость совпадает с известной зависимостью для расчета условного угла сдвига материала, полученной профессором Зворыкиным К. А.

Таблица 1 – Характеристика типовых операций механической обработки

Операции	Площадь поперечного сечения срезаемого слоя, мм ²	Энергия, затрачиваемая на сьем металла, 10 ⁻³ Дж/см ³	Скорость резания, м/с	Производительность обработки, см ³ /с
Точение	1,0	0,5 – 0,7	1,5 – 7,5	5·10 ⁻² – 5·10
Протягивание	0,5	2,5 – 3,7	0,01 – 0,1	4·10 ⁻³ – 1·10 ⁻¹
Фрезерование	0,3	5,0 – 7,5	2 – 6	2·10 ⁻³ – 1
Разворачивание	0,1	12 – 30	0,15 – 1,6	5·10 ⁻³ – 5·10 ⁻¹
Шлифование	0,00005	55 – 70	25 – 50	5·10 ⁻³ – 2·10 ⁻²

Согласно зависимости (16), добиться выполнения условия $K_{рез} \rightarrow \infty$ и, следовательно, наименьшего значения $\sigma \rightarrow 2 \cdot \tau_{сдв}$ можно при условии $\gamma \rightarrow \psi$.

Исходя из зависимостей $P_z = \sigma \cdot Q/V$ и (11), можно определить производительность обработки:

$$Q = \frac{P_z \cdot V}{2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \frac{K_{рез}}{\left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right)}. \quad (18)$$

Как видно, для увеличения производительности обработки Q необходимо увеличивать параметры P_z , V и $K_{рез}$. Однако увеличение тангенциальной составляющей силы резания P_z ограничено прочностью инструмента, а увеличение скорости резания V – его стойкостью в связи с увеличением температуры резания. Коэффициент резания $K_{рез}$ практически неограничен и изменяется в широких пределах $0 < K_{рез} < \infty$. При этом производительность обработки Q с увеличением коэффициента резания $K_{рез} \rightarrow \infty$ непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению

$$Q_{max} = \frac{P_z \cdot V}{2 \cdot \tau_{сдв}} = \frac{N}{2 \cdot \tau_{сдв}} = \frac{N}{\sigma_{сж}}, \quad (19)$$

где $N = P_z \cdot V$ – мощность резания, Вт.

Следовательно, чем больше коэффициент резания $K_{рез}$, тем больше производительность обработки Q . Исходя из зависимости (15), это связано с выполнением условия $f \rightarrow \tan \gamma$. На рис. 3 приведены расчетные значения отношения

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{K_{рез}}{\left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right)}, \quad (20)$$

которые вполне однозначно определяются коэффициентом резания $K_{рез}$. Согласно зависимости (19), максимальная производительности обработки Q_{max} определяется мощностью резания N : чем больше N , тем больше Q_{max} (рис. 4).

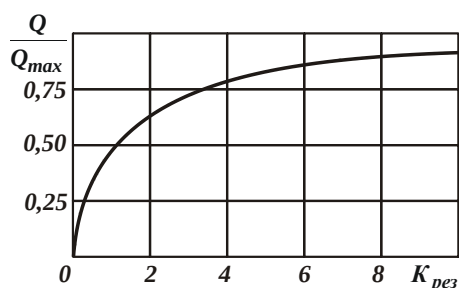


Рис. 3 – Зависимость отношения Q/Q_{max} от

коэффициента резания $K_{рез}$

Таким образом, добиться существенного увеличения производительности обработки Q можно в условиях резания лезвийными инструментами ($K_{рез} > 1$), управляя контактными процессами на рабочих поверхностях инструмента. При резании абразивными инструментами (при шлифовании) справедливо условие $K_{рез} < 1$, что ограничивает увеличение производительности обработки Q , которая в данном случае равна:

$$Q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{4 \cdot \tau_{сдв}} \cdot K_{рез}, \quad (21)$$

где $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

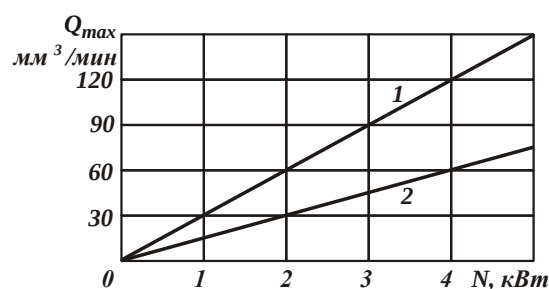


Рис. 4 – Зависимость максимальной производительности обработки Q_{max} от мощности резания N : 1 – $\sigma_{сж} = 2000$ Н/мм²; 2 – $\sigma_{сж} = 4000$ Н/мм²

Увеличить производительность обработки Q можно увеличением параметров P_z , $V_{кр}$ и $K_{рез}$. Зависимость (21) справедлива при шлифовании по жесткой схеме. При шлифовании по упругой схеме с учетом $P_z = P_y \cdot K_{рез}$, имеем:

$$Q = \frac{P_y \cdot V_{кр}}{4 \cdot \tau_{сдв}} \cdot K_{рез}^2. \quad (22)$$

Здесь роль коэффициента резания $K_{рез}$ усиливается, и производительность обработки Q зависит главным образом от $K_{рез}$.

Удельные составляющие силы резания описываются зависимостями:

$$P_{zуд} = \frac{P_z}{a \cdot v \cdot \sigma_{сж}} = \frac{1}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (23)$$

$$P_{yуд} = \frac{P_y}{a \cdot v \cdot \sigma_{сж}} = \frac{1}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right). \quad (24)$$

Из зависимостей (23) и (24) следует, что параметры $P_{zуд}$ и σ идентичны, т.к. описываются одной и той же зависимостью. Анализ рассчитанных на ос-

нове зависимостей (23) и (24) значений P_{zyd} и P_{yud} , которые приведены на рис. 5,а, показывает, что при условии $K_{рез} = 1$ параметры P_{zyd} и P_{yud} равны между собой, а при условии $K_{рез} < 1$ и $K_{рез} > 1$ справедливы условия $P_{zyd} < P_{yud}$ и $P_{zyd} > P_{yud}$.

Как известно, условие $K_{рез} < 1$ реализуется при абразивной обработке, а условие $K_{рез} > 1$ – при лезвийной обработке [5]. Следовательно, при абразивной обработке наибольшее влияние на технологические параметры процесса оказывает радиальная P_y составляющая силы резания, а при лезвийной обработке – тангенциальная P_z составляющая силы резания. При этом составляющие силы резания при лезвийной обработке ($K_{рез} > 1$) меньше, чем при абразивной обработке ($K_{рез} < 1$), что свидетельствует о возможностях повышения точности и качества обработки при резании лезвийными инструментами. Это обусловлено меньшими значениями энергоемкости обработки $\sigma = P_{zyd}$, которая при условии $K_{рез} \rightarrow \infty$ стремится принять значения $\sigma_{сж}$. В этом случае условия стружкообразования соответствуют условиям разрушения прямолинейного образца при его сжатии. С учетом формулы профессора Тиме А. Н.:

$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma}$ зависимость (22) выразится:

$$\sigma = \sigma_{сж} \cdot \frac{(K_L - \sin \gamma)}{\cos \gamma}, \quad (25)$$

где K_L – коэффициент усадки стружки.

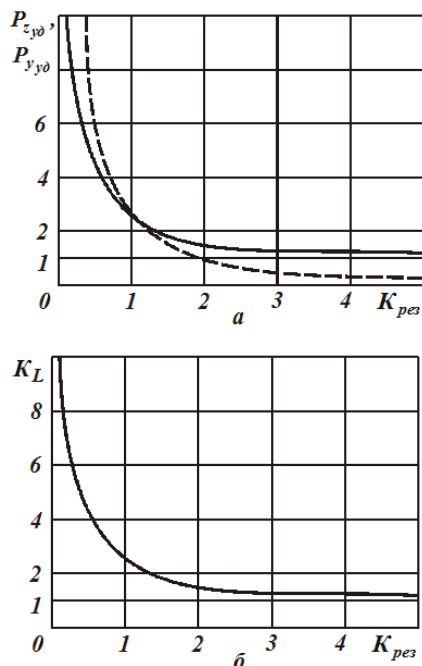


Рис. 5– Зависимости P_{zyd} (сплошная линия) и P_{yud} (пунктирная линия) от: а – $K_{рез}$ и K_L ; б – $K_{рез}$

Поскольку $K_L \gg \sin \gamma$, а $\cos \gamma \approx 1$, то зависимость (25) в первом приближении может быть упрощена и представлена в виде:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{сж}} = K_L. \quad (26)$$

Таким образом показано, что энергоемкость обработки σ определяет коэффициент усадки стружки K_L : чем больше σ , тем больше K_L .

Подставляя зависимость (22) в (26), имеем:

$$K_L = \frac{1}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2} \right). \quad (27)$$

Откуда

$$K_{рез} = \frac{2 \cdot K_L}{(K_L^2 - 1)}. \quad (28)$$

На рис. 5,б приведены рассчитанные по зависимости (27) значения K_L . Как видно, коэффициент усадки стружки K_L резко уменьшается в диапазоне $K_{рез} < 1$ и незначительно изменяется в диапазоне $K_{рез} > 1$, неограниченно приближаясь к значению $K_L \rightarrow 1$. Следовательно, основные изменения K_L происходят в диапазоне $K_{рез} < 1$.

Исходя из приведенной зависимости $K_{рез} = P_z / P_y = \operatorname{tg} 2\beta = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma)$, уменьшение коэффициента резания $K_{рез}$ связано с уменьшением условного угла сдвига обрабатываемого материала β за счет увеличения разности углов $(\psi - \gamma)$, т.е. увеличения условного угла трения на передней поверхности инструмента ψ и уменьшения переднего угла инструмента γ . В особой мере это проявляется при шлифовании, когда угол γ становится отрицательным и зависимость для определения коэффициента резания принимает вид $K_{рез} = P_z / P_y = \operatorname{tg} 2\beta = \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)$. В этом случае с увеличением угла $(\psi + \gamma)$ коэффициент резания $K_{рез} \rightarrow 0$. этим объясняется более высокие значения составляющих силы резания P_z и P_y , энергоемкости обработки σ и соответственно коэффициента усадки стружки K_L , которые имеют место на практике при шлифовании. Исходя из сказанного, основными путями увеличения коэффициента резания $K_{рез}$ и соответственно уменьшения параметров силовой напряженности процесса резания P_z , P_y , σ и K_L являются уменьшение угла ψ и увеличение положительного угла γ (при лезвийной обработке) и уменьшение отрицательного угла γ (при абразивной обработке). При резании алмазным лезвийным инструментом, характеризующимся наименьшим коэффициентом трения на передней поверхности инструмента, раз-

ность углов ($\psi - \gamma$) может быть существенно уменьшена, что приводит к увеличению коэффициента резания $K_{рез}$ и снижению параметров силовой напряженности процесса резания P_z , P_y , σ и K_L .

Заслуживает внимания факт, что значениям $K_L > 2$ соответствуют значения $K_{рез} < 1$. В этом случае $P_z < P_y$, что согласуется с результатами экспериментальных исследований при шлифовании. Однако при точении наблюдается противоположная закономерность: $P_z > P_y$ при $K_L > 2$ [1]. Данное несоответствие теоретических и экспериментальных результатов связано с тем, что тангенциальная составляющая силы резания P_z , описываемая зависимостью (18), определяет лишь условие сдвига обрабатываемого материала в условной плоскости сдвига и не учитывает трение сходящей стружки с передней поверхностью инструмента, тогда как экспериментально установленная тангенциальная составляющая силы резания P_z является результирующей, учитывающей как условия сдвига обрабатываемого материала в условной плоскости сдвига, так и процесс трения на передней поверхности инструмента.

В отличие от тангенциальной составляющей силы резания P_z , радиальная составляющая силы резания P_y , описываемая зависимостью (21), приблизительно равна ее экспериментальному значению. Поэтому между составляющими силы резания P_z и P_y , описываемыми зависимостями (18) и (21), существует сложная связь $P_z / P_y = K_{рез}$, где коэффициент резания $K_{рез}$ может принимать значения $K_{рез} < 1$ и $K_{рез} > 1$. Экспериментально установлено, что $P_z / P_y = 1/f$, где f – коэффициент трения сходящей стружки с передней поверхностью резца ($f < 1$). Следовательно, при точении $P_z > P_y$, что соответствует условию $K_{рез} > 1$. Этим показано, что процесс резания подчиняется более сложным закономерностям и не может быть однозначно представлен экспериментально установленными составляющими силы резания, которые учитывают процессы резания и трения при стружкообразовании.

На основе проведенного анализа можно заключить, что основным условием повышения коэффициента резания $K_{рез} > 1$ и в целом эффективности обработки является уменьшение радиальной составляющей силы резания P_y , которая обусловлена интенсивным трением сходящей стружки с передней поверхностью резца [6]. Это может быть достигнуто различными способами дробления стружки в зоне резания, снижением коэффициента трения обрабатываемого и инструментального материалов, применением так называемого косоугольного резания, обеспечивающего изменение угла схода стружки и т.д. необходимо отметить, что в настоящее время на практике имеется большой арсенал технических решений

по уменьшению радиальной составляющей силы резания P_y . Однако, все они основаны на эмпирическом представлении процесса резания, что не позволяет в полной мере раскрыть физические закономерности и технологические возможности процесса резания. Поэтому предложенная в работе математическая модель механики процесса резания позволит в определенной степени ликвидировать имеющийся дисбаланс между теорией и практикой процесса резания и выявить новые технологические возможности повышения его эффективности.

Выводы. В работе получены аналитические зависимости для определения основных параметров силовой напряженности процесса резания: составляющих силы резания, энергоемкости обработки, условного угла сдвига обрабатываемого материала, что позволило определить условия повышения производительности лезвийной и абразивной обработки. Показано, что чем больше условный угол сдвига обрабатываемого материала, тем меньше составляющие силы резания, энергоемкость обработки и соответственно выше производительность обработки. Поэтому при лезвийной обработке можно достичь значительно большей производительности, чем при абразивной обработке в связи с меньшей энергоемкостью обработки. Теоретически установлено, что основным путем снижения силовой напряженности процесса резания и повышения производительности обработки является улучшение условий стружкообразования в процессе резания за счет уменьшения радиальной составляющей силы резания, используя различные способы дробления образующейся стружки, снижая интенсивность трения обрабатываемого и инструментального материалов, изменяя угол схода стружки с передней поверхности резца и т.д.

Список литературы

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
2. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н. Зорев. – М.: Машгиз, 1956. – 368 с.
3. Линчевский П. А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П. А. Линчевский, Т. Г. Джугурян, А. А. Оргиян. – К.: Техника, 2001. – 300 с.
4. Швец В. В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения / В. В. Швец. – М.: Машиностроение, 1967. – 63 с.
5. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
6. Новиков Ф.В. Теоретическое обоснование условий повышения эффективности высокоскоростной обработки / Ф.В. Новиков, О.С. Кленов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – №42 (1085). – С. 106–111.
7. Добротворский С. С. Энергетический подход к определению технологических режимов при высокоскоростной обработке / С. С. Добротворский, А.К. Мяслица, Е.В. Басова [и др.] // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Харьков: НАУ "ХАИ", 2014. – № 65. – С. 69–74.

References (transliterated)

1. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov. Moscow. 1975. 344 p.
2. Zorev N.N. Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov. Moscow. Mashgiz. 1956. 368 p. Print.
3. Linchevskiy P. A., Dzhuguryan, T. G., Orgiyan A. A. Obrabotka detaley na otdelochno-rastochnykh stan-kakh. Kie. Tekhnika. 2001. 300 p. Print.
4. Shvets V. V. Nekotoryye voprosy teorii tekhnologii mashinostroyeniya. Moscow. Mashinostroyeniye. 1967. 63 p. Print.

5. A. V. Yakimov, F. V. Novikov, G. V. Novikov, B. S. Serov, A.A. Yakimov. Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov: ucheb. Posobiye. Odessa. OGPU 1999. 450 p. Print.
6. Novikov F.V., Klenov O.S. Teoreticheskoe obosnovanie usloviy povysheniya effektivnosti vysokoskorostnoy obrabotki. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Tekhnologiy v mashinobuduvanni. – Kharkiv: NTU "KhPI". 2014. – №42 (1085). – pp. 106–111.
7. Dobrotvorskyi S. S., Mialytsa A.K., Basova E.V. Energeticheskij podxod k opredeleniyu texnologicheskix rezhimov pri vysokoskorostnoj obrabotke [Energy approach to the definition of technological regimes in HSM]. Kharkov, Nats. aero-kosm. un-t «Khark. aviats. in-t», 2014, No 65, pp. 69-74.

Поступила (received) 20.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Умови зменшення енергоємності та підвищення продуктивності механічної обробки / Ф. В. Новіков, О. С. Кленов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 38–44. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Условия уменьшения энергоемкости и повышения производительности механической обработки / Ф. В. Новиков, О.С. Кленов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 38–44. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Conditions for reducing energy intensity and increasing the productivity of machining / F. Novikov, O. Klenov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.38–44. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

Novikov Fedor Vasiliviyth – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

Кленов Олег Станіславович – кандидат технічних наук, директор, Фірма «ДіМерус Інженерінг» ТОВ, м. Харків; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com;

Кленов Олег Станиславович – кандидат технических наук, директор, Фирма «ДиМерус Инженеринг» ООО, г. Харьков; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com;

Klenov Oleg Stanislavovith – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), director of the firm "DiMerus Engineering" Ltd, Kharkiv; tel.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com.

УДК 621.865.8

О.С. КОВАЛЕВСЬКА**ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ВЕРСТАТИВ – РОБОТІВ**

Пропонується для системного динамічного моделювання мехатронних систем використовувати комплексну платформу Lab AMESim. При занесенні всіх даних і побудові ескізу отримана симуляційна модель. Відпрацювання переміщень платформи налаштовано в командному блоці, що пов'язаний з вихідними параметрами всіх блоків та керується кроковими електродвигунами приводів. Показано, що платформа, завдяки використанню восьми опорних точок рухається плавно і не змінює свого положення щодо осі z, тобто взаємодія восьми приводів працює злагоджено.

Ключові слова: мехатронні системи, моделювання, верстат, приводи.

Предлагается для системного динамического моделирования мехатронных систем использовать комплексную платформу Lab AMESim. При занесении всех данных и построении эскиза получена симуляционная модель. Отработка перемещений платформы настроена в командном блоке, который связан с исходными параметрами всех блоков и руководствуется шаговыми электродвигателями приводов. Показано, что платформа, благодаря использованию восьми опорных точек движется плавно и не меняет своего положения относительно оси z, то есть взаимодействие восьми приводов работает слаженно.

Ключевые слова: мехатронные системы, моделирование, станок, приводы.

Using an integrated platform Lab AMESim for system dynamic modeling of mechatronic systems is proposed. When entering all the data obtained and the construction sketch simulation model. Train movement platform set up command unit associated with the original parameters of all blocks and operated stepper motor drives. Showing platform, thanks to eight control points move smoothly and does not change its position relative to the axis z, that interaction drives eight runs smoothly.

Keywords: mechatronic systems, modeling, machine tool, drives.

Вступ. В наш час в різних галузях промисловості при створенні технічного рішення, починаючи від області космонавтики і авіації аж до автомобілебудування використовується металообробне обладнання [1]. Будь то розробка нових агрегатів або систем і складних технічних об'єктів необхідно використовувати математичне моделювання.

Одним із суттєвих підходів до процесу проектування технічних об'єктів є використання CAE-пакетів для моделювання фізико - технічних об'єктів та систем, таких як: LMS Imagine.Lab AMESim [2-5], Automation Studio [6], Modelica[7], MapleSim [8], SimulationX, MATLAB Simulink і SolidWorks, в яких розрахунки проєктованих моделей проводяться з допомогою числових методів рішення диференціальних рівнянь.

Серед CAE- пакетів, представлених на ринку, можна відмітити пакет AMESim. Щодо інших популярних програм, таких як MATLAB і SolidWorks, то вони потребують більше часу для отримання готового рішення.

LMS Imagine. Lab AMESim – комплексна платформа 1D багато дисциплінарного системного моделювання мехатронних систем. Платформа дозволяє оцінити функціональні вимоги на початковій стадії проєктування виробу або системи та закінчуючи стадією доводки. Можливість об'єднання в рамках однієї моделі елементів систем різної фізичної природи, або іншими словами, багато дисциплінарний підхід, суттєво облегшує і пришвидшує процес моделювання. Необхідно лише задати зв'язки між досліджуваними елементами системи. Комплект великої кількості спеціалізованих бібліотек компонентів дозволяє скоротити витрати часу і зусиль при розробці нового виробу. Ще до початку проведення випробувань прототипу визначаються найбільш оптимальні параметри.

Провідні постачальники і розробники в автомобільній і аерокосмічній галузях промисловості, а також підприємствами загального машинобудування вибрали програмну платформу LMS Imagine.Lab AMESim як основу для функціонального моделювання. Список користувачів програмної платформи включає такі компанії як: General Motors, Toyota, Renault, PSA Peugeot Citroen, Bosch, Siemens, Delphi, Airbus, Embraer, Dassault, Snecma, Caterpillar, Komatsu, CNH та ін. Є великий набір рішень, сконцентрований на можливостях моделювання для оцінки поведінки певних функціональних підсистем та для проведення функціонального аналізу двигунів внутрішнього згоряння, трансмісій, систем термобаланс, динаміки автомобіля, гідро- газодинамічних систем, навантажень на шасі літака, систем управління польотом і електричних систем.

Інтерактивна графічне середовище AMESim дозволяє будувати складні мульти-фізичні системні моделі. Отримана схема легко читається і представляє логічну інтерпретацію досліджуваної системи. Основа AMESim становить колекція компонентів з різних фізичних областей. Процес моделювання в AMESim гранично простий і заснований на використанні стандартних блоків - фізичних моделей типових елементів (таких як, наприклад, гідроциліндр, електродвигун або термостат). AMESim повністю звільняє користувача від необхідності створення аналітичних моделей, написання скриптів або програмування, і забезпечує безпосереднім інструментом для аналізу та оптимізації проєктного рішення.

Архітектура AMESim дозволяє реалізувати технічне рішення за чотири кроки: в режимі ескізу відбувається побудова ескізу моделі з готових блоків, наявних в бібліотеці; режим під моделі дозволяє обирати під моделі для компонентів системи; в режимі параметрів задаються відомі параметри під моделей;

режим симуляції виконує обробку даних і отримання результатів.

Матеріал і результати дослідження. Завдяки наявності в AMESim різноманітних бібліотек для динамічного моделювання, даний програмний пакет був використаний для побудови ескізу приводу верстата - робота (рис.1), с подальшим складанням ескізу верстата - робота повністю.

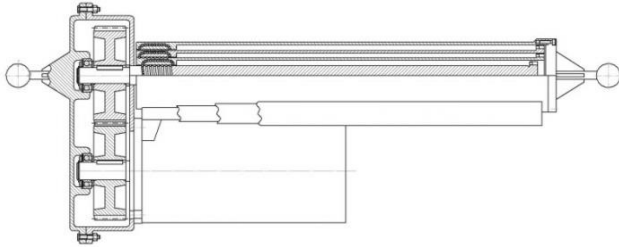


Рис. 1 - Ескіз приводу верстата-робота

Процес моделювання системи складається з створення ескізу системи, призначення під моделей компонентів, завдання параметрів і запуску симуляції. Кожен крок виконується в певному робочому режимі:

1. Режим ескізу (Sketch mode) - перший крок побудови моделі, в якому на робочому полі збирається модель системи з елементів бібліотек. Режим ескізу дозволяє створити нову систему, змінити або завершити існуючу, видалити компоненти.

2. Режим під моделі (Submodel mode) передбачає процес призначення під моделей обраним компонентами (рівень математичного опису процесів, що відбуваються в компонентах). Можна скористатися функцією Premier submodel - автоматичне призначення головних (елементарних) під моделей.

3. Режим параметрів (Parameter mode) дозволяє задавати і змінювати параметри, копіювати параметри під моделей, встановлювати глобальні параметри (Global parameters), відображати основні параметри обраної області ескізу, вибирати серійний запуск (Batch gun). Коли параметри задані, AMESim компілює систему. При цьому створюється виконуваний файл. Цей файл робить симуляцію можливою.

4. Режим симуляції (Simulation mode) дозволяє запустити стандартну або серійну симуляцію, створювати, зберігати і завантажувати графіки, почати лінеаризацію системи, провести її аналіз.

Треба відмітити, що якщо потрібно, можливо створити моделі компонентів, які будуть повністю сумісні з існуючими моделями, та готові для повторного використання у складі бібліотек, що настраюються. Наявні бібліотеки стосуються систем управління (Signal, Control & Observers), електромеханічних систем (електричні двигуни і приводи, електротехніки, електромеханіка), двигунів (компоненти IFP *: IFP Drive, IFP Engine, IFP Exhaust, IFP C3D), течії рідини і газів (гідраліка, гідралічні компоненти, гідралічний опір, наповнення, пневматика, пневмо-компоненти, газодинаміка), механіки (одновимірна механіка, двовимірна механіка, трансмісія, динаміка автомобіля), термодинаміки і теплопередачі (теплові моделі, термо-гідраліка, термо-гідралічні компоненти, термо-пневматика, двофазне протягом, системи кондиціонування, системи охолодження,

теплообмінники). Авторами була вибрана бібліотека механіки.

Для побудови ескізу приводу в AMESim використовувались сигнальний блок, який отримує параметри для керування механічним блоком від вхідних параметрів, а також блок механічних 3D елементів для відображення зібраної в режимі ескізу моделі та її симуляції в режимі симуляції і отримання результатів.

Всі елементи системи розташовані в бібліотеці Mechanical, котра визначена зеленим кольором. Якщо використовується кілька бібліотек, тому обрані елементи мають різний колір. Зафарбований фон свідчить про те, що у цього елемента ще не з'єднані всі доступні порти для підключення до інших елементів. Обрані елементи можна обертати за часовою стрілкою, дзеркально відображати та змінювати положення у просторі. Точки, в яких елементи з'єднуються називаються портами. Якщо, при з'єднанні елементи виділяються зеленим кольором, це означає, що ескіз не завершений. Наявність зелених квадратиків у портів, що з'єднуються, говорить про те, що ці порти мають однаковий тип. Тобто лінії передачі фізичних змінних між елементами ідентичні і сумісні і можуть бути з'єднані. У випадках, коли система, що моделюється, громіздка і немає можливості безпосередньо з'єднати два елементи, можна з'єднати їх за допомогою ліній, при цьому колір лінії, що з'єднує буде відповідати кольору бібліотеки або розділу, до якого відноситься тип фізичної лінії.

Використовуючи ті ж самі бібліотеки, що і для побудови ескізу приводу була побудована вся конструкція станка-робота (рис.2) яка складається з восьми приводів (актуаторів), розташованих попарно з чотирьох сторін відносно платформи з шпинделем, і з'єднаних з нею.

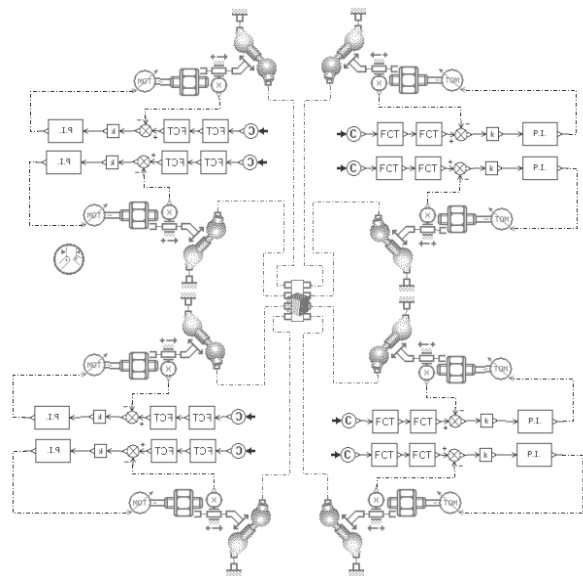


Рис. 2 - Ескіз верстата - робота в AMESim

Передачі змінні на відповідних портах елемента можна дізнатися, викликавши контекстне меню, далі натиснути меню External variables. Після побудови ескізу додаємо написи через меню Modeling → Insert → Text. Всі написи також можна обертати та відображати. Далі треба зберегти отриману модель.

Створені ескізи інженерних систем дають можливість наступному етапу, а саме, процесу симуляції, який проходить у послідовності:

- вибір математичного опису компонентів;
- встановлення параметрів компонентів;
- запуск симуляції;
- аналіз результату.

При проходженні цих дій, ескіз системи весь час відображається на екрані.

Після побудови ескізу станка-робота в режимі під моделі призначається прив'язка командного блока з вихідними параметрами (рис. 3 а, б) до всіх восьми входів сигнальних блоків керуючих кроковими електродвигунами приводів верстата-робота. Кожен елемент системи повинен бути пов'язати з математичною моделлю. Це набір математичних рівнянь і їх реалізація як частина комп'ютерного коду. Для цього необхідно використовувати режим Submodel. Якщо елементи мають декілька під моделей різної складності, вони назначаються вручну.

Далі в режимі параметрів задаються всі відомі дані для надання під моделям та ескізу функціональної можливості до симуляції. AMESim проводить різні перевірки і створює виконуваний код системи. Вікно компіляції системи, показує дані про рівняння, які він повинен вирішити, щоб виконати розрахунок. Набір рівнянь в AMESim визначає динамічну поведінку системи. Модель будується з рівнянь для кожного компонента в системі. Більшість під моделей мають набір параметрів, що зв'язані з ними. При присвоєнні елементу під моделі, в ньому автоматично задаються значення параметрів. Для переходу на рівень розрахунку характеристик, використовуємо Simulation mode в лівій частині вікна програми. Запуск розрахунку здійснюється натисканням кнопки Start simulation.

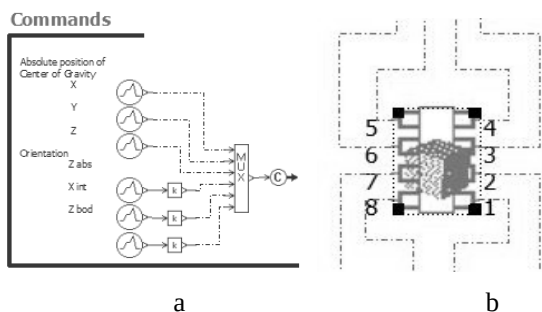


Рис. 3 - Команди для симуляції і модель верстата – робота: а – командний блок; б – ескіз платформи з портами для восьми приводів

Результатом симуляції є отримані дані для ескізу платформи до портів якої були під'єднанні гілки ескізів приводів.

Для кожного з восьми портів ми маємо результати:

- абсолютна швидкість на порту;
- абсолютну позицію в порт;
- передача матриці (R0-Rs) в порт;
- абсолютне прискорення в порт;
- крутний момент в порт.

Після проведення аналізу абсолютної швидкості на портах були отримані результати, які вказують на

їх ідентичність. Тобто протягом часового проміжку симуляції абсолютна швидкість на кожному з восьми портів майже не відрізняється. Побудова графіку відбувається методом Drag-and-drop або Plot через меню. Далі треба вибрати досліджувані параметри. При необхідності можна будувати різні графіки, додавати сторінки, та переміщати їх між сторінками у AMEPlot. Використання курсору часової координати надає інформацію про значення координат при зміні положення курсору. Подвійний курсор дозволяє розрахувати різницю між значеннями на графіку. При перетаскуванні змінної на робоче поле будуватиметься графік залежності цієї змінної від часу. На цю площину можна додати ще декілька елементів, тоді бачимо декілька перехідних характеристик на одній вісі та з однаковим масштабом. Щоб розділити осі декількох кривих розташованих на одному графіку необхідно натиснути правою кнопкою миші на вертикальну вісь значень і вибрати пункт контекстного меню Separate, при цьому кожна з них має свою розмірність. Можна проаналізувати перехідні сигнали управління, зокрема позитивний та негативний. Аналогічно можна проаналізувати і інші характеристики, наприклад залежність одного параметра від іншого, а не від часу.

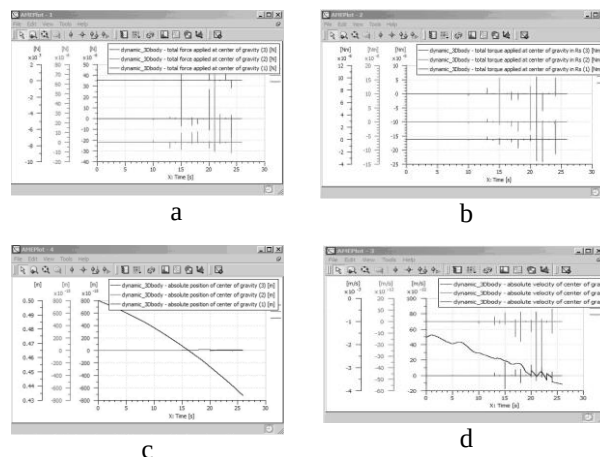


Рис. 4 – Центр ваги: а, б – абсолютне прискорення порту; с – абсолютна позиція на порту; d – абсолютна швидкість на портах

Перехідна функція позиції портів представлена на рис. 4 (а,б).

По факту всі вісім портів представляють собою площину платформи, тому можна характеризувати зміну координати з плином часу на порту 1 як рух платформи. На графіку бачимо що перехідна функція досить гарно показує те, що платформа завдяки використанню восьми опорних точок рухається плавно і не змінює свого положення відносно вісі Z.

Щодо абсолютного прискорення (рис. 4), воно змінюється досить плавно, зважаючи на те, що командний блок працює одразу з вісьмома кроковими двигунами, які саме задають довжини кожного з восьми приводів.

Так як в симуляції було відпрацьовано переміщення платформи донизу, то ми можемо спостерігати, що всі графіки практично ідентичні. Це дає можливість запевнити, що конструкція складена правильно і вона є працездатною.

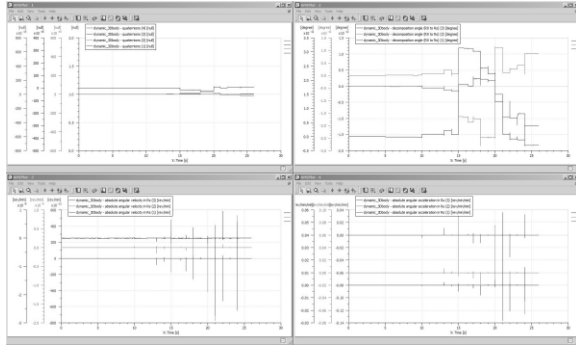


Рис. 5 – Орієнтація платформи (кватерніони, кут розкладання (R0 - Rs), абсолютної кутовий швидкості на Rs, абсолютна кутове прискорення в Rs)

На графіках (рис. 5), які дають уявлення про центр ваги платформи, бачимо що перехідна функція досить гарно показує те, що платформа завдяки використанню восьми опорних точок рухається плавно і не змінює свого положення відносно вісі Z, так само як і на приводах. Тобто вся конструкція регулюється добре і взаємодія восьми приводів працює злагоджено.

Висновки. При занесенні всіх даних і правильній побудові ескізу була отримана симуляційна модель станка – робота. Відпрацювання переміщень платформи налаштовується в командному блоці і по підсумкам проведення симуляції можна мати уявлення про працездатність спроектованої до початку робіт в AMESim конструкції.

Таким чином, проектування та дослідження привода зводиться до визначення вимог пред'явлених приводу, вибору кращої конструкції та її дослідженню в програмних САЕ-пакетах для визначення динамічних характеристик приводу.

Так як саме привід забезпечує збереження всіх якостей станка – робота, то розробка приводного плеча, тобто приводу штанги, являється обґрунтованою, бо саме штанга є основою конструкції станка - робота. Дослідження можливостей пакету динамічного моделювання LMS Imagine. Lab AMESim SE дозволяють використовувати його за рахунок легкості створення конструкції і проведення динамічного аналізу, а та-

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Динамічний аналіз нових конструкцій верстатів – роботів / О.С.Ковалевська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 45–48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.

Динамический анализ новых конструкций станков - роботов / Е.С.Ковалевская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 45–48. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.

Dynamic analysis of new designs of machines - robots / O. Kovalevska // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.45–48. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковалевська Олена Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування ДДМА, м. Краматорськ, тел. (0626) 41-47-70, e-mail: olenakovalevska@gmail.com;

Ковалевская Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии машиностроения ДГМА, г. Краматорск, тел. (0626) 41-47-70, e-mail: olenakovalevska@gmail.com;

Kovalevska Olena - Ph.D., Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering DSEA, Kramators'k, tel. (0626) 41-47-70, e-mail: olenakovalevska@gmail.com.

кож за рахунок скорочення часу від ідеї до отримання результатів.

Список литературы:

1. Иванов В. О. Конструкторско-технологичный анализ современных сверлильно-фрезерно-розточувальных верстатов / В. О. Иванов, В. С. Карпусь, И. М. Дегтярьов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Технології в машинобудуванні». – 2016. – №. 33. – С. 95–105
2. Гимадиев, А. Г. LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А.Г. Гимадиев, П.И. Грешняков, А.Ф. Синяков; - Электрон. текстовые и граф. дан. (4,8 Мбайт). – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014.
3. LMS Imagine.Lab Amesim. Integrated simulation platform for multi-domain mechatronic systems simulation. URL: http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/imagine-lab/amesim/index.shtml.
4. LMS IMAGINE.LAB AMESIM. URL: http://novatest.ru/equipment/raschetnokspierimentalnoe_modelirovanie/mehatronika,_odelirovanie/lms_ima
5. LMS IMAGINE.LAB - ПЛАТФОРМА AMESIM SUITE. URL: http://www.novatest.ru/equipment/251/258/1d_modeling/299/.
6. Automation Studio. URL: <http://www.automationstudio.com/>.
7. Modelica. URL: <https://modelica.org/tools>.
8. MapleSim . URL: <http://www.maplesoft.com/>.

References (transliterated)

1. Ivanov V. O., Karpus V. E., Dehtiarov I. M. Konstruktorsko-tekhnologichnyj analiz suchasnyx sverdlylno-frezerno-roztochuvalnyx verstativ [Design and Manufacturing Analysis of Modern Drilling-milling-boring Machine Tools] // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – pp. 95–105.
2. Gimadiev, AG LMS Imagine.Lab AMESim as an effective tool for modeling dynamic processes in mechatronic systems [Electronic resource]: electron. Training. Allowance / А.Г. Gimadiev, P.I. Greshnyakov, A.F. Sinyakov; - Electron. Text and graph. Dan. (4.8 MB). – Samara: Publishing house of Samts RAS, 2014.
3. LMS Imagine.Lab Amesim. Integrated simulation platform for multi-domain mechatronic systems simulation. URL: http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/imagine-lab/amesim/index.shtml.
4. LMS IMAGINE.LAB AMESIM. URL: http://novatest.ru/equipment/raschetnokspierimentalnoe_modelirovanie/mehatronika,_odelirovanie/lms_ima
5. LMS IMAGINE.LAB - AMESIM SUITE PLATFORM. URL: http://www.novatest.ru/equipment/251/258/1d_modeling/299/.
6. Automation Studio. URL: <http://www.automationstudio.com/>.
7. Modelica. URL: <https://modelica.org/tools>.
8. MapleSim. URL: <http://www.maplesoft.com/>.

Поступила (received) 12.11.16

УДК 621.375.826

Г. И. КОСТЮК

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПРИ ИЗ «ВОЛКАР» ДЛЯ СОЗДАНИЯ НА НЁМ НАНОСТРУКТУРНОГО СЛОЯ

Для случая действия фемтосекундного лазера на твёрдый сплав ВолКар исследованы зависимости максимальной температуры, скорости роста температуры и температурных напряжений от плотности теплового потока ($q = 10^{12} - 10^{16}$ Вт/м²) для разных времён его действия ($t = 10^{-16} - 10^{-10}$ с), также получены зависимости объема нанокластера при радиусах пятна контакта $R = 5 \cdot 10^{-7}$, $R = 10^{-6}$ м от технологических параметров обработки, что позволило получить требуемые технологические параметры для получения наноструктур с применением фемтосекундного лазера.

Ключові слова: технологические параметры лазера, фемтосекундный лазер, твердый сплав «ВолКар», режущий инструмент, наноструктурные слои.

Для випадку дії фемтосекундного лазера на твердий сплав ВолКар досліджені залежності максимальної температури, швидкості росту температури і температурних напружень від щільності теплового потоку ($q = 10^{12} - 10^{16}$ Вт / м²) для різних часів його дії ($t = 10^{-16} - 10^{-10}$ с), також отримано залежності обсягу нанокластера при радіусах плями контакту $R = 5 \cdot 10^{-7}$, $R = 10^{-6}$ м від технологічних параметрів обробки, що дозволило отримати необхідні технологічні параметри для отримання наноструктур із застосуванням фемтосекундного лазера.

Ключевые слова: технологічні параметри лазера, фемтосекундный лазер, твердый сплав «ВолКар», ріжучий інструмент, наноструктурні шари.

In the case of the action of femtosecond laser VolKar hard alloy investigated over-dependence of maximum temperature, temperature rise rate and temperature stresses on the heat flux density ($q = 10^{12} - 10^{16}$ W / m²) for different times of its operation ($t = 10^{-16} - 10^{-10}$ s), as prepared according nanocluster volume at the contact patch radii $R = 5 \cdot 10^{-7}$, $R = 10^{-6}$ m from the technological machining parameters as possible to obtain the required process parameters for obtaining nanostructures using a femtosecond laser.

Keywords: technological parameters of the laser, the femtosecond laser, solid alloy "VolKar", cutting tools, nanostructured layers.

Введение. Твёрдый сплав «Волкар» создан на базе карбида вольфрама, но пока ещё не имеет широкого применения в технике, из-за относительно невысокой износостойкости (HV 18 – 24 ГПа), тогда как твёрдость применения нанопорошков WC повышает твёрдость (HV 26,4 ГПа), очевидно даже у спеченного из nano порошков «ВолКара» работоспособность и износостойкость может быть выше. Если же обеспечить появление наноструктур на поверхности за счёт дополнительного воздействия лазерного излучения, то можно ожидать получение более высокой микротвёрдости поверхности, а, следовательно, и износостойкость будет значительно выше.

Выше изложенное показывает важность рассмотрения вопроса о перспективе создания наноструктур на режущем инструменте с размерами зерна порядка 10 нм, что существенно повысит микротвёрдость «ВолКара».

Работа выполнена 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», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса. На сегодняшний день относительно большое число работ выполнено по изучению наноструктур (НС), основная масса работ посвящена их экспериментальному изучению. Теоретические работы в этом направлении даны в монографиях [1-11]. Обобщение результатов экспериментальных работ представлено в монографиях [12,13].

Несмотря на то, что в работе [14] рассмотрена возможность обработки нового твёрдого сплава «Волкар», результатов его применения в производстве и даже в экспериментах в настоящее время нет. Очевидно, что ожидать значительного повышения эффективности и работоспособности твёрдых сплавов за счёт применения «ВолКара» не приходится, даже при использовании «ВолКара», полученного из порошка наноразмеров (100 нм). Возможность же обработки этого твёрдого сплава лучом фемтосекундного лазера с целью образования наноструктурного слоя с достаточно малыми размерами зерна (порядка 10 нм), может координатно улучшить свойства этого сплава и обеспечить высокую работоспособность и эффективность его работы.

Всё это говорит об актуальности и своевременности теоретических исследований по возможности образования НС на твёрдом сплаве «ВолКар» при обработке фемтосекундным лазером.

Теоретические методы исследования. Теоретические исследования проводились на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости, которая позволяла получать поля температур, температурных напряжений, оценивать скорость роста температуры и в дальнейшем с учётом критериев образования НС находить объёмы зерна и ограничив размер зерна 100 нм, оценить зоны технологических параметров лазера, при которых есть вероятность получения НС, так как ранее была проверена

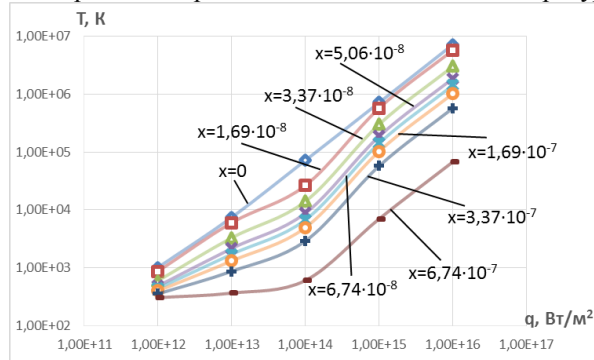
© Г.И. Костюк, 2017

адекватность [1] этой модели, то результаты расчётов будут достоверными.

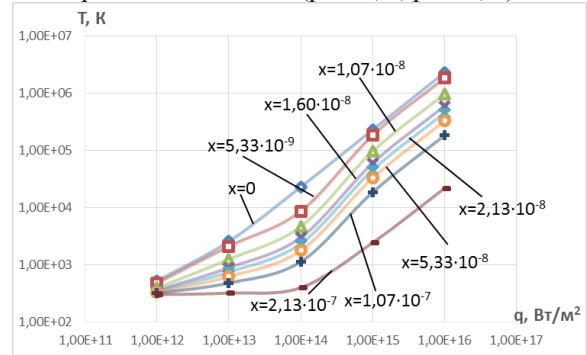
Результаты расчётов и их обсуждения. В случае действия фемтосекундного лазера для технологических режимов с плотностью теплового потока $q = 10^{12} - 10^{16}$ Вт/м² и времён его действия $t = 10^{-16} - 10^{-10}$ с были проведены расчёты максимальных температур,

скоростей роста температур и температурных напряжений на различных глубинах, результаты которых представлены на рисунка 1 – 3.

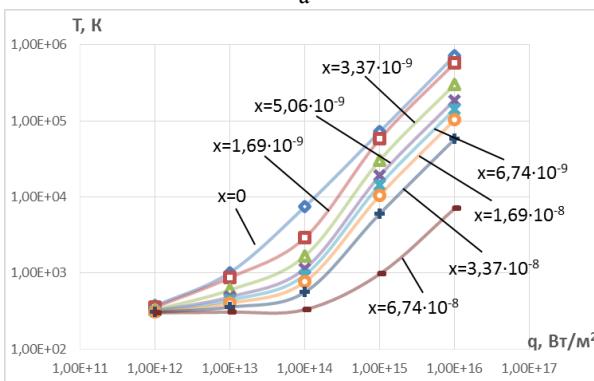
Так анализ рисунка 1 показывает, что по температурам при больших временах ($t = 10^{-10} - 10^{-11}$ с), реально можно получать НС при плотностях теплового потока $q = 10^{12} - 10^{13}$ Вт/м² (рис. 1, а, рис. 1, б).



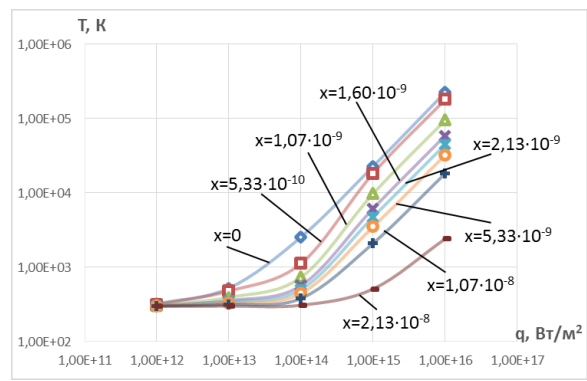
а



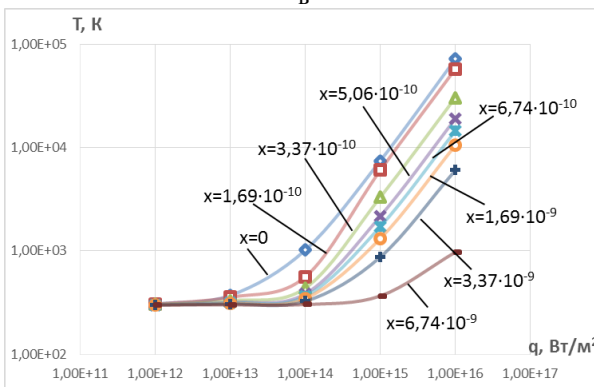
б



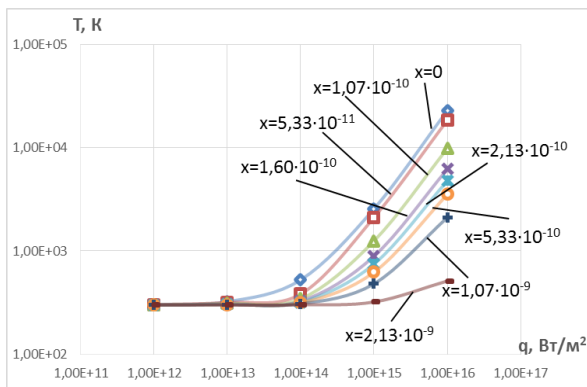
в



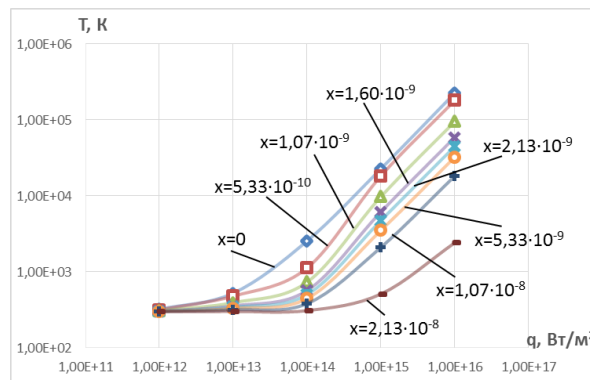
г



д



е



ж

Рис.1. – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на материал «ВолКар» от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t = 10^{-10}$ с; б - $t = 10^{-11}$ с; в - $t = 10^{-12}$ с; г - $t = 10^{-13}$ с; д - $t = 10^{-14}$ с; е - $t = 10^{-15}$ с; ж - $t = 10^{-16}$ с.

Уменьшение времени действия до $t = 10^{-12} - 10^{-13}$ с приводит к тому, что НС возможно получать при плотностях теплового потока $q = 10^{13} - 10^{14}$ Вт/м² и даже при $q = 10^{15}$ Вт/м², но только на очень больших глубинах $2,13 \cdot 10^{-8}$ м (рис. 1, в, рис. 1, г). Снижение времени действия до $t = 10^{-16} - 10^{-14}$ с приводит к тому, что НС образуются только при плотностях теплового потока $q = 10^{15} - 10^{16}$ Вт/м² на незначительных глубинах причём глубина слоя, где реализуются НС достигает $6,74 \cdot 10^{-10} - 3,37 \cdot 10^{-9}$ м. (рис. 1, д, рис. 1, е, рис. 1, ж).

Результаты расчёта скорости роста температур представлены на рис. 2 для 2-х режимов $t = 10^{-10}$ с и $t = 10^{-16}$ с. Видно, что для этих режимов реализуются условия достаточные для образования НС по этому критерию, так как они превышают 10^7 К/с.

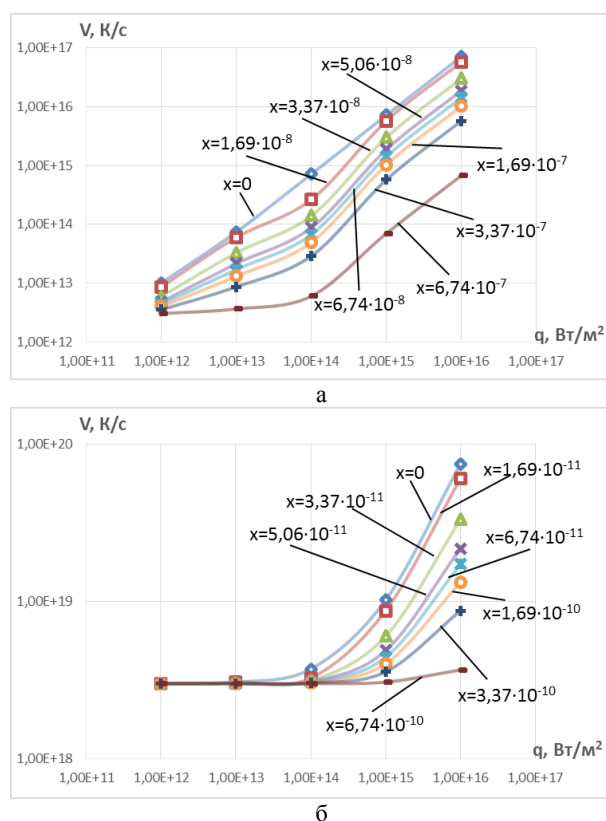


Рис. 2 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на материал «ВолКар» от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t = 10^{-10}$ с; б - $t = 10^{-16}$ с.

Температурные напряжения могут ускорять процесс образования НС или даже непосредственно участвовать в их образовании при превышении их критического значения - 10^{10} Па, поэтому были проведены расчёты температурных напряжений в диапазоне приведенных технологических параметров, результаты, которых представлены на рисунке 3.

Видно, что при временах $t = 10^{-10} - 10^{-11}$ с реализуются температурные напряжения значительных величин и на достаточно больших глубинах до $6,74 \cdot 10^{-7}$ м, в этом случае при плотностях теплового потока $q = 10^{10} - 10^{11}$ Вт/м² есть возможность получения НС за счёт действия температурных напряже-

ний, хотя в этих случаях температурный режим не соответствует необходимому для образования НС, температуры значительно выше, что говорит о вероятности снижения этого эффекта (рис. 3, а, рис. 3, б).

При меньших временах действия $t = 10^{-12} - 10^{-13}$ с непосредственное образование НС за счёт действия температурных напряжений может быть реализовано, только на незначительных глубинах порядка $2,13 \cdot 10^{-8} - 6,74 \cdot 10^{-8}$ м. и плотности теплового потока $q = 10^{13}$ Вт/м² (рис. 3, в, рис. 3, г), а для остальных глубин и плотностей теплового потока есть возможность ускорения образования НС, за счёт действия температурных напряжений.

При временах действия $t = 10^{-14} - 10^{-16}$ с есть вероятность только некоторого ускорения процесса образования НС и то при высоких плотностях теплового потока $q = 10^{15} - 10^{16}$ Вт/м² (рис. 3, д, рис. 3, е, рис. 3, ж).

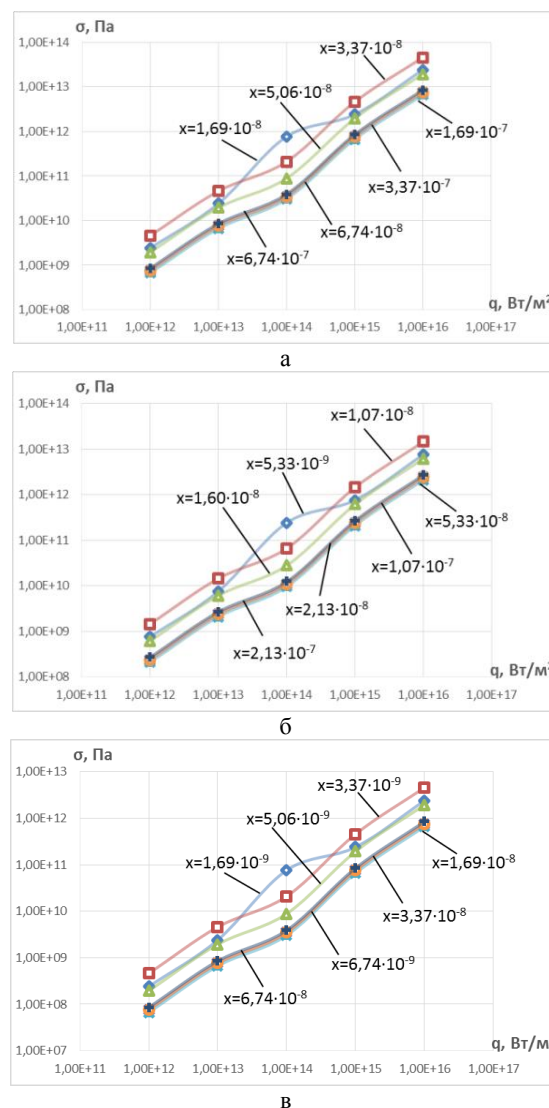
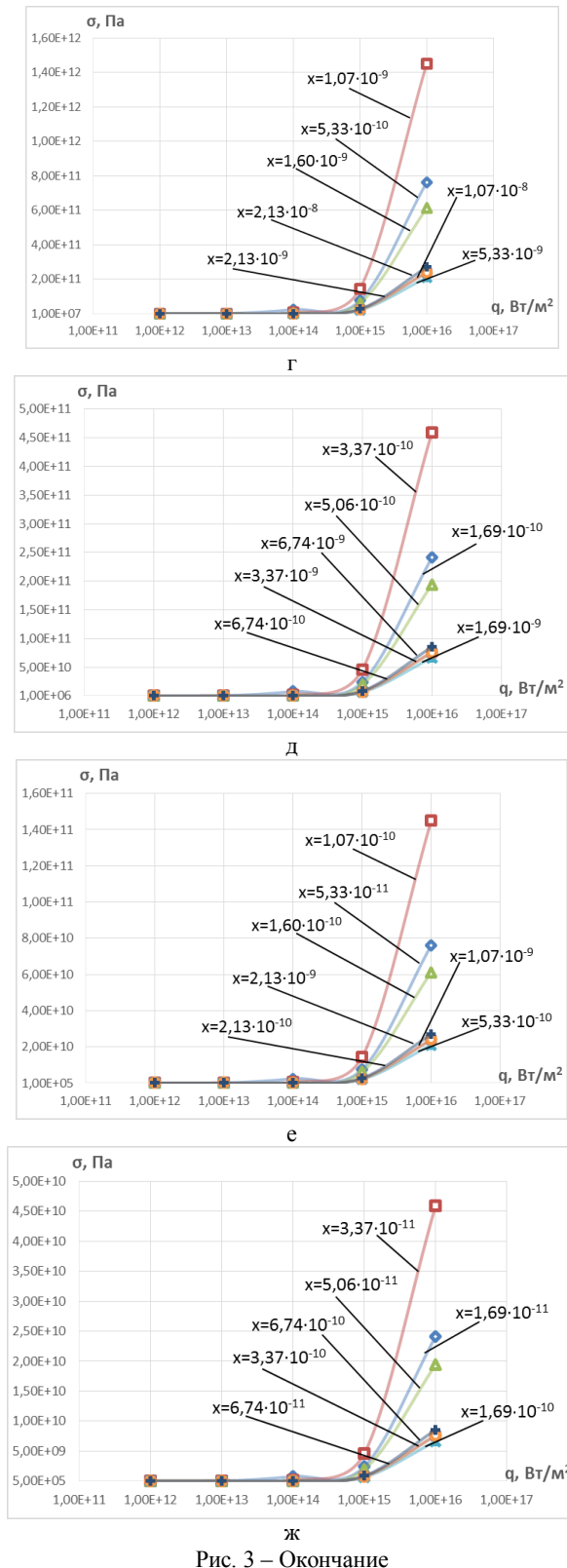


Рис. 3 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на материал «ВолКар» от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t = 10^{-10}$ с; б - $t = 10^{-11}$ с; в - $t = 10^{-12}$ с; г - $t = 10^{-13}$ с; д - $t = 10^{-14}$ с; е - $t = 10^{-15}$ с; ж - $t = 10^{-16}$ с.



Объем зерна определяет возможность реализации наноструктур в материале, а технологические параметры, которые их обеспечивают, являются важным результатом исследования. Кроме того, глубины залегания этого зерна также важны для конструирования поверхности деталей из наноструктур. Поэтому было проведено исследование зависимости объема нанокластера от минимальной и максимальной гл-

бины залегания НС (пунктиром был обозначен объем, соответствующий границе появления НС).

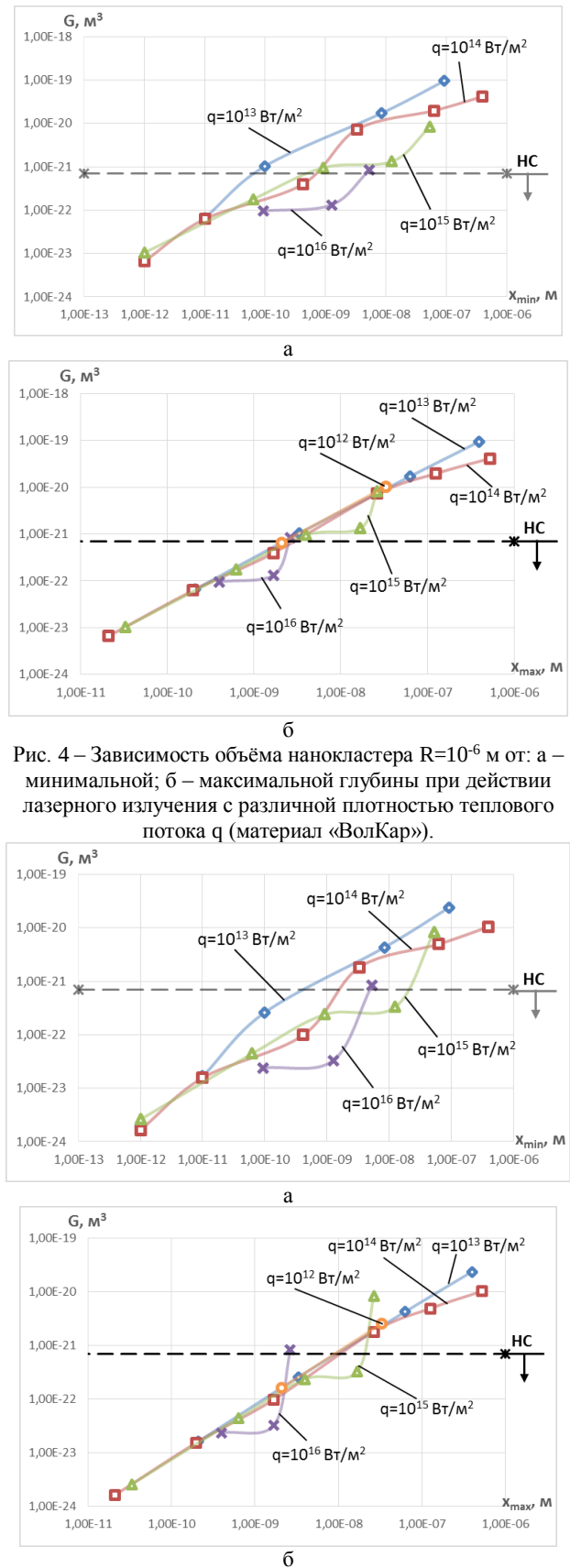


Рис. 5 – Зависимость объема нанокластера $R=5 \cdot 10^{-7}$ м от: а – минимальной; б – максимальной глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (материал «ВолКар»).

Такие зависимости представлены для радиуса пятна ЛИ на детали $R=10^{-6}$ м (рис. 4) и $R=5\cdot 10^{-7}$ м (рис. 5). Сравнение этих рисунков показывает, что в последнем случае ($R=5\cdot 10^{-7}$ м) для большей гаммы технологических параметров есть возможность получения НС на твердом сплаве «ВолКар».

Для экспресс-оценки технологических параметров, при которых реализуются НС, были построены объемные картины зависимости объема нанокластера от плотности теплового потока ЛИ и времени его действия (рис. 6, 7) для пятна контакта $R=10^{-6}$ м (рис. 6) и для пятна контакта $R=5\cdot 10^{-7}$ м (рис. 7). Сравнение этих рисунков показывает, что во втором случае при $R=5\cdot 10^{-7}$ м зона технологических параметров ЛИ расширена, т.е. при большем количестве технологических параметров есть возможность получения НС. Построенные зависимости позволяют выбирать предварительно технологические параметры, при которых возможна реализация НС, что имеет большое практическое значение для применения «ВолКар» с НС-слоем.

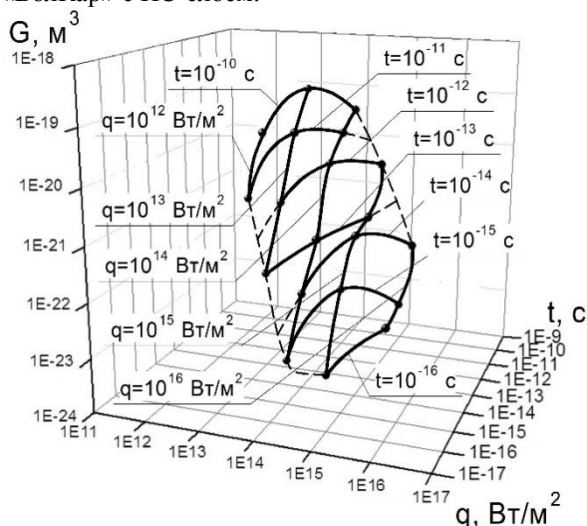


Рис. 6 – Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=10^{-6}$ м) (материал «ВолКар»)

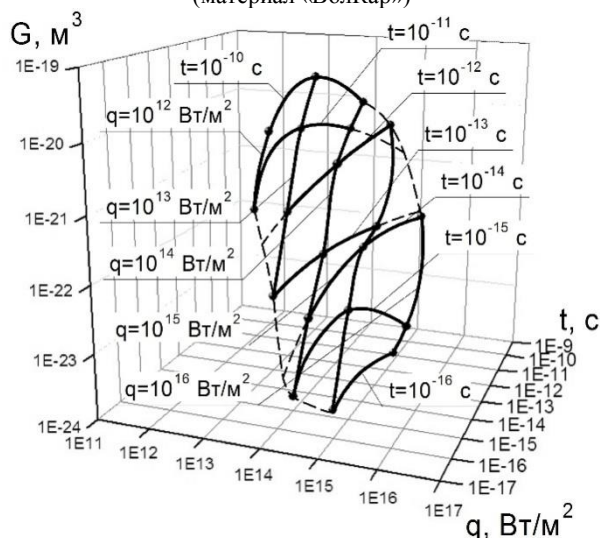


Рис. 7 – Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=5\cdot 10^{-7}$ м) (материал «ВолКар»).

Выводы.

Проведенные исследования показали реальную возможность получения наноструктур с помощью лазерной обработки в фемтосекундном диапазоне твердого сплава «ВолКар», причем можно выбирать, с помощью экспресс-оценки, предварительные технологические параметры и настройки лазера (размера пятна) для того, чтобы получить наноструктуры на определенной глубине, а изменяя технологические параметры заполнить полностью наноструктурами довольно-таки значительный поверхностный слой детали (порядка 10^{-5} м). Все это позволит существенно повысить работоспособность и эффективность режущего инструмента из твердого сплава «ВолКар».

Список литературы

1. Костюк Г. И., Эффективный режущий инструмент с нанопокртиями и наноструктурными модифицированными слоями: Монография-справочник: в 2 кн./Г.И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. 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.
3. 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.
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.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Костюк Г. И., Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.
10. 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.
11. Гречихин Л. И., Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
12. Гусев А. И., Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
13. Андриевский Р.А., Наноструктурные материалы [Текст]: учеб.пособие / Р.А. Андриевский, А.В.Рагуля. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 117 с.
14. Узунян М.Д., Шлифование наноструктурных твердых сплавов [Текст]: учеб.пособие / М.Д. Узунян, Р.М. Стрельчук. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2015. – 182 с. – На рус.яз.

Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G.I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloym: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.

2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur*: monogr [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.
3. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 1: *Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies]. 596 p.
5. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Reference for calculation of the main physical and technological parameters, assessing opportunities, selecting the type of technologies and equipment]. 482 p.
6. Kostyuk, G. I. *Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
7. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy: ucheb.posobiye* [The scientific basis for the creation of modern technologies] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2008. 552 p.
8. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
9. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, AINU, 2003. 412 p.
10. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva* [Physical and technical bases of robotized production] – Kharkov, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2006. – 614 p.
11. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanotekhnologiy* [The physics of nanoparticles and nanotechnology] – Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
12. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology] – Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.
13. Andrievskiy R.A., *Nanostrukturnye materialy* [Tekst]: ucheb.posobie – Moscow. Akademiya. 2005. 117 p.
14. Uzunyan M.D., *Shlifovanie nano-strukturnykh tvorodyh splavov* [Tekst]: ucheb.posobie Kharkov. NTU «KHPI», 2015. – 182 pp.

Поступила (received) 10.03.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Фемтосекундна лазерна обробка з волокна для нанесення наноструктурного шару / Г. І. Костюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – №17 (1239). – С. 49–54. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.

Фемтосекундная лазерная обработка рн из «волкар» для создания на нём наноструктурного слоя / Г. И. Костюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 49–54. – Библиогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.

Femtosecond laser treatment from "Volkar" to create nanostructured layer on it / G. Kostyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.49–54. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Костюк Геннадий Игоревич – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovsky, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

УДК 621.923

Л.А. ПЕТРУСЕНКО, В.С. АНТОНЮК

**РАСЧЁТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Показана актуальність розрахункових методів визначення геометричних параметрів твердосплавного різального інструмента з умов міцності. Наведено розрахунки переднього кута і радіуса округлення різальної крайки за критерієм «нульового» рівня напружень в небезпечній зоні передньої поверхні. Дано пояснення причини зниження рівня напружень, що виникають в небезпечній зоні, при одночасному збільшенні сил різання, при зміні параметрів різальної частини, а також зниження міцності інструмента при перевищенні розрахункових величин оптимальних геометричних параметрів різальної частини інструмента.

Ключові слова: міцність різальної частини інструмента, крихке руйнування, твердосплавний інструмент, розтягуючі напруження, геометричні параметри, округлення різальної крайки.

Показана актуальность расчётных методов определения геометрических параметров твердосплавного режущего инструмента из условий прочности. Приведены расчёты переднего угла и радиуса округления режущей кромки по критерию «нулевого» уровня напряжений в опасной зоне передней поверхности. Даны объяснения причины снижения уровня напряжений, возникающих в опасной зоне, при одновременном увеличении сил резания, при изменении параметров режущей части, а также снижения прочности инструмента при превышении расчётных величин оптимальных геометрических параметров режущей части инструмента.

Ключевые слова: прочность режущей части, хрупкое разрушение, твердосплавный инструмент, растягивающие напряжения, геометрические параметры, округление режущей кромки.

It is shown the hard-alloy cutting tool geometric parameters determining calculation methods actuality from the strength conditions. It is made calculations of the front angle and the radius of rounding of the cutting edge by the criterion of "zero" stress level in the dangerous zone of the front surface. There is given the reasons of lowering the level of stresses appeared in the dangerous zone while simultaneously increasing the cutting forces, at the changing of the cutting part parameters, as well as reducing the strength of the tool at the exceeding of the tool cutting part optimum geometric parameters calculated values are explained.

Key words: strength of the cutting part, brittle failure, hard-alloy tool, tensile stresses, geometric parameters, rounding of the cutting edge

Постановка проблеми. Эффективность технологического процесса лезвийной обработки деталей на металлорежущих станках в большой степени зависит от рационального выбора параметров режущего инструмента для заданных конкретных условий его работы.

В зависимости от задачи и условий технологической операции, решающим для такого выбора может быть один из двух основных критерия работоспособности режущего инструмента – его износостойкость или прочность.

Геометрия режущей части лезвийного инструмента – один из важнейших факторов, определяющих его работоспособность. От этого фактора зависят величины сил резания, характер распределения контактных нагрузок и напряжений, возникающих в режущей части. Как следствие, геометрические параметры определяют прочность инструмента при заданных условиях обработки.

При этом поиск рациональных геометрических параметров ведётся опытным путём, а найденный оптимум приемлем для конкретных условий обработки. При обработке деталей из других конструктивных материалов, в условиях интенсификации режимов такой способ определения геометрических параметров режущего инструмента – только экспериментальным путём, малоэффективен.

Анализ последних исследований и публикаций. Критерий прочности особенно актуален для твердосплавного инструмента, работающего в условиях черновой обработки, неравномерного припуска, на операциях прерывистого резания, обработки высокопрочных материалов и др. [1, 13].

В таких условиях работы, по данным многих исследователей, от 30% до 60% режущего инструмента

из-за поломок выходит из строя задолго до достижения предельного износа [2-4],

В отличие от неизбежного, но прогнозируемого износа режущего инструмента, хрупкое разрушение, или так называемый «внезапный отказ», относится к недопустимому виду отказов, так как его появление требует немедленного прекращения процесса обработки и приводит к браку, возможным поломкам оснастки и оборудования.

Особенно важно это учитывать при работе на станках с ЧПУ и станках-автоматах, так как регистрация факта поломок инструмента в процессе работы, как правило, не проводится, а производственные потери, обусловленные нерегламентированными простоями таких станков, превышают инструментальные расходы [5, 14].

В работе [6] автор отмечал: «На практике при обработке многих материалов во избежание разрушения инструмента снижают режимы резания. Поэтому повышение прочности режущей части инструмента является весьма важной для производства проблемой. Изучение механизма разрушения, установление его закономерностей, создание инженерных методов расчета прочности режущей части инструмента, являются актуальными вопросами теории резания материалов».

Экспериментальные исследования прочности режущего инструмента затратны, а получаемые результаты, из-за больших разбросов данных, весьма ненадежны, поэтому заслуживают внимания аналитические методами определения прочности путём расчета влияния различных факторов на величину напряжений в режущем клине [7].

Цель работы – установление зависимостей уровня напряжений в режущем клине от геометриче-

© Л.А. Петрусенко, В.С. Антонюк, 2017

ских параметров инструмента и определение диапазона оптимальных значений этих параметров по критерию прочности.

Изложение основного материала. Критически по прочности, с точки зрения хрупкого разрушения твердосплавного режущего инструмента, являются растягивающие напряжения, которые, согласно поляризационно-оптическим исследованиям возникают за пределами зоны контакта инструмента со стружкой [2, 8].

Установлено, что максимальный уровень таких напряжений возникает на участке передней поверхности инструмента на расстоянии 2...2,5 длины контакта от вершины, который получила определение «опасная зона» [2, 5].

Изложение основного материала. Расчёт напряжений в режущей части. Для расчёта напряжений на передней поверхности режущего инструмента за пределами зоны контакта в работе [2] принят принцип Сен-Венана

При этом режущую часть инструмента рассматривают как клиновидную балку, к вершине которой приложена сосредоточенная сила P .

Тогда напряжения на передней поверхности режущего инструмента определяются по формуле [2]:

$$\sigma_1 = \frac{2P}{br} \left[\frac{\sin \frac{\beta}{2} \sin \left[\nu_0 - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta - \sin \beta} - \frac{\cos \frac{\beta}{2} \cos \left[\nu_0 - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta + \sin \beta} \right] \quad (1),$$

где P – результирующая сила резания; b – ширина среза; r – расстояние от вершины до расчётной точки передней поверхности; γ – передний угол инструмента; β – угол заострения режущего клина; ν_0 – угол приложения силы результирующей силы P (от оси «Y»),

Угол приложения силы P определяется по результирующей формуле:

$$\nu_0 = \arg \operatorname{tg} \frac{P_z}{P_y}$$

где P_z , P_y – составляющие силы резания

Для расчётов с применением формулы Бетанели [2] в работе [9] предложено её преобразование к виду:

$$\sigma_1 = \frac{K_z P_z - K_y P_y}{br} \quad (2)$$

где K_z , K_y – коэффициенты; P_z , P_y – составляющие силы резания; b – ширина среза; r – расстояние от вершины до расчётной точки передней поверхности.

Исходные данные о величинах, составляющих силы резания P_z , P_y для расчётов напряжений в режущем клине могут быть получены как непосредственным измерением при помощи динамометра, так и из графиков, по эмпирическим формулам или таблицам [10].

Формулы 1 и 2 применимы для условий свободного прямоугольного резания. При косоугольном резании необходимо по составляющим сил P_x и P_y рассчитать величину горизонтальной составляющей силы резания P_{xy} , которая используется в формуле 2 вместо P_y .

Коэффициенты K_z и K_y определяются по формулам:

$$K_z = 2 \left[\frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\beta - \sin \beta} \cos \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) - \frac{\cos \frac{\beta}{2}}{\beta + \sin \beta} \sin \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right] \quad (3)$$

$$K_y = 2 \left[\frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\beta - \sin \beta} \sin \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) - \frac{\cos \frac{\beta}{2}}{\beta + \sin \beta} \cos \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right] \quad (4)$$

где β – угол заострения; γ – передний угол.

Как видно из формул 3, 4, коэффициенты K_z и K_y постоянны при заданной геометрии режущего клина (углы γ и α).

Значения коэффициентов K_z и K_y для расчетов напряжений в твердосплавном инструменте по формуле (2) в диапазоне изменения переднего угла γ (от 10° до -10°) и заднего угла α (от 2° до 10°) приведены в работе [7].

Влияние геометрических параметров режущей части инструмента на его прочность устанавливают в зависимости от величин составляющих сил резания, и рассчитывают уровни напряжений, возникающих в опасной зоне передней поверхности инструмента.

Для проведения анализа влияния геометрических параметров на прочность режущего инструмента и определения области их оптимальных значений, определяли зависимости расчётного уровня напряжений в опасной зоне режущего инструмента от изменений исследуемого параметра.

Определение геометрических параметров режущей части инструмента. Расчёт уровня напряжений в опасной зоне позволяет определить величину значений геометрических параметров режущей части инструмента по критерию прочности.

Для этого принимаем предложенное в работе [4] определение: «Наиболее благоприятные прочностные условия создаются, когда передняя грань совпадает с нейтральной линией». Другими словами, необходимо выбрать геометрические параметры режущей части инструмента такими, при которых уровень напряжений на передней поверхности за пределами контактной зоны будет равен нулю [7].

Эти величины обеспечат гарантированное отсутствие растягивающих напряжений в режущем клине при оптимальных (для данных условий) величинах, составляющих силы резания.

На рис. 1.а приведены исходные данные из работы [3] – зависимости составляющих силы резания P_z , P_x , и P_y от величины переднего угла γ .

По этим данным и таблице коэффициентов K_z и K_y , [7], по формуле 2, выполнены расчёты зависимости напряжений в опасной зоне режущего клина ($\sigma_{расч}$) от угла γ при постоянной величине заднего угла $\alpha = 4^\circ$ (рис.1.б).

По точке пересечения графика $\sigma_{расч}$ (рис. 1.б) с линией $\sigma = 0$ определяем величину переднего угла $\gamma = \gamma_0$, при которой нейтральная линия совпадает с передней поверхностью (точка А).

Величина $\gamma = \gamma_0$ и является искомой величиной переднего угла для данных условий обработки.

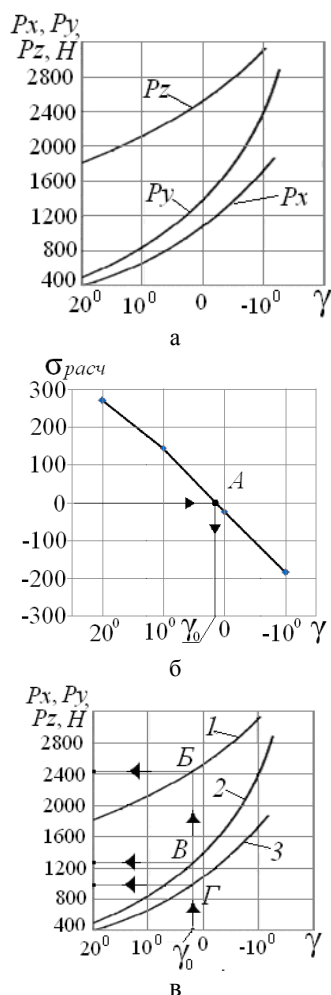


Рис. 1 – Зависимость параметров процесса резания от величины переднего угла γ : а – исходные данные; б – величина напряжений и определение расчётной величины угла γ_0 ; в – определение величин составляющих сил резания при $\gamma = \gamma_0$.

Из рис. 1.б и 1.в, можно сделать вывод, что при:
 – величинах переднего угла $\gamma > \gamma_0$ в опасной зоне, несмотря на меньшие величины составляющих сил резания P_z , P_x и P_y , возникают растягивающие напряжения, $\sigma_{расч} > 0$, которые нежелательны для инструмента из твёрдых сплавов, т.к. они могут привести к разрушению его режущей части;

– переднем угле $\gamma = \gamma_0$ напряжения $\sigma_{расч} = 0$, что создаёт наиболее благоприятные прочностные условия в режущей части инструмента;

– дальнейшем уменьшении переднего угла $\gamma < \gamma_0$, в опасной зоне, как и во всём режущем клине, происходит рост величин сжимающих напряжений, $\sigma < 0$, величины составляющих сил резания, особенно P_x и P_y , также резко возрастают (рис. 1.в точки В и Г), что неоправданно увеличивает нагрузки, действующие на режущий инструмент, обрабатываемую заготовку, а также на узлы станка, что приводит к появлению вибраций и поломок.

Для объяснения причин снижения уровня напряжений в опасной зоне режущей части до нуля и отрицательных величин при одновременном росте составляющих сил резания рассмотрим рис. 2, на котором изображены векторы равнодействующей си-

лы резания P при значениях переднего угла γ , равных 20° , 0° и -10° , соответственно.

На рис. 2 показано, что при изменении переднего угла γ с $+20^\circ$ до -10° , несмотря на рост равнодействующей силы резания P , основным фактором снижения напряжений в опасной зоне до отрицательных величин, является изменение направления силы, определяемое углом действия ω .

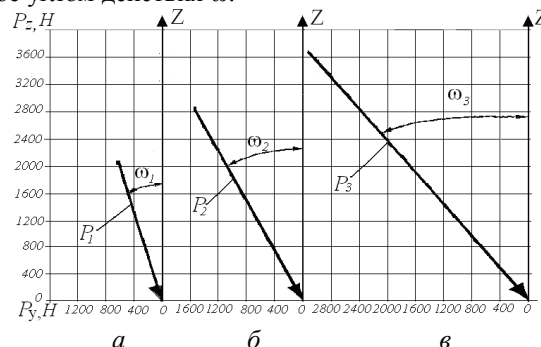


Рис. 2 – Схема приложения равнодействующей силы резания P к режущему клину при изменении переднего угла: а – $\gamma = 20^\circ$; б – $\gamma = 0^\circ$; в – $\gamma = -10^\circ$

При переднем угле $\gamma = 20^\circ$ сила резания $P_1 = 1920$ Н, действующая под углом $\omega_1 = 19,3^\circ$, создаёт уровень напряжений $\sigma_{расч,1} = 273$ МПа. (растяжение).

При $\gamma = 0^\circ$ сила резания $P_2 = 3063$ Н, действующая под углом $\omega_2 = 35,4^\circ$, создаёт уровень напряжений $\sigma_{расч,2} = -24$ МПа (сжатие).

При $\gamma = -10^\circ$ сила резания $P_3 = 4294$ Н, действующая под углом $\omega_3 = 43,5^\circ$, создаёт уровень напряжений $\sigma_{расч,3} = -184$ МПа (сжатие).

Таким образом, для условий резания, соответствующих исходным данным (рис. 1.а), принимается передний угол $\gamma_0 = 2^\circ$ – условие, при котором $\sigma_{расч} = 0$.

Определение величины радиуса округления режущей кромки. Достаточно эффективными приёмами повышения хрупкой прочности твердосплавного инструмента считаются методы округления режущей кромки инструмента или создание упрочняющей фаски с отрицательным углом.

В процессе резания на режущую кромку приходятся максимальные силовые и температурные нагрузки. Дефекты кромки при заточке снижают её прочность и являются источниками возникновения микротрещин. Поэтому после заточки инструмента рекомендуется дополнительная обработка режущих кромок (виброгалтовка, дробеструйная или магнитоабразивная обработка и др.) [11].

Округление кромок повышает не только «локальную» прочность самой кромки, но и хрупкую прочность всей режущей части инструмента, что указывает на снижение напряжений в опасной зоне передней поверхности инструмента, хотя величина силы резания при этом монотонно увеличивается.

В то же время, увеличение радиуса округления режущей кромки может привести к ухудшению условий резания, увеличению действующих сил резания и даже поломкам инструмента [1].

В работе [12] предложена математическая модель резания инструментом с округлённой режущей кромкой, в которой срезаемый слой условно рассматривает-

ся состоящим из трёх слоёв и отдельно для каждого участка определяются составляющие силы резания и силы на задней поверхности режущего инструмента (рис.3).

Суммарные величины составляющих сил резания P_z и P_y при резании инструментом с округленной кромкой равны сумме проекций усилий, возникающих на каждом участке.

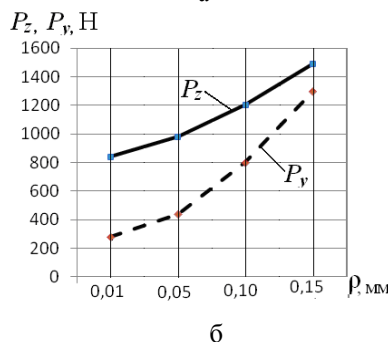
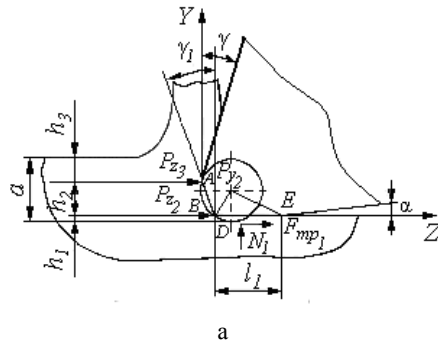


Рис. 3 – Схема распределения: а – срезаемого слоя и сил резания; б – зависимость составляющих силы резания от радиуса округления кромки ρ [12]

По данным работы [12] подставив в формулу 2 величины составляющих сил резания P_z и P_y и значение коэффициентов K_z и K_y , из работы [12], определена зависимость напряжений в опасной зоне режущего инструмента, $\sigma_{расч}$, от радиуса округления режущей кромки ρ (рис. 4).

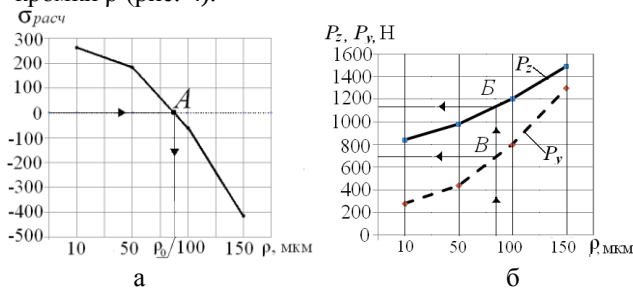


Рис. 4 – Зависимость радиуса округления режущей кромки, ρ_0 : а – от напряжений в опасной зоне режущего инструмента, $\sigma_{расч}$ б – и величины составляющих силы резания при $\rho = \rho_0$

На рис. 4.а показано величину радиуса округления режущей кромки ρ_0 , которая соответствует «нулевому» уровню напряжений в опасной зоне режущего инструмента ($\sigma_{расч} = 0$), для составляющих сил резания P_z и P_y (рис. 4.б) при значении переднего угла $\gamma = 7^\circ$ и заднего угла $\alpha = 4^\circ$ величина радиуса округления $\rho_0 = 90$ мкм.

Из рис. 4 а можно сделать вывод, что при:

– радиусе округления ρ меньше ρ_0 , несмотря на меньшие величины составляющих сил резания, в опасной зоне передней поверхности режущего инструмента возникают растягивающие напряжения.

– дальнейшем увеличении радиуса округления кромки ($\rho > \rho_0$) в режущем клине возникают только сжимающие напряжения.

При этом происходит рост сил резания, ухудшение условий стружкообразования и появление вибраций.

Определяющим фактором снижения уровня напряжений при увеличении радиуса округления кромки ρ является изменение направления действия силы резания (угол действия ω увеличивается).

На рис. 5 показаны векторы равнодействующей силы резания P , возникающие при радиусах округления кромки $\rho = 50, 100$ и 150 мкм, соответственно.

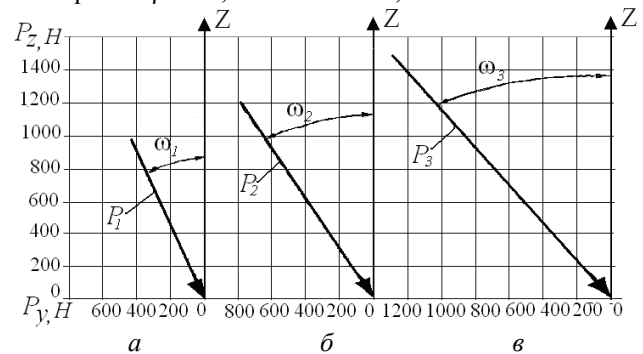


Рис. 5 – Схемы действия равнодействующей силы резания P к режущему клину при радиусах округления кромки: а – $\rho = 50$ мкм; б – $\rho = 100$ мкм; в – $\rho = 150$ мкм(в)

При радиусе округления режущей кромки $\rho = 50$ мкм сила резания $P_1 = 1074$ Н, действующая под углом $\omega_1 = 24,3^\circ$, создаёт уровень напряжений $\sigma_{расч,1} = 182$ МПа. (растяжение).

При $\rho = 100$ мкм сила резания $P_2 = 1442$ Н, действующая под углом $\omega_2 = 33,7^\circ$, создаёт уровень напряжений $\sigma_{расч,2} = -59$ МПа (сжатие).

При $\rho = 150$ мкм сила резания $P_3 = 1985$ Н, действующая под углом $\omega_3 = 41^\circ$, создаёт уровень напряжений $\sigma_{расч,3} = -412$ МПа (сжатие).

Таким образом, принимаем радиус округления кромки $\rho_0 = 90$ мкм – условие, при котором $\sigma_{расч} = 0$.

Выводы. Показана актуальность инженерных методов расчёта прочности твердосплавного режущего инструмента при черновых операциях и операциях прерывистого резания из-за хрупкого разрушения вследствие растягивающих напряжений, возникающие на передней поверхности инструмента за пределами зоны контакта.

Предложен метод определения геометрических параметров режущего инструмента по критерию «нулевого» уровня напряжений для условий резания создающих благоприятные прочностные условия в режущей части («нейтральная линия» напряжений совпадает с передней поверхностью инструмента) и приведены формулы для расчёта таких напряжений по данным о величине составляющих сил резания.

Список літератури

1. Хаєт, Г.Л. Прочность режущего инструмента. / Г.Л. Хаєт. – М.: Машиностроение, 1975. – 168 с.
2. Бетанели А.И. Прочность и надежность режущего инструмента [Текст] : научное издание / А. И. Бетанели. – Тбилиси : Сабчота Сакартвело, 1973. – 304 с.
3. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. [и др.] ; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.
4. Остафьев В.А. Диагностика процесса металлообработки / В.А. Остафьев, В.С. Антонюк, Г.С. Тымчик. – К.: Техніка. 1991. – 152 с.
5. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
6. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. / В.А. Остафьев. – М.: Машиностроение. 1979. 168 с.
7. Петрусенко Л.А. Расчет напряжений, возникающих в опасной зоне лезвийной части режущего инструмента / Л.А. Петрусенко, В.С. Антонюк // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Машинобудування – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – Вип. 77. – С. 147 – 156.
8. Остафьев В.А. Физические основы процесса резания. / В.А. Остафьев, В.С. Антонюк, С.П. Выслоух [и др.] ; под. общ. ред. В.А. Остафьева. – Киев: изд. «Вища школа», 1976. – 136 с.
9. Ильченко Н.Я. Об особенностях напряженного состояния режущей части инструмента при прерывистом резании / Н.Я. Ильченко, В.В. Ковтуненко, Л.А. Петрусенко // Резание и инструмент. Харьков, 1979. – №22. – С. 72-77.
10. Зорев Н.Н. Расчет составляющих силы резания / Н.Н. Зорев – М.: Mashgiz, 1952. – 364 с.
11. Майборода В.С. Влияние условий магнитно-абразивного обработки на радиус округления ризальных кромок, твердость та шорсткість робочих поверхонь багатограничних непереточуваних пластин // В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, І.В. Ткачук – Вісник СевНТУ. Зб.наук. праць. Серія: Машинобудування і транспорт. – Вип. 128. – 2012. – С. 67-71.
12. Трилисский В.О., Большаков Г.С. Расчет сил резания для инструмента с округленной режущей кромкой. / В.О. Трилисский, Г.С. Большаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2007 – №3. – стр 116 – 122.
13. Басова, Е.В. Технологическое обеспечение качества и точности поверхностей деталей из закаленных хромомолибденовых сталей методом высокоскоростного фрезерования: дис.... канд. техн. наук : 05.02.08 / Басова Евгения Владимировна. – Харьков, 2014. – 236 с. – Библиогр. : с. 214–226.
14. Басова Е.В. Обеспечение точности изготовления сложнопровильных поверхностей концевыми фрезами на обрабатывающих центрах / Е.В. Басова // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении – 2015: сборник научных трудов [Текст] / Закрытое акционерное общество «ОНИКС». – Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2015. – 235 с.: ил, табл.; – С. 153-162.
2. Betaneli, A.I. (1973), Prochnost' i nadezhnost' rezhushhego instrumenta [Durability and reliability of the cutting tool], Tbilisi : Sabchota Sakartvelo, 1973. – 304 p.
3. Mazur, N.P., Vnukov, Ju.N., Grabchenko, A.I. end dr. (2013), Osnovy teorii rezaniya materialov [Foundations theory of cutting materials], Mazur, N.P. and A.I. Grabchenko (ed), 2 nd(eg), NTU «HPI», Harkov,–, 2013. – 534 p.
4. Ostaf'ev, V.A. V.S. Antonyuk, H.S. Tymchyk (1991), Diagnostika processa metallobrabotki [Diagnosis of metalworking process], Kyiv, Tehnika. 1991. - 152 p.
5. Loladze, T.N. Prochnost' i iznosostojkost' rezhushhego instrumenta [The durability and wear resistance of the cutting tool], Mashinostroenie, Moscow 1982. – 320 p.
6. Ostaf'ev, V.A. Raschet dinamicheskoy prochnosti rezhushhego instrumenta. [Calculation of the dynamic durability of the cutting tool], Mashinostroenie, .Moscow., 1979. 168 p.
7. Petrusenko L.A., Antonyuk V.S. Raschet napriazheniy, voznykaiushchykh v opasnoi zone lezvyinoi chasty rezhushcheho ystrumenta [Calculation of stresses arising in the danger zone of the blade portion of the cutting tool] // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»: Mashynobuduvannia – Kiev: NTUU «KPI». 2016. – Vyp.77. - pp. 147- 156.
8. Ostaf'ev, V.A., Antonyuk, V.S., Vyslouh, S.P. end dr. Fizicheskie osnovy processa rezaniya [Physical bases of the cutting process], Ostaf'ev V.A. (ed) Vishha shkola, Kiev, 1976. - 136 p.
9. Il'chenko, N.Ja., Kovtunenکو, V.V., Petrusenko, L.A. Ob osobennostyah napriazhennogo sostojaniya rezhushhej chasty instrumenta pri preryvistom rezanii [On peculiarities of the reliability state of the cutting part of the tool during intermittent cutting], Rezanie i instrument. No 22, Harkov., 1979. – No 22. - pp.72-77.
10. Zorev N.N. Raschet sostavlyaiushchykh syl rezyaniya [Calculation of the cutting force components]–Moscow: Mashgiz, 1952.-364 p.
11. Maiboroda V.S D.Iu. Dzhulii, I.V.Tkachuk Vplyv umov mahnitno-abrazyvnoho obrobлення na radius okruhlennia rizalnykh kromok, poverkhnevu tverdist ta shorstkist robochykh poverkhon bahatohrannykh neperetochuvanykh plastyn [Influence of magnetic-abrasive processing for rounding cutting edge radius, surface hardness and roughness of working surfaces of polygonal plates neperetochuvanyh] // Vistnyk SevNTU. Zb.nauk. prats. Seriya: Mashynobuduvannia i transport. – Vol.128.- 2012. – pp. 67-71.
12. Trylysskyi V.O., Bolshakov H.S. Raschet syl rezaniya dlia ystrumenta s okruhl'ennoi rezhushchei kromkoi. [Calculation of cutting forces for a tool with a rounded cutting edge.] // Yzvestiya vysshyykh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy rehyon. Tekhnicheskyye nauky. 2007. – No 3. – pp. 116 – 122/
13. Basova E.V. Technological support surface quality and precision elements made of hardened chrome-molybdenum steel by high-speed milling [Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva i tochnosti poverkhnostey detaley iz zakalennykh khromomolibdenovykh staley metodom vysokoskorostnogo frezerovaniya]:... dis.... kand. tekhn. nauk : 05.02.08 / Basova Evgeniya Vladimirovna. – Kharkov, 2014. – 236 p. – Bibliogr. : pp. 214–226
14. Basova E.V. Obespechenie tochnosti izgotovleniya slozhnoprofilnykh poverhnostey kontsevyimi frezami na obrabatyvayuschih tsentrah [Ensuring the accuracy of the manufacture of sophisticated surfaces with end mills at machining centers]. Problemy proektirovaniya i avtomatizatsii v mashinostroyeni – 2015: sbornik nauchnykh trudov. Zakryitoe aktsionerное obschestvo «ONIKS». – Irbit: ZAO «ONIKS», 2015. – 235 p.: il, tabl. pp. 153-162.

Bibliography (transliterated)

1. Haet, G.L. (1975), Prochnost' rezhushhego instrumenta [The durability of the cutting tool], Mashinostroenie, Moscow, 1975. – 168 p.

Поступила (received) 12.03.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розрахунковий метод визначення геометричних параметрів твердосплавного різального інструмента / Л.А. Петрусенко, В.С. Антонюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 55–60. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.

Расчётный метод определения геометрических параметров твердосплавного режущего инструмента / Л.О. Петрусенко, В.С. Антонию // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 55–60. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.

Calculation method for determining the geometric parameters of carbide cutting tools / L. Petrusenko, V. Antonyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.55–60. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петрусенко Леонід Олександрович – провідний інженер кафедри «Виробництва приладів» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» м. Київ; тел.: (050) 078-52-56; e-mail: la.petrusenko@gmail.com;

Антонюк Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Виробництва приладів» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м Київ; тел.: (044) 204-94-75; e-mail: vp@kpi.ua\$;

Петрусенко Леонид Александрович – ведущий инженер кафедры «Производства приборов» Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» г. Київ; тел.: (050) 078-52-56; e-mail: la.petrusenko@gmail.com;

Антонюк Виктор Степанович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Производства приборов» Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г Киев; тел.: (044) 204-94-75; e-mail: vp@kpi.ua;

Petrusenko Leonid Oleksandrovych – Lead Engineer of Department of Instrument Design and Engineering" National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv; tel.: (050) 078-52-56; e-mail: la.petrusenko@gmail.com;

Antonyuk Viktor Stepanovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of Department of Instrument Design and Engineering" National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv; tel.: (044) 204-94-75; e-mail: vp@kpi.ua.

УДК 621.9.044

Г.И. КОСТЮК, Ю.С. ПАНЧЕНКО

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР НА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ У12 ЗА СЧЕТ ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия лазерного излучения исследованы поля температур, температурных напряжений, скоростей роста температуры и, с учетом критериев образования наноструктур, определены эффективные технологические параметры для получения наноструктур. По объемам наноструктур определены размеры зерна, что позволило оценить эффективные технологические параметры, необходимые для получения наноструктур. Показано, что полученные наноструктуры могут существенно повысить физико-механические характеристики инструментальной стали У12, что позволит использовать её вместо быстрорежущих сталей.

Ключевые слова: эффективность получения наноструктур, поля температур, температурные напряжения, скорость роста температуры, размер зерна, объем зерна.

На основі рішення спільної задачі теплопровідності та термопружності в зоні дії лазерного випромінювання досліджені поля температур, температурних напружень, швидкостей росту температури і, з урахуванням критеріїв освіти наноструктур, визначено ефективні технологічні параметри для отримання наноструктур. За обсягами наноструктур визначені розміри зерна, що дозволило оцінити ефективні технологічні параметри, необхідні для отримання наноструктур. Показано, що отримані наноструктури можуть істотно підвищити фізико-механічні характеристики інструментальної сталі У12, що дозволить використовувати її замість швидкорізальних сталей.

Ключові слова: ефективність отримання наноструктур, поля температур, температурні напруження, швидкість зростання температури, розмір зерна, обсяг зерна.

Based on the decision of joint problem of heat conduction and thermoelasticity in laser action zone investigated temperature field, thermal stress, temperature and growth rates, taking into account the criteria of formation of nanostructures defined effective technological options for nanostructures. On volumes of nanostructures defined grain sizes, which allowed us to estimate the effective process parameters required to produce nanostructures. It is shown that the resulting nanostructures can significantly improve the physical and mechanical properties of tool steel U12, which will use it instead of the high-speed steels.

Keywords: efficiency of production of nanostructures, temperature field, thermal stress, temperature, growth rate, grain size, the volume of grain.

Введение. Во всём мире большое количество лазерных установок не находят эффективного применения, так как появляются более совершенные, к использованию которых стремятся производители, а использование этих установок для получения наноструктур (НС) может дать им вторую жизнь. Наноструктуры могут существенно увеличить износостойкость за счет повышения микротвердости поверхностного слоя. Повышение предела текучести увеличит возможность воспринимать большие изгибные нагрузки, а образование слоя с остаточными сжимающими напряжениями может повысить усталостную прочность. Применение наноструктур снижает модуль упругости, что позволяет работать материалу с высокими относительными перемещениями, причем снятие нагрузки не даст изменения ни по размерам, ни свойствам материала.

Всё это говорит о возможности использовать результаты данного исследования в машиностроении.

Работа выполнена 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 дета-

лей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса. Несмотря на литературный бум в области нанотехнологии [1...11] исследованию вопроса получения наноструктур за счет использования лазерного излучения (ЛИ) практически нет. Всё это говорит о необходимости проведения таких исследований как теоретического, так и экспериментального плана.

Будет проведено теоретическое исследование на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости, а так же с учетом энергии кристаллизации НС. Очевидно, необходимо определять теплофизические и термомеханические характеристики материала как стохастическим, так и квантово-механическим методом.

Всё это позволит существенно приблизить физическую и расчетную картины процессов при действии лазерного излучения, а, следовательно, повысит точность расчета технологических параметров лазера для получения НС, что в свою очередь говорит об актуальности, важности и своевременности проводимого исследования.

Теоретическая модель и постановка задачи исследования. Методом двойной прогонки решалась совместная задача теплопроводности и термоупругости, причем на первом полушаге рассчитывались температуры, далее по этим температурам определялись температурных напряжений, а, следовательно, и энергия деформирования, с учётом которой определялась

© Г.И. Костюк, Ю.С. Панченко, 2017

температура в конце первого шага. На каждом шаге процедура повторялась. В результате решения этой задачи получены поля температур, температурные напряжения и скорости роста температуры; с учетом

их значений и критериев образования наноструктур оценивалась область детали, где образуются НС, а значит, определялся объем наноструктуры, по которому оценивался размер зерна.

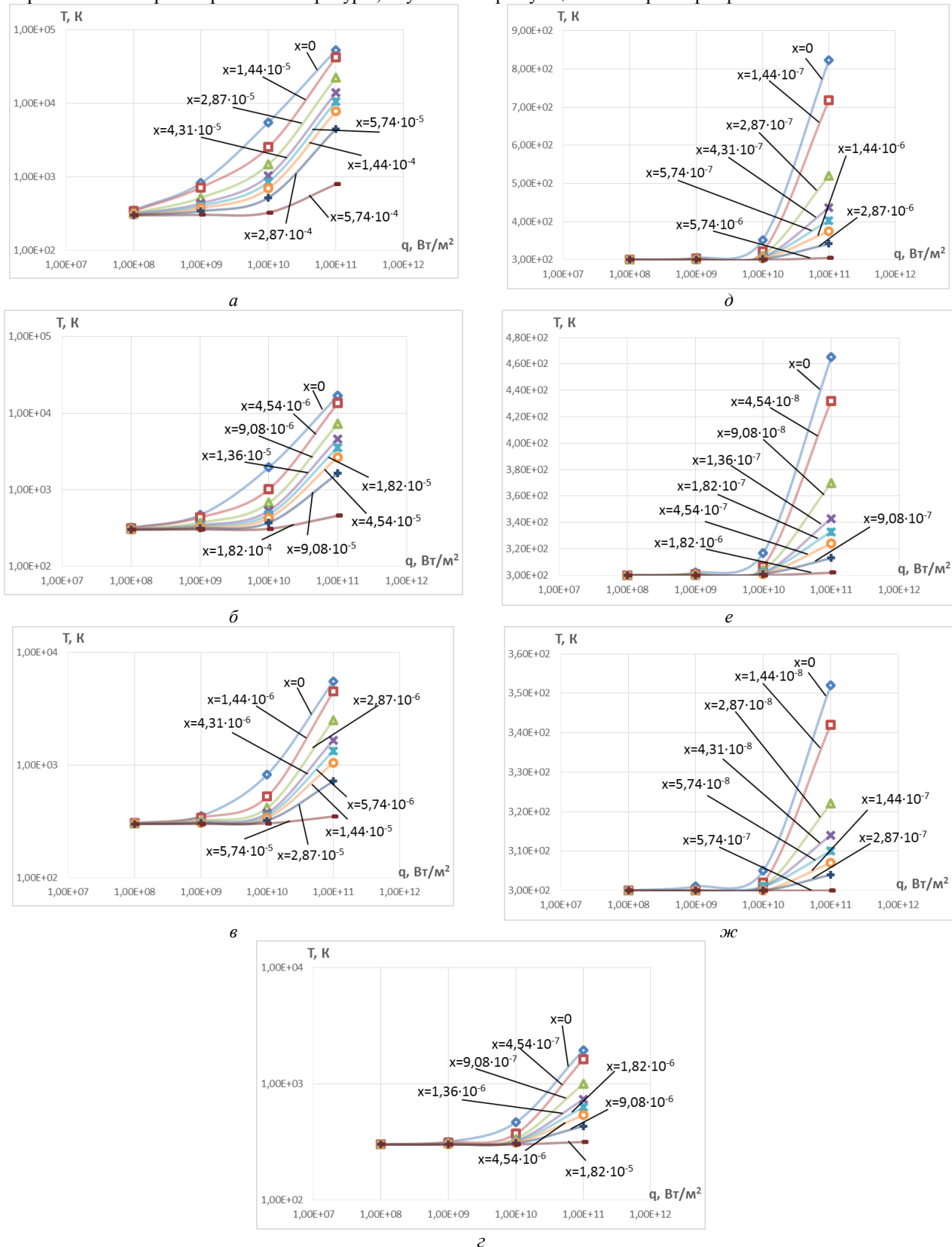


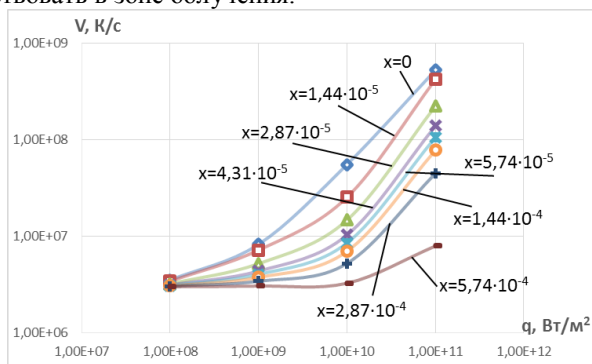
Рис. 1 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на У12 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-4}$ c; б – $t=10^{-5}$ c; в – $t=10^{-6}$ c; г – $t=10^{-7}$ c; д – $t=10^{-8}$ c; е – $t=10^{-9}$ c; ж – $t=10^{-10}$ c

Результаты расчетов и их обсуждение. На основе исследования температурных полей построены зависимости максимальной температуры от плотности теплового потока ($10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м²) и при действии лазерного излучения (рис. 1) за время а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с.

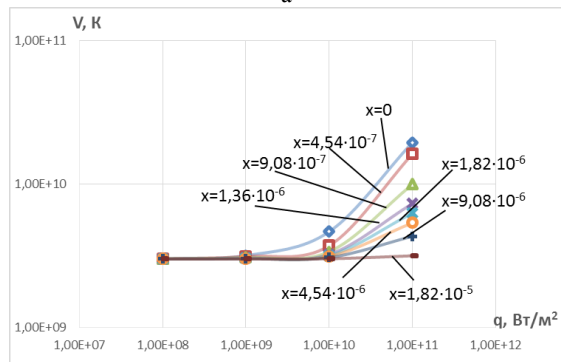
Видно, что при больших временах действия 10^{-4} , 10^{-5} с существует довольно широкая область плотностей тепловых потоков, для которых есть возможность реализации наноструктур на разных глубинах (рис. 1 а, б), тогда как со снижением времени действия до 10^{-6} , 10^{-7} с эта область перемещается в сторону больших тепловых потоков 10^{10} , 10^{11} Вт/м². Дальнейшее снижение времени действия приводит к тому, что практически только при действии ЛИ с плотностью теплового потока 10^{11} Вт/м² есть невысокая вероятность получения НС и то только на небольшой глубине вблизи поверхности.

Для оценки возможности получения НС за счет скорости роста температуры было проведено исследование влияния теплового потока ($10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м²) при временах 10^{-10} и 10^{-4} с, результаты которого представлены на рис. 2. Анализ результатов показывает, что практически для всех исследованных режимов этот критерий выполняется, так как скорость роста температуры превышает 10^7 К/с (рис. 2).

Так как температурные напряжения могут ускорять образование наноструктур при $10^7 \dots 10^9$ Па и даже могут непосредственно образовывать наноструктуры (более 10^{10} Па), то были рассчитаны максимальные температурные напряжения, которые могут действовать в зоне облучения.



а

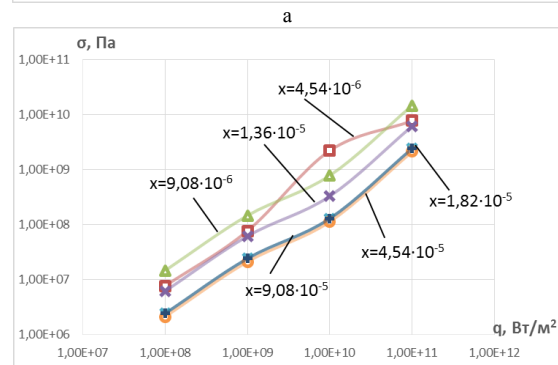
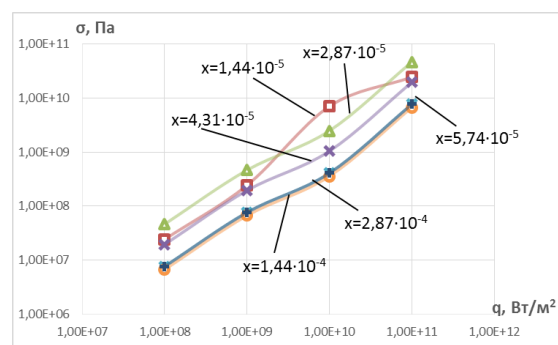


б

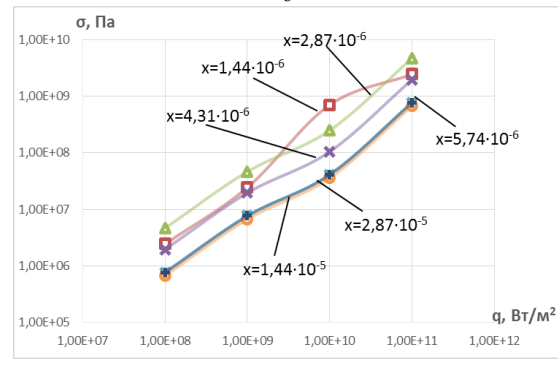
Рис. 2 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на У12 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с

Исследованы зависимости температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на инструментальную сталь У12 от плотности теплового потока на разных глубинах (рис. 3) при временах действия а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с. Видно, что при больших временах действия ЛИ 10^{-4} , 10^{-5} с есть режимы при тепловых потоках 10^{10} и тем более 10^{11} Вт/м², когда возможно получение НС за счет действия температурных напряжений. В остальных режимах и на больших глубинах есть возможность ускорить образование НС за счет температурных напряжений.

Снижение времени действия ЛИ приводит к тому, что при временах $10^{-6} \dots 10^{-8}$ с есть реальная возможность образования НС за счет действия температурных напряжений (рис. 3 в, г, д). В то же время при временах действия 10^{-9} , 10^{-10} с практически только на поверхности и то при действии теплового потока 10^{11} Вт/м² есть возможность ускорения образования НС. В остальных режимах температурные напряжения не приводят к росту скорости образования НС.



б



в

Рис. 3 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на У12 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с

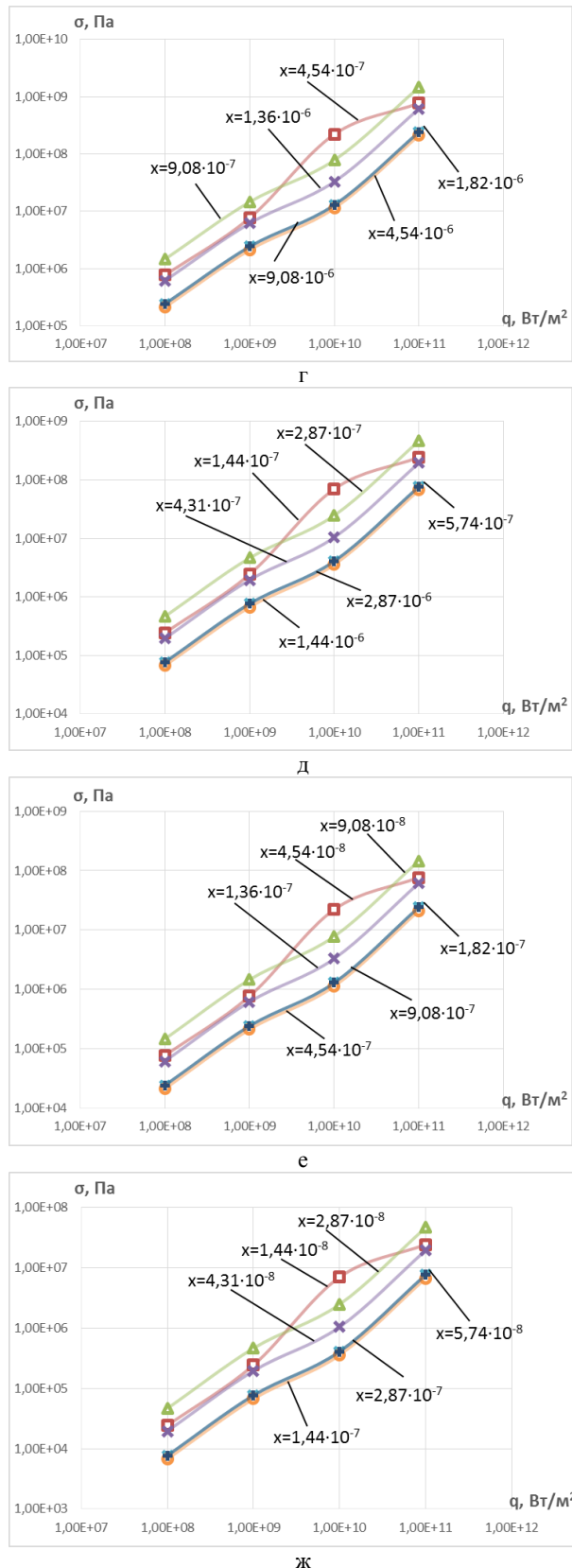


Рис.3 – Окончание

Для решения вопроса о выборе технологических параметров для получения НС были построены зависимости объема нанокластера от минимальной (а) и максимальной (б) глубины его залегания при действии ЛИ с различной плотностью теплового потока на У12 при радиусе пятна 10^{-6} м (рис. 4) и радиусе $5 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 5). Видно, что есть наиболее реальная

возможность получения НС при радиусе пятна $5 \cdot 10^{-7}$ м.

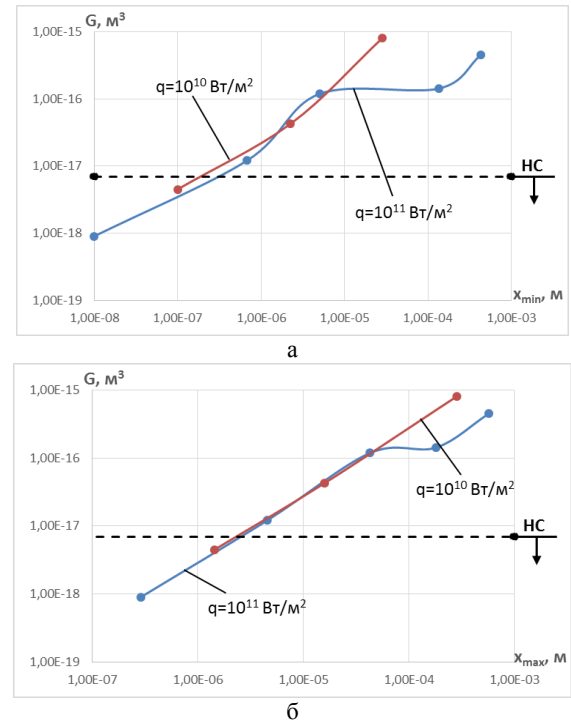


Рис. 4 – Зависимость объема нанокластера $R=10^{-6}$ м от: а – минимальной; б – максимальной глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q

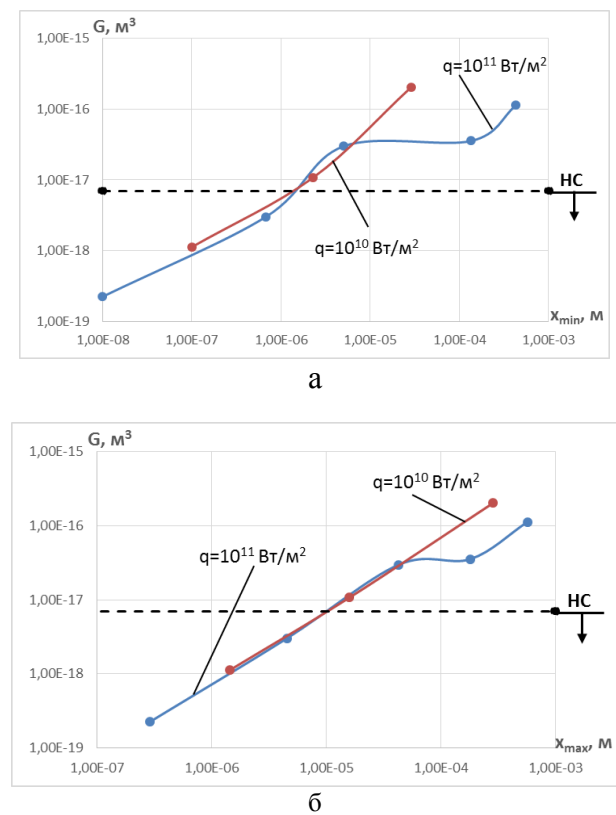


Рис. 5 – Зависимость объема нанокластера $R=5 \cdot 10^{-7}$ м от: а – минимальной; б – максимальной глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q

Для экспресс-оценки возможности получения наноструктур были построены зависимости объёма нанокластера от плотности теплового потока ЛИ и времени его действия, где представлены зоны технологических параметров, при которых получают НС для радиуса пятна 10^{-6} м (рис. 6) и радиуса $5 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 7). Видно, что эти зоны относительно не велики, а значит и выбор технологических параметров осложняется тем, что при нестабильности технологических параметров есть возможность получения вместо наноструктур субмикро- и микроструктур. Всё это говорит о том, что необходимо иметь лазеры с улучшенными технологическими параметрами для увеличения зоны, технологических параметров в которой реально возможность получать наноструктуры.

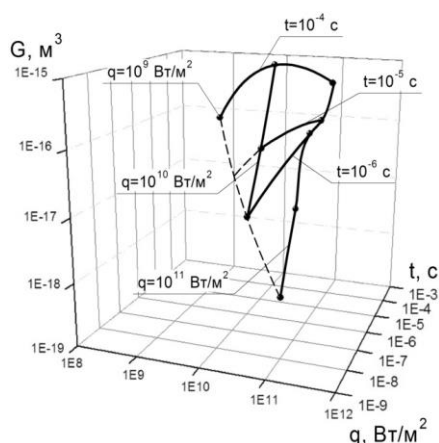


Рис. 6 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=10^{-6}$ м)

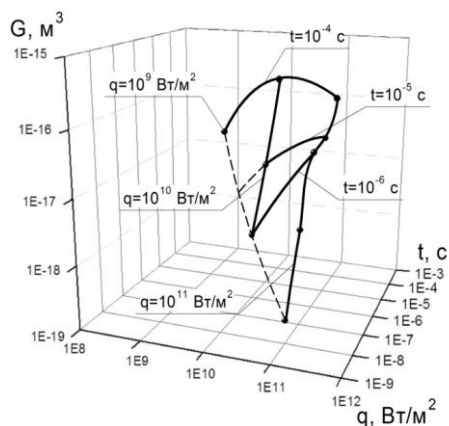


Рис. 7 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=5 \cdot 10^{-7}$ м)

Выводы.

1. Исследование температур в зоне действия излучения и температурных напряжений показало, что есть такие технологические параметры, при которых можно получить НС за счет реализации требуемого диапазона температур (500...1500 К) или в случае превышения температурных напряжений над 10^{10} Па. По скорости роста температуры при исследован-

ных параметрах ЛИ этот критерий достигается автоматически.

2. Показано, что применение пространственных картин зависимости объёма нанокластера от плотности теплового потока и времени его действия могут позволить быстро найти технологические параметры, при которых есть вероятность получения наноструктур.

Список литературы

1. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрывтиями и наноструктурными модифицированными слоями: Монография-справочник: в 2 кн./Г.И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. 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.
3. 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.
4. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокрывтия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. 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.
6. 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.
7. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АИТУ, 2003. – 412 с.
8. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
10. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
11. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский// Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.

Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: sprav. G.I. Kostyuk. Kiev. Vid-vo «Planeta print», 2016. – 735 p.
2. Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur [Tekst]: monogr. G.I. Kostyuk. Kiev. Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. – 472 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: sprav. G.I. Kostyuk. – Kiev. Vid-vo AITU, 2003. – 412 p.
8. Grechikhin, L.I. Fizika nanochastits i nanote-khnologiy [Tekst] / L.I. Grechikhin. – Moscow. UP «Tekhnoprint», 2004. – 397 p.
9. Aksekov, I.I. Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy

[Tekst] / I.I. Aksenov. Kharkov: Izd-vo NII «KHFTI», 2005. 211 p.
10. Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii [Tekst] / A.I. Gusev. - Moscow. Fizmatlit, 2005. 416 p.

11. Andriyevskiy, R.A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Tekst] R.A. Andriyevskiy. Fizika metallov i metallovedeniye. 2003. Vol. 91, No 1. pp.50 - 56.

Поступила (received) 15.03.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Эффективность получения наноструктур на инструментальной стали у12 за счет действия лазерного излучения / Г. И. Костюк, Ю.С. Панченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 61–66. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Эффективность получения наноструктур на инструментальной стали у12 за счет действия лазерного излучения / Г. И. Костюк, Ю.С. Панченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 61–66. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Efficiency of obtaining nanostructures on instrumental steel u12 due to the action of laser radiation / G.Kostiuk, Yu.Panchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.61–66. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Костюк Геннадий Игоревич – доктор технических наук, профессор Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», м. Харьков; тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovsky, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Панченко Юлія Сергіївна - студентка кафедри теоретичної механіки, машинознавства і роботомеханічних систем, Національного аерокосмічного університету ім. Жуковського М.Є. «ХАІ», тел. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Панченко Юлия Сергеевна – студентка кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национального аэрокосмического университета им. Жуковского Н.Е. «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Panchenko Julia Sergeevna - student of the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robot Mechanics, National Aerospace University. Zhukovsky N.E. "KhAI", tel. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

УДК 62-229.32

М.А. НОВІК, О.Я. ЮРЧИШИН, В.В. МУЗИЧЕНКО

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗКАМЕРНИХ ЗАТИСКНИХ ПАТРОНІВ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ РІЗАННЯМ

Розкрито проблема створення і дослідження малогабаритних, надійних в роботі і простих за конструкцією затискних патронів для високооборотної обробки матеріалів різанням на свердильних і фрезерних верстатах. Створення високооборотних мотор-шпинделів обумовило пошук і створення високооборотних затискних патронів, так як традиційні патрони, які характеризуються значними габаритними розмірами і постійним підводом тиску живлення для підтримання зусилля затиску, не достатньо надійні.

Розглянуто новітні безкамерні затискні патрони, які характеризуються незначними габаритними розмірами, можливістю регулювання в широкому діапазоні зусилля затиску-розтиску хвостовика інструмента. Приведені аналітичні залежності розрахунку напружень в небезпечному перерізі затискної тонкостінної втулки з урахуванням зусиль, що діють на неї при затиску-розтиску і при роботі. Запропоновані способи запобігання сповзання рухомої втулки і її захист від згинального і крутного моментів, які виникають в процесі різання.

Ключові слова: затискний патрон, високооборотна обробка, різання, верстат, зусилля затиску, напруження, втулка.

Раскрыта проблема создания и исследования малогабаритных, надежных в работе и простых по конструкции зажимных патронов для высокооборотной обработки материалов резанием на сверлильных и фрезерных станках. Создание высокооборотных мотор-шпинделей обусловило поиск и создание высокооборотных зажимных патронов, так как традиционные патроны, которые характеризуются значительными габаритными размерами и постоянным подводом давления питания для поддержания усилия зажима, недостаточно надежны.

Рассмотрены новейшие бескамерные зажимные патроны, которые характеризуются незначительными габаритными радиальными размерами, возможностью регулировки в широком диапазоне усилия зажима-разжима хвостовика инструмента. Приведены аналитические зависимости расчета напряжений в опасном сечении зажимной тонкостенной втулки с учетом усилий, действующих на нее при зажиме-разжиме и при работе. Предложены способы предотвращения сползания подвижной втулки и ее защиты от изгибающего и крутящего моментов, возникающих в процессе резания.

Ключевые слова: патрон, высокооборотная обработка, резание, станок, усилие зажима, напряжения, втулка.

The problems of creation and study of small, reliable in operation and simple in design clamping cartridges for high-speed machining for drilling and milling machines. Creating a high-speed motor spindles led search and create high-speed clamping cartridges, as traditional cartridges that are characterized by large dimensions and brings constant supply pressure to maintain clamping force not sufficiently reliable.

Considered new tubeless clamping chucks, which are characterized by small overall radial size adjustable over a wide range of clamping force, dot gain shank tool. Resulted analytical dependence of stress in a dangerous section of thin-walled clamping sleeve efforts considering acting on it with a clip-dot gain and at work. The proposed ways to prevent slipping her sleeve moving its protection against bending and twisting moments that occur during the cutting process.

Keywords: clamping chuck, high-speed machining, cutting, machine, clamping force, sleeve.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні прогресивні технології обробки матеріалів різанням характеризуються високими швидкостями різання і подач, що дає можливість значно підвищити якість обробки, точність і продуктивність [1]. При цьому зарубіжні і вітчизняні фірми використовують високооборотні мотор-шпинделі до 60 тис. обертів за хвилину і більше. По мірі збільшення обертів збільшується відцентрові сили, які пропорційні квадрату швидкості обертання і величині радіусу розміщення елементів патрона [2, 3]:

$$P_z = m \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \cdot R,$$

де m – маса затискного елемента; R – відстань від осі обертання до центра тяжіння затискного елемента, n – оберти затискного патрона.

Для зменшення відцентрової сили необхідно зменшувати масу затискних елементів і радіальні розміри патрона, що часто буває неможливо із-за радіального чи торцевого підводу рідини до камер затиску-розтиску.

Одним із способів компенсації відцентрового зусилля, що діє на затискну втулку запропонований в роботі [4] за рахунок кульок, які розташовані між кришкою і рухомою конічною втулкою з конічним торцем. Запропонований спосіб компенсації відцентрового зусилля має суттєвий недолік, так як ускладнюється конструкція затискного патрона і при малих кутах торця буде мати місце заклинювання кульок.

Другим способом компенсації відцентрового зусилля є підвищення зусилля затиску. Підвищення зусилля затиску може здійснюватися або за рахунок підвищення робочого тиску, що підводиться до камер затиску-розтиску, або за рахунок збільшення ефективних площ, на які діє тиск живлення [5]. Підвищення робочого тиску призводить до додаткових напружень на елементи патрона, що часто буває недопустимим, а збільшення ефективних площ, на які діє тиск живлення обумовлює збільшення габаритного радіального розміру і як наслідок до збільшення відцентрового зусилля.

Таким чином аналіз різноманітних схем затискних патронів дозволяє зробити висновок, що для зменшення дії відцентрового зусилля і габаритних розмірів доцільно використовувати безкамерні затискні патрони, які розглянуті в роботах [6, 7, 8].

Метою статті є розробка і дослідження безкамерних затискних патронів для високошвидкісної обробки матеріалів різанням на свердлувальних та фрезерувальних верстатах; отримання аналітичних залежностей для визначення номінального кута затискної пружної втулки з умови міцності і жорсткості в найбільш небезпечному перерізі.

Для досягнення мети в роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

- розробити оригінальні безкамерні затискні механізми;
- розробити алгоритм розрахунку оптимальних параметрів тонкостінної пружної затискної втулки;

© М.А. Новік, О.Я. Юрчишин, В.В. Музиченко, 2017

- запропонувати способи унеможливлення сповзання рухомої втулки із затискної під час роботи і підвищення передачі крутного моменту від шпинделя до інструмента.

Виклад основного матеріалу досліджень

Розглянемо конструкцію і процес затиску-розтиску безкамерного гідромеханічного затискного патрона, який показаний на рис. 1 [5].

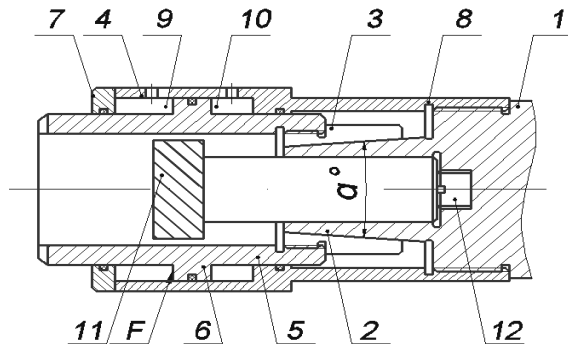


Рис. 1. – Безкамерний гідромеханічний затискний патрон

Безкамерний гідромеханічний затискний патрон складається з хвостовика 1, пружної тонкостінної затискної втулки 2, конічна поверхня якої спряжена з конічною поверхнею рухомої втулки 3. В циліндрі двобічної дії 4 розміщений поршень 5 з двостороннім полім штоком 6. До циліндра 4 приєднані кришки 7 і 8. Кришка 8 сполучена різьбовим з'єднанням з хвостовиком 1. Поршень 5 різьбовим з'єднанням сполучений з втулкою 3. Поршень 6 з циліндром 4 утворюють камеру затиску 9 і камеру розтиску 10. В циліндричному отворі затискної втулки розміщено хвостовик інструменту 11. У хвостовику 1 розміщений упор 12.

Затискний патрон працює наступним чином. У вихідному положенні поршень 5 згвинчений з втулкою 3, а циліндр 4 згвинчений з хвостовиком 1, камери 9 і 10 з'єднані з атмосферою. При подачі, наприклад, тиску живлення в камеру 9 втулка 3 наїжджає на втулку 2, яка деформується і затискує хвостовик інструмента 11. При подачі тиску живлення в камеру 10 і сполученні камери 9 з атмосферою відбувається розтиск хвостовика інструмента 11. Після затиску камера 9 з'єднується з атмосферою, розгвинчуються пари: шток 6 втулка 3, кришка 8 і хвостовик 1, тобто циліндр відокремлюється від затискного патрона.

На рис. 2. показана розрахункова схема навантаження безкамерного затискного патрона.

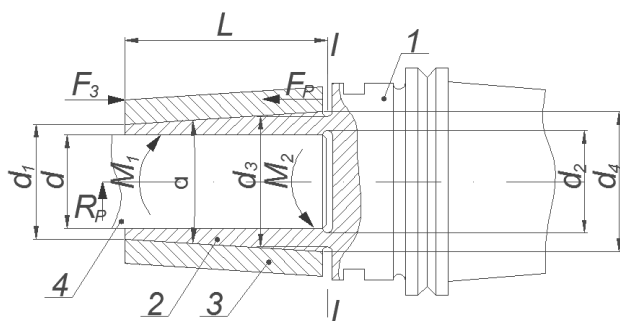


Рис. 2. – Схема навантаження безкамерного затискного патрона

Гідромеханічний затискний патрон складається з хвостовика 1, який закріплюється в шпинделі (на рисунку шпиндель не показано). Заодно з хвостовиком 1 виконана тонкостінна затискна втулка 2 з кутом конусності α , який менший за кут самогальмування. По конічній й поверхні затискної втулки 2 спряжена рухомо в осьовому напрямку втулка 3. В осьовому отворі втулки 2 розміщений циліндричний хвостовик, наприклад, ріжучого інструмента або заготовка.

Процес затиску-розтиску виконується наступним чином. Затиск хвостовика інструмента 4 здійснюється осьовим зусиллям F_3 , що діє на рухому втулку 3. Під дією зусилля F_3 втулка 3 рухається праворуч (за кресленням), відносно затискної втулки 2, яка деформується в радіальному напрямку і затискує хвостовик інструмента 4. Необхідне зусилля затиску F_3 забезпечується гідроциліндром або пневмоциліндром, які на рис. 1 не показані. Розтиск хвостовика інструмента 4 здійснюється аналогічно за рахунок осьового зусилля F_p рухома втулка 3 зміщується відносно затискної втулки 2 ліворуч при цьому зменшується її радіальна деформація, що призводить до розтиску хвостовика інструмента.

В процесі затиску в перерізі I-I виникають напруження стиснення величина якого визначається по залежності.

$$\sigma_c \geq \frac{4 \cdot F_3}{d_3^2 - d_2^2}, \quad (1)$$

де $d_2 = d + 2\Delta$; $d_3 = d - 2\Delta$; Δ – глибина розточок в перерізі I-I для виходу шліфувального круга.

Із залежності (1) отримуємо

$$d_3 \geq \sqrt{\frac{d_2^2 [\sigma_c] + 4F_3}{[\sigma_c]}}, \quad (2)$$

В процесі розтиску у перерізі I-I виникають напруження розтягу, які не можуть бути більшими за допустимі.

$$\sigma_p \geq \frac{4 \cdot F_p}{d_3^2 - d_2^2},$$

звідки

$$d_3 \geq \sqrt{\frac{d_2^2 [\sigma_p] + 4F_p}{[\sigma_p]}}, \quad (3)$$

При виконанні свердлувальних робіт затискна втулка навантажується від сил різання крутним моментом M_1 , під дією якого в перерізі I-I виникає внутрішній крутний момент M_2 рівний по величині і зворотний за напрямком.

При навантаженні затискної втулки крутним моментом, необхідно, щоб тангенціальні напруження не перевищували допустимі, тобто задовольнялася умова міцності.

$$[\tau_{\max}] \geq \frac{M_2}{W_p}$$

і умова жорсткості

$$\theta_{\max} = \frac{M_2}{I_p \cdot G}$$

де W_p – полярний момент опору; I_p – полярний момент інерції; G – модуль здвигу; θ – кут закручування.

Для полої затискної втулки 2 полярний момент опору в перерізі I-I

$$W_p = \frac{\pi \cdot d_2^3}{16} \left[1 - \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^4 \right] = \frac{M_2}{[\tau_k]}$$

звідки, з умови міцності

$$d_3 \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_2}{\pi \cdot \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_3} \right)^4 \right] \cdot [\tau_k]}} \quad (4)$$

З умови жорсткості діаметр d_3 визначається по залежності

$$d_3 \geq \sqrt[4]{\frac{32 \cdot M_2}{G \cdot \pi [\theta] \cdot \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_3} \right)^4 \right]}}$$

$$d_3 \geq \sqrt[4]{d_2^4 + \frac{32 \cdot M_2}{G \cdot \pi [\theta]}} \quad (5)$$

Кут закручування для полої втулки 2 визначається по формулі

$$\theta = \frac{M_2}{2\pi \cdot r_c^3 \cdot G \cdot \delta'}$$

$$\text{де } r_c = \frac{r_3 + r_2}{2}; r_3 = \frac{d_3}{2}; r_2 = \frac{d_2}{2}; \delta' = \frac{d_3 - d_2}{2};$$

При виконанні фрезерувальних робіт на затиску втулку 2 діють одночасно, як крутий момент, так і згинальний момент від радіальної сили R_p

При цьому розрахунок на міцність проводиться для полої втулки по формулі

$$d_3 \geq \sqrt{\frac{32W}{\pi \left(1 - \frac{d_2^4}{d_3^4} \right)}}$$

$$W \geq \sqrt{\frac{M_2^2 + 0,45M_3^2}{[\sigma_3]}} \quad (6)$$

де M_2 – крутий момент; M_3 – згинальний момент; $[\sigma_3]$ – допустимі згинальні напруження.

Висновки

Таким чином, діаметр d_3 втулки 2 в перерізі I-I визначають з умов міцності і жорсткості по залежностях (2 – 6). За кінцеве значення розміру d_3 беруть найбільше його значення. По отриманому значенню кінцевого розміру d_3 визначаємо значення діаметра d_4 в перерізі I-I.

$$d_4 = d_3 + 2\Delta$$

По отриманому значенню d_4 і по значенню d_1 визначається кут конусності втулки 2

$$\alpha = 2 \arctg \frac{d_4 - d_1}{2 \cdot l}$$

де l – довжина втулки 2 від переднього торця до перерізу I-I.

В тих випадках коли необхідно суттєво підвищити величину крутного моменту, що передається від шпинделя на інструмент необхідно після затиску інструмента жорстко з'єднати рухому втулку з хвостовиком патрона шпоночним з'єднанням, як показано в роботі [9], або гвинтовим з'єднанням [8]. При з'єднанні (після затиску) рухомої втулки з хвостовиком патрона гвинтами, унеможливилося її сповзання із затискної втулки під час роботи

Список літератури

1. Карпусь В. С. Інтенсифікація процесів механічної обробки: монографія / В. С. Карпусь, В. О. Іванов, О. В. Котляр та ін.; за ред. В. С. Карпуся. – Суми : Сумський державний університет, 2012 – 436 с., doi: 10.13140/2.1.3953.7604.
2. Кузнєцов Ю.М. Принципи створення інструментальних патронів для високошвидкісної обробки // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Вип.17., Кіровоград – 2006. 134-141.
3. Каталог фірми SCHUNK. Polygon-spontech, Tribs.2004.
4. Кузнєцов Ю.М., Новік М.А., Забарний М.С., Грисюк О.В. Удосконалення інструментальних затискних патронів для високошвидкісної обробки // Вестник национального технического университета Украины «КПИ», Машиностроение, вип.51, – Киев. 2007. С. 176-182.
5. Новік М.А. Музиченко В.В. Порівняльний аналіз гідромеханічних затискних патронів // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідравліка та пневматика», Київ – 2013. - №2(40). 80-83.
6. Патент України №106544. МПК B23B 31/10 (2006.01), B23B 31/30 (2006.01), Гідромеханічний затискний патрон / Новік М.А., Музиченко В.В.: опубл. 10.09.2014р., Бюл.№17.
7. Патент України №109333. МПК B23B 31/10 (2006.01), B23B 31/30 (2006.01), Затискний патрон / Новік М.А., Музиченко В.В.: опубл. 10.08.2015р., Бюл.№15.
8. Патент України №93291. МПК B23B 31/00, B23B 31/30 (2006.01), Затискний патрон / Новік М.А., Музиченко В.В.: опубл. 25.09.2014р., Бюл.№18.
9. Патент України №90797. МПК B23B 31/10, B23B 31/30 (2006.01), Гідромеханічний затискний патрон / Новік М.А., Кузнєцов Ю.М.: опубл. 25.05.2010р., Бюл.№10.

References (transliterated)

1. Karpus V.E., Ivanov V.O., Kotliar O.V. et al. Intensyfikacija procesiv mehaničnoj obrobki [Intensification of Manufacturing Processes]; edited by V. E. Karpus. Sumy, Sumy State University, 2012, 436 p., doi: 10.13140/2.1.3953.7604.
2. Kuznecov Ju.M. Principi stvorennja instrumental'nih patroniv dlja visokoshvidkisnoj obrobki [Principles creation tool cartridges for high-speed machining]. Zbirnik naukovih prac' Kirovograd'skogo nacional'nogo tehničnogo universitetu. N17., Kirovograd – 2006. p.134-141.
3. Product company SCHUNK. Polygon-spontech, Tribs.2004.
4. Kuznecov Ju.M., Novik M.A., Zabarnij M.S., Grisjuk O.V. Udoshonalennja instrumental'nih zatisknih patroniv dlja visokoshvidkisnoj obrobki [Improvements tool clamping chucks for high-speed machining]. Vestnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta Ukrainy «KPI», Mashinostroenie, N51, –Kiev. 2007. p. 176-182.
5. Novik M.A. Muzichenko V.V. Porivnjal'nij analiz gidromehaničnih zatisknih patroniv [Comparative analysis of hydromechanical clamping cartridges]. Vseukraїns'kij nauko-vo-tehničnij zhurnal «Promislova gidravlika ta pnevmatika», Kiїv – 2013. - №2(40). p.80-83.

6. Patent Ukraine N106544. MPK B23B31/10, B23B31/30. Hidromehanichnij zatisknij patron. [Hydromechanical clamping chuck]. Novik M.A., Muzichenko V.V. 10.09.2014, N17.
7. Patent Ukraine N109333. MPK B23B31/10, B23B31/30. Zatisknij patron [Clamping chuck]. Novik M.A., Muzichenko V.V. 10.08.2015, N15.
8. Patent Ukraine N93291. MPK B23B31/10, B23B31/30. Zatisknij patron [Clamping chuck]. Novik M.A., Muzichenko V.V. 25.09.2014, N18.
9. Patent Ukraine N90797. MPK B23B31/10, B23B31/30. Hidromehanichnij zatisknij patron. [Hydromechanical clamping chuck]. Kuznecov Ju.M., Novik M.A., Muzichenko V.V. 25.05.2010, N10.

Поступила (received) 17.03.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження статичних та динамічних характеристик безкамерних затискних патронів для високошвидкісної обробки матеріалів різанням / М.А. Новік, О.Я. Юрчишин, В.В. Музиченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 67–70. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Исследование статических и динамических характеристик бескамерных зажимных патронов для высокоскоростной обработки материалов резанием / Н.А. Новік, О.Я. Юрчишин, В.В. Музиченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 67–70. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Investigation of static and dynamic characteristics tubeless clamping cartridges for high-speed machining / M. Novik, O. Yurchyshyn, V. Muzychenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.67–70. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новік Микола Андрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання верстатів та машин НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (044) 204-94-61, e-mail: ssaavvaafc@mail.ru;

Юрчишин Оксана Ярославівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання верстатів та машин НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

Музиченко Віталій Вікторович – інженер, аспірант кафедри конструювання верстатів та машин НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (044) 204-94-61;

Новик Николай Андреевич - кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования станков и машин НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев; тел.: (044) 204-94-61; e-mail: ssaavvaafc@mail.ru;

Юрчишин Оксана Ярославовна - кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования станков и машин НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев; тел.: (044) 204-94-61; e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

Музыченко Виталий Викторович - инженер, аспирант кафедры конструирования станков и машин НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев; тел.: (044) 204-94-61;

Novik Mykola – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 204-94-61, e-mail: ssaavvaafc@mail.ru;

Yurchyshyn Oksana – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, tel.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

Muzychenko Vitalij – engineer, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, tel.: (044) 204-94-61.

УДК 621.923

А.А. ПЕРМЯКОВ, А.А. КЛОЧКО, Ю.А. СИНИЦА

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ РЕЕК СПАРЕННЫМИ ФРЕЗАМИ

Наведено аналітичні залежності для визначення миттєвої площі перетину зрізаного шару і встановлені технологічні параметри стабілізації процесу формоутворення. Теоретично доведено, що характер зміни миттєвих параметрів формоутворення для певних умов обробки визначає параметри стабілізації і можливість управління якістю і точністю поверхневого шару зубчатих рейок. Оптимальний кут неузгодженості між зуб спарених дискових зуборізних фрез задають з умови найменшого значення середньоквадратичного відхилення сили різання від її середнього значення. Методика постановки задачі по аналітичному дослідженню, за допомогою програмного забезпечення технологічних параметрів обробки, що впливають на нестационарність формоутворення задається параметрами зубчастого виробу.

Ключові слова: технологічні параметри, лезова обробка, зубчата рейка, спарена фреза, параметри стабілізації, кут неузгодженості, сила різання.

Приведены аналитические зависимости для определения мгновенной площади сечения срезаемого слоя и установлены технологические параметры стабилизации процесса формообразования. Теоретически доказано, что характер изменения мгновенных параметров формообразования для определенных условий обработки определяет параметры стабилизации и возможность управлением качеством и точностью поверхностного слоя зубчатых реек. Оптимальный угол рассогласования между зубьями спаренных дисковых зуборезных фрез задают из условия наименьшего значения среднеквадратичного отклонения силы резания от ее среднего значения. Методика постановки задачи по аналитическому исследованию, с помощью программного обеспечения технологических параметров обработки, влияющих на нестационарность формообразования задается параметрами зубчатого обрабатываемого изделия.

Ключевые слова: технологические параметры, лезвийная обработка, зубчатая рейка, спаренная фреза, параметры стабилизации, угол рассогласования, сила резания.

Analytical dependencies are given for determining the instantaneous cross-sectional area of the cut layer and the technologic parameters of the stabilization of the forming process are established. It has been theoretically proved that the nature of the change in the instantaneous shaping parameters for certain processing conditions determines the stabilization parameters and the possibility to control the quality and accuracy of the surface layer of the rack gears. The optimum angle of mismatch between the teeth of twin disc gears is set from the condition of the smallest value of the root-mean-square deviation of the cutting force from its mean value. The method of statement of the problem on analytical research, with the help of software technological processing parameters, affecting the nonstationary formation is specified by the parameters of the toothed workpiece.

Keywords: Technological parameters, blade processing, rack, paired milling cutter, stabilization parameters, angle of mismatch, cutting force.

Постановка проблемы. При формообразовании зубьев реек методом профильного копирования дисковыми фрезами [1] или набором дисковых фрез не достигается требуемое качество обрабатываемой поверхности зубьев и их точность. Основными причинами снижения качества обрабатываемой поверхности являются повышенный износ режущей части инструмента в результате прерывистости процесса обработки, неравномерности снятия припуска, повышенной вибрации при врезании зуба фрезы при котором изменяется нагрузка на режущую кромку, что приводит к дестабилизации процесса формообразования. Стабилизация процесса формообразования выражается изменением силы резания в зависимости от траектории движения инструмента и выбранной схемы резания.

Анализ последних исследований и публикаций. Важным параметром обеспечения стабилизации процесса формообразования является количество одновременно находящихся в зоне обработки зубьев фрез. С учетом свободного размещения стружки во впадине стружечной канавки при фрезеровании стали с глубиной резания t и подачей на зуб S_z наибольшее число зубьев фрезы Z диаметром D определяется по формуле [1] $Z=0,2 D/t^{0,5} S_z^{0,5}$ и для общемашиностроительных нормативов регламентируется в пределах 6-14, что предопределяет одновременное нахождение в зоне обработки 0-2 зуба фрезы, т.е. коэффициент перекрытия $0 \leq K_n \leq 2$ и является одной из причин дестабилизации процесса обработки. Нестабильность процесса формообразования негативно отражается на качестве поверхностного слоя зубьев, его эксплуата-

ционных свойствах, что подтверждается теоретическими и практическими исследованиями в области оптимизации параметров состояния поверхностного слоя деталей машин [5, 6, 7]. Контактное взаимодействие реальных поверхностей зубьев реек и сопрягаемых зубчатых колес показывает, что характер деформации микронеровностей и волн определяется в значительной мере их физико-механическими характеристиками, которые, в свою очередь, изменяются в результате пластических и упругих деформаций, вызванных непосредственным давлением режущей кромки инструмента и нестабильностью процесса формообразования.

Цель работы – обеспечение показателей качества поверхностного слоя и повышение эксплуатационных характеристик зубчатых реек, путем стабилизации процесса формообразования. **Изложение основного материала.** Фрезерование зубьев зубчатых реек осуществляется с использованием спаренных дисковых зуборезных фрез 1 и 2, которые имеют определенный шаг, кратный нарезаемому шагу зубчатого изделия, при этом кратность выражается целым числом (рис. 1). В зоне обработки при съеме металла постоянно находится три и более зубьев 3-5, при этом передняя поверхность зуба 5 фрезы 2 располагается между двумя передними поверхностями зубьев 3 и 4 фрезы 1. При выходе из зоны резания зуба 3 фрезы 1 последующий зуб 4 фрезы 1 входит в зону резания, но при этом в зоне резания находится зуб 5 фрезы 2, расположенный под определенным углом рассогласования по отношению к зубьям фрезы, который обуславливает стационарность технологических параметров

© А.А. Пермяков, А.А. Ключко, Ю.А. Сеница, 2017

профильного формообразования. Во время обработки зубья 3 и 4 фрезы 1 и зубья 5 и 6 фрезы 2 контактируют с изделием 7. Угловой шаг между зубьями фрез Δ , а наибольший угол контакта зубьев фрезы с обрабатываемым изделием $\Psi_{\max}$. Шаг между зубьями спаренных фрез модулем m выражением $t = \pi \cdot m$, причем зубья фрез 1 и 2 располагают при виде с торца под углом рассогласования $\beta_{\text{опт}}$ [2].

Оптимальный угол рассогласования между зубьями спаренных дисковых зуборезных фрез задают из условия наименьшего значения среднеквадратичного отклонения силы резания от ее среднего значения.

Методика постановки задачи по аналитическому исследованию, с помощью программного обеспечения технологических параметров обработки, влияющих на нестационарность формообразования задается параметрами зубчатого обрабатываемого изделия: m - модуль зацепления; исходный контур зубьев, геометрические размеры изделия, ширина впадины B ; параметрами дисковой зуборезной фрезы: $D = 2 \cdot R$ - наружный диаметр фрезы; α - угол профиля, Z - число зубьев фрезы; режимами резания: подача на зуб S_z , постоянные коэффициенты A_1, A_2 , характеризующие условия обработки.

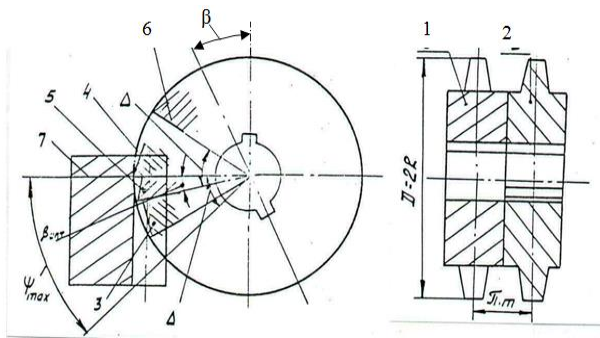


Рис. 1 – Синтез параметров операции зубонарезания реек спаренными дисковыми фрезами: 1 -спаренная дисковая зуборезная фреза левая; 2 -спаренная дисковая зуборезная фреза правая; 3, 4 –смежные режущие зубья фрезы левой; 5, 6 -смежные режущие зубья фрезы правой; 7 – обрабатываемая зубчатая рейка

Конструкторско-технологические данные: свойства обрабатываемого материала учитываются коэффициентами C_1, K , приведенными в [3]; способ профильного формообразования зубьев реек дисковыми зуборезными фрезами по одной из схем, приведенных на рис.2.

Таким образом необходимо определить оптимальный угол β между зубьями спаренных дисковых зуборезных фрез при виде с торца (рис. 1) из условий минимального колебания результирующей силы резания $P_{\text{общ}}$ при различных схемах формообразования (рис. 2).

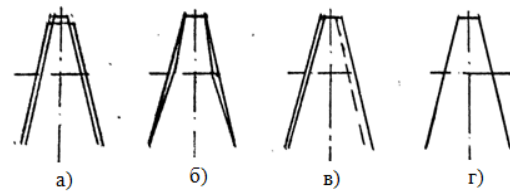


Рис. 2 – Схема профильного формообразования зубьев реек: а – прогрессивная схема формообразования с чередованием вершинных и профильных зубьев инструмента; б – прогрессивная схема формообразования с чередованием вершинных и профильных зубьев инструмента с «протуберанцем»; в – прогрессивная схема формообразования с чередованием профильно-вершинных односторонних зубьев инструмента с левым и правым профилями; г – контурный полный способ формообразования

Методика расчета.

Рассматривается наиболее общий способ формообразования зубьев реек контурным фрезерованием по всему профилю (рис.2, г). Сила резания при обработке впадины одним зубом в общем виде может быть представлена выражением

$$P_1 = C_1 \cdot S_z^{k+1} \cdot \sin^{k+1} \psi \cdot \left[B + A_3 \cdot \sin^{k+1} \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}} \cdot \left(R - \frac{R-2,25 \cdot m}{\cos \psi} \right) \right], \quad (1)$$

$$\text{где } A_1 = C_1 S_z^{k+1}; \quad A_2 = \left[A_3 \cdot \sin^{k+1} \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}} \right];$$

$A_3 = 1$ при обработке левого или правого профиля; $A_3 = 2$ при обработке левого и правого профилей одновременно.

Выражение (1) запишем в виде

$$P_1 = P_1(\psi) = C_1 \cdot S_z^{k+1} \cdot \sin^{k+1} \psi \cdot \left[B + A_2 \cdot A_3 \cdot \left(R - \frac{R-2,25 \cdot m}{\cos \psi} \right) \right], \quad (2)$$

где B - ширина впадины зуба обрабатываемой рейки 7.

Выражение (2) при соответствующем значении ширины впадины B и коэффициента A_3 описывает значение силы резания при выборе любого способа профильного формообразования зубьев реек.

Суммарная сила резания при нахождении в зоне резания двух или одного зубьев одной фрезы при изменении угла контакта Ψ по ниже приведенной формуле:

$$P(\psi) = \left\{ \frac{P_1(\psi) + P(\psi + \Delta), \text{ если } 0 \leq \psi \leq (\psi_{\max} - \Delta)}{P_1(\psi), \text{ если } (\psi_{\max} - \Delta) \leq \psi \leq \Delta} \right\}, \quad (3)$$

где $\Delta = \frac{360^\circ}{z}$ - угол между зубьями 3 и 4 фрезы 1 и соответственно между зубьями 5 и 6 фрезы 2 (рис. 3), $\psi_{\max} = \arccos \left(1 - \frac{2,25 \cdot m}{R} \right)$ - наибольший угол кон-

такта.

Результирующая сила резания $P_{общ}$ при использовании спаренных фрез 1 и 2 с углом рассогласования β зубьев фрезы 2 относительно фрезы 1 определяется функцией:

$$P_{общ} = P(\psi) + P(\psi + \beta), \quad (4)$$

где $P(\psi)$ - сила резания при обработке одной фрезой; $P(\psi + \beta)$ - сила резания при обработке 2-й фрезой, зубья которой расположены по отношению к зубьям 1-й фрезы под углом β при виде с торца, $P_{общ}$ - результирующая сила резания при использовании спаренных фрез с углом рассогласования β зубьев 2-й фрезы относительно зубьев 1-й фрезы при виде с торца.

Изменение параметра $\beta_{опт}$ зубонарезания реек при обеспечении стабилизации процесса формообразования спаренными фрезами показано на рис.3.

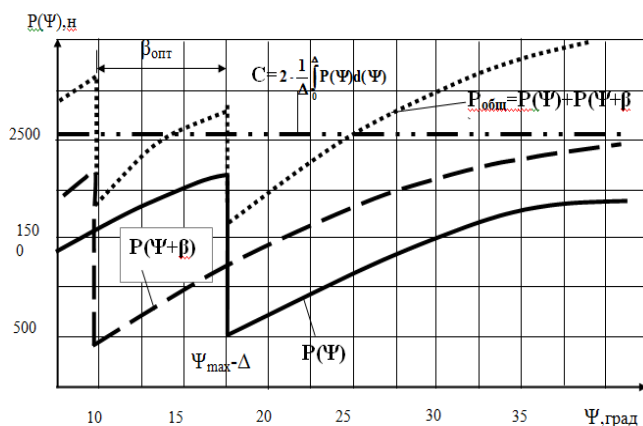


Рис. 3 – Изменение параметра $\beta_{опт}$ зубонарезания реек при обеспечении стабилизации процесса формообразования спаренными фрезами

Среднее значение силы резания C при обработке спаренными фрезами из формулы (3) и (4) определяется интегральной функцией:

$$C = 2 \frac{1}{\Delta} \cdot \int_0^{\Delta} P(\psi) d\psi, \quad (5)$$

Находится наименьшее расстояние ρ_{min} между интегральными функциями среднеквадратичного отклонения $P_{общ}$ от постоянной $C(5)$

$$\rho_i = \sqrt{\int [P(\psi) + P(\psi + \beta) - C]^2 \cdot d\psi}, \quad (6)$$

в интервале изменения β от $0 \leq \beta \leq \Delta$, где интервал $i = 1, 2, \dots, N$ с шагом $h = \frac{\Delta}{N}$.

Среди полученных значений ρ_i выбирается

наименьшее ρ_{min} , которое соответствует оптимуму угла рассогласования $\beta_{опт}$.

На основании изложенного метода разработан алгоритм выбора оптимальных параметров угла между зубьями спаренных дисковых зуборезных фрез.

Блок-схема алгоритма нахождения ρ_{min} и $\beta_{опт}$ представлена на рис.4.

Данный способ фрезерования зубьев спаренными фрезами реализуется при обработке зубчатых изделий модулем до 40мм на режимах резания соответствующим общемашиностроительным.

Инструмент может быть оснащен режущей частью из быстрорежущей стали P6M5K5 (CHГ), S6-5-2-5 (Германия), SKH55 (Япония) или марками твердого сплава подгруппы применения по ISO K10-K20 - MK8 (MC318), M10 - MF1 (MC3215), P15-P20 - MF2 (MC1466).

На базе этого алгоритма разработана программа стабилизации технологических параметров обработки зубчатых реек за счет изменения среднеквадратичной интегральной функции для расчета оптимального угла рассогласования (см. приложение Б) и проведены математические расчеты на ЭВМ для использования в практике разработки технологического обеспечения параметров обработки дисковыми зуборезными фрезами при предварительном и окончательном формообразовании зубчатых изделий.

Оптимизация технологического обеспечения геометрических параметров состояния поверхностного слоя при профильном формообразовании зубьев колес и реек осуществляется по углу рассогласования $\beta_{опт}$, соответствующего наименьшему значению среднеквадратичного отклонения параметра интегральной функции от ее среднего значения.

Для зубчатой рейки тяжелого токарного станка мод.1K670Ф3 :

Модуль $m = 10$ мм, угол исходного профиля $\alpha = 20^\circ$, размеры сечения рейки 100x80мм, длина рейки 800мм, степень точности 7-В ГОСТ10242-81. Инструмент: сталь P6M5, диаметр фрезы $D = 285$ мм, число зубьев фрезы $Z = 12$.

Режимы резания: скорость резания $V = 20$ м/мин, минутная подача $S_{мин} = 40$ мм/мин, предварительное нарезание профиля зубьев с припуском 0,8мм по хорде толщины зуба на измерительной высоте, обрабатываемый материал сталь АЦ40Х, заготовка –поковка; термообработка - нормализация НВ 176...217, коэффициенты, входящие в формулу определения силы резания, $C_1 = 68,2$, $k = 0,72$ [].

$$P_1 = f(S_2; C_1; A_1; A_2; A_3; \Delta; \psi_{max}; k; R; m; \lambda),$$

Где

$$\psi_{max} = \arccos \left(1 - \frac{2,25 \cdot m}{R} \right) = \arccos \left(1 - \frac{2,25 \cdot 10}{145} \right) = 32^\circ 24'$$

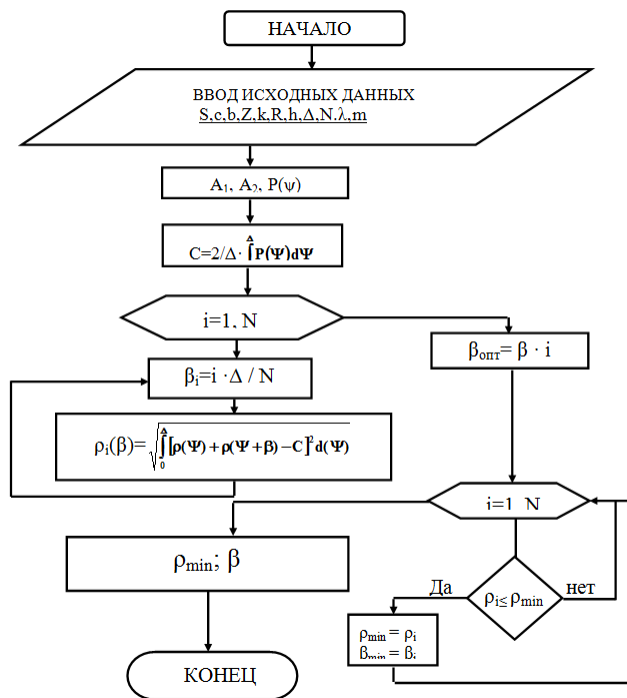


Рис. 4 – Блок-схема алгоритма нахождения оптимального значения угла рассогласования $\beta_{\text{опт}}$ и минимального значения расстояния между интегральными функциями среднеквадратичного отклонения $\rho_{\min}$

На базе алгоритма нахождения наименьшего значения расстояния $\rho_{\min}$ между функциями среднеквадратичного отклонения $P_{\text{общ}}$ от постоянной $C(5)$ в интервале изменения β от $0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ ($i=1,2,3-20$) с шагом $h = \frac{30^\circ}{20} = 1,5^\circ$ выбирается наименьшее $\rho_{\min}$, которое соответствует оптимуму угла рассогласования $\beta_{\text{опт}}$.

Оптимальный угол рассогласования $\beta_{\text{опт}}$, отвечающий минимальному значению расстояния между интегральными функциями среднеквадратичного отклонения $P_{\text{общ}}$ от постоянной C .

Результаты счета для конкретного примера при $\Delta = 30^\circ$, наибольшем угле контакта $\Psi_{\text{max}} = 32^\circ 24'$, $S_m = 40 \text{ мм/мин}$, $V = 20 \text{ м/мин}$, $D = 2R = 290 \text{ мм}$, $\rho_{\min} = 2,76788$, $\beta_{\text{опт}} = 19^\circ 30'$. Оптимальный параметр угла рассогласования $\beta_{\text{опт}}$, отвечающий максимальной стационарности сил резания, $\beta_{\text{опт}} = 19^\circ 30'$ - единственный.

При использовании трех- и четырехрядных дисковых зуборезных фрез угол между зубьями соседних фрез также рассчитывается по разработанной методике.

Стабилизация процесса формообразования моделирует математическую зависимость изменения положения режущей кромки зуба фрезы с обеспечением постоянной мгновенной площади (F_i) сечения срезаемого слоя на длине дуги резания.

Математическая модель траектории движения

зуба фрезы позволяет определить мгновенную площадь сечения срезаемого слоя и установить параметры стабилизации процесса формообразования.

Рассмотрим вывод формулы траектории движения зуба фрезы. Для нахождения длины пути L_i каждой точки режущего лезвия выберем систему координат, как показано на рис. 5.

Движение каждой точки режущей кромки фрезы складывается из вращательного движения вокруг оси ou с угловой скоростью ω и поступательного перемещения вдоль оси oz с минутной подачей $S_{\text{мин}}$.

Отдельно опишем поверхности, полученные при движении отрезков AB и BC . При повороте на угол Ψ_i вокруг оси ou координаты точки A

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \Psi_i \\ Z = R \cdot \sin \Psi_i \end{cases}$$

после перемещения вдоль оси oz на расстояние a

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \Psi_i \\ Z = R \cdot \sin \Psi_i + a \end{cases}$$

где $\Psi_i = \omega \cdot t$, $a = S_{\text{мин}} \cdot t$.

Таким образом, поверхность, полученная движением отрезка AB , имеет следующее параметрическое уравнение

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \omega \cdot t \\ Z = R \cdot \sin \omega \cdot t + S_{\text{мин}} \cdot t \end{cases}$$

т.е.

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \Psi_i \\ Z = R \cdot \sin \Psi_i + \frac{S_{\text{мин}}}{\omega} \cdot \Psi_i \end{cases}$$

Выразим математически движение, описываемое режущими профильными кромками BC зуба фрезы. Обозначим $BF=H$, $CF=B$, $\text{tg} \alpha = B/H = \lambda_i$, $AB=\Delta$.

После поворота на угол Ψ_i вокруг оси ou координата точки B

$$B(R \cdot \cos \Psi_i, \Delta, R \cdot \sin \Psi_i).$$

Координата точки C

$$C((R-H) \cdot \cos \Psi_i, (\Delta+B), (R-H) \cdot \sin \Psi_i).$$

Выберем единичный вектор, параллельный BC , учитывая, что направляющий вектор прямой BC равен

$$(-H \cdot \cos \Psi_i, B, -H \cdot \sin \Psi_i),$$

тогда

$$I_0 = \left(-\frac{\cos \psi_i}{\sqrt{1+\lambda^2}} = \gamma_1, \frac{X}{\sqrt{1+\lambda^2}} = \gamma_2, -\frac{\sin \psi_i}{\sqrt{1+\lambda^2}} = \gamma_3 \right).$$

После перемещения вдоль оси oz на расстояние a координата точки B

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \Psi_i \\ Y = \Delta \\ Z = R \cdot \sin \Psi_i + a \end{cases}$$

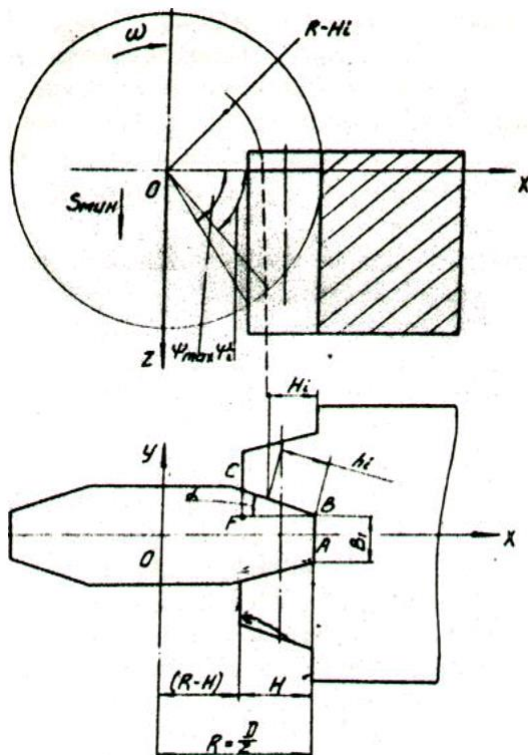


Рис. 5 – Система координат формообразования рабочих поверхностей зубьев: ou – координатная ось совпадает с осью вращения дисковой фрезы; oz – координатная ось соответствует направлению подачи фрезы.

Уравнение прямой выразится

$$\frac{X - R \cdot \cos \psi_i}{\gamma_1} = \frac{Y - \Delta}{\gamma_2} = \frac{Z - (R \cdot \sin \psi_i + a)}{\gamma_3} = h_i.$$

Параметрические уравнения поверхности при движении отрезка AB BC имеют вид

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \varpi \cdot t + h_i \cdot \gamma_1 = \cos \Psi_i \cdot \left(R - \frac{h_i}{\sqrt{1 - \lambda_i^2}} \right) = \cos \Psi_i \cdot B_2 \\ Y = \Delta + h_i \cdot \gamma_2 = \Delta + X \cdot B_2 \\ Z = R \cdot \sin \varpi \cdot t + S_{\min} \cdot t + h_i \cdot \gamma_3 = \sin \Psi_i \cdot \left(R - \frac{h_i}{\sqrt{1 - \lambda_i^2}} \right) + \frac{S_{\min}}{\varpi} \cdot \Psi_i \end{cases}$$

$$Z' = \cos \Psi_i \cdot B_2 + \frac{S_{\min}}{\varpi}$$

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \Psi_i \\ Y = R \cdot \sin \Psi_i + \frac{S_{\min}}{\varpi} \cdot \Psi_i \end{cases} \begin{cases} X' = R \cdot \sin \Psi_i \\ Y' = R \cdot \cos \Psi_i + \frac{S_{\min}}{\varpi} \end{cases}$$

На рис. 5 угол контакта фрезы $\Psi_{\max}$, соответствующий

длине дуги контакта с обрабатываемым профилем зуба определяется по формуле

$$\Psi_{\max} = \arccos \frac{R - H}{R} = \arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right).$$

В общем виде длина дуги контакта с обрабатываемым профилем зуба определится по формуле

$$L = \int_0^{\Psi_{\max}} \sqrt{X'^2 + Y'^2} \cdot d\psi$$

$$L = \int_0^{\Psi_{\max}} \sqrt{R^2 \cdot \sin^2 \psi + R^2 \cdot \cos^2 \psi + 2 \cdot R \cdot \frac{S_{\min}}{\omega} \cdot \cos \psi + \frac{S_{\min}^2}{\omega^2}} \cdot d\psi$$

После преобразования получим

$$L = R \cdot \psi_{\max} + \frac{S_{\min}}{\omega} \cdot \sin \psi_{\max}, \quad (7)$$

где $S_{\min} = S_0 \cdot n = Z \cdot S_z \cdot n = S_z \cdot Z \cdot (1000 \cdot V / \pi \cdot D)$, $\omega = 1000 \cdot V / 30$, рад/с. Тогда

$$\frac{S_{\min}}{\omega} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot S_z \cdot Z.$$

Значение текущего угла, соответствующего положению режущих кромок формообразующих зубьев фрезы

$$\Psi_i = \arccos \frac{R - H}{R'} = \arccos \left(\frac{R - H}{R - H_i} \right),$$

$$H_i = \frac{h_i}{\sqrt{1 + \lambda_i^2}}.$$

При рассмотрении изменения длины пути каждой точки режущего лезвия зуба фрезы L_i в зависимости от угла поворота фрезы в пределах $\Psi_i \Big|_0^{\Psi_{\max}}$

в формулу (7) вместо R подставим значение $B_2 = R - H_i$, тогда

$$L_i = B_2 \cdot \psi_i + \frac{S_{\min}}{\omega} \cdot \sin \psi_i = (R - H_i) \cdot \psi_i + \frac{S_{\min}}{\omega} \cdot \sin \psi_i.$$

С учетом перерасчета радиального измерения в градусное уравнение изменения положения каждой точки зуба фрезы, участвующего в формообразовании примет вид, удобный для практических расчетов

$$L_i = 0,017453 \cdot \left[\left(\frac{D}{2} - H_i \right) \cdot \psi_i^0 + 8,386555 \cdot S_z \cdot Z \cdot \sin \psi_i^0 \right],$$

где при угле наклона передней поверхности зуба фрезы

$$\lambda = 0^0, \text{ при } \lambda \neq 0^0$$

$$H_i \Big|_0^H = 2,25 \cdot m \quad H'_i = \frac{H_i}{\cos \lambda}$$

Подставляя в формулу определения толщины [1, 4] срезаемого слоя параметры процесса формообразования, получаем математическое моделирование для синтеза технологических параметров операции зубонарезания реек спаренными фрезами.

$$a_i = S_z \cdot \sin \Psi_i \cdot \sin \alpha_s \quad (9)$$

где α_s – угол профиля фрезы в рассматриваемой точке режущего лезвия.

Мгновенная площадь срезаемого слоя при изменении траектории движения режущего лезвия L_i (8) по боковым профилям $F_{np} = a_i \cdot H_i \cdot (1 + \lambda^2)^{1/2}$, по впадине $F_{np} = a_i \cdot m \cdot (\pi/2 - 2 \cdot \text{tg} \alpha)$. Суммарная мгновенная площадь срезаемого слоя

$$F_i = \sum_0^{L_i} (2 \cdot F_{np} + F_{вп})$$

В общем виде мгновенная сила резания P_{zi} при формообразовании рабочих профилей зубьев реек рассчитывается по формуле

$$P_{zi} = C_1 \cdot F_i \cdot a_i^k,$$

где C_1 , k – коэффициенты, учитывающие свойства обрабатываемого материала.

Значения текущего угла контакта Ψ_i , режимов резания, длины пути контакта L_i , физико-механических свойств обрабатываемого материала позволяют произвести расчет при фиксированном положении режущего лезвия параметров обрабатываемых поверхностей и состояния качества режущего инструмента, что также предопределяет состояние поверхностного слоя зубчатых реек.

Характер изменения мгновенных параметров формообразования для определенных условий обработки определяет параметры стабилизации и возможность управлением качеством и точностью поверхностного слоя зубчатых реек.

Выводы. Приведены аналитические зависимости для определения мгновенной площади сечения срезаемого слоя и установлены параметры стабилизации процесса формообразования. Теоретически доказано, что характер изменения мгновенных параметров формообразования для определенных условий обработки определяет параметры стабилизации и возможность управлением качеством и точностью поверхностного слоя зубчатых реек.

Список літератури

1. А. с. 1729705 СССР, МКИ В23 F 5/20. Способ фрезерования зубчатых изделий спаренными фрезами / А. А. Клочко, В. Н. Бородаевский, О. А. Богатырев, В. И. Баран (СССР). – № 4736585/08; заявл. 11.09.89; опубл. 30.04.92, Бюл. № 16. – 4 с. :

- ил.
2. Клочко, А. А. Физическая картина эффективности прогрессивных схем зубофрезерования / А. А. Клочко // Передовой производственный опыт и научнотехнические достижения : информ. сборник. – М. : ВНИИТЭМР, 1990. – Вып. 8. – С. 12–13.
3. Перспективные работы по созданию методов и средств контроля высокоточных зубчатых реек в условиях тяжелого машиностроения и станкостроения / А. А. Клочко, В. И. Печеный, В. А. Вышлов, В. И. Завгородний // Передовой производственный опыт и научно-технические достижения: информ. сб. – М. : ВНИИТЭМР, 1989. – Вып. 6. – С. 1–2.
4. Новые технологические направления чистовой обработки зубчатых реек / А. А. Клочко, Н. И. Зиновьев, Ю. А. Клочко, Е. В. Мироненко // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. ХДПУ. – Харків, 2000. – Вип. 1(3). – С. 138–145.
5. Научное обоснование технологических методов обеспечения эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. И. Волошин, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 30. – С. 194–204.
6. Методика расчета параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес в зависимости от условий их обработки / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, Д. В. Ефремов, А. А. Клиновский // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 157–173.
7. Исследование влияния параметров волнистости на эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Шелковой, А. А. Ярошенко, С. Ю. Палашек // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2014. – Вып. 34. – С. 19–25.

Bibliography (transliterated)

1. A. with. 1729705 USSR, MKI V23 F 5 / 20. Method of milling gear products with twin milling cutters / AA Klochko, VN Borodaevsky, OA Bogatyrev, VI Baran (USSR). - No. 4736585/08; Claimed. 11.09.89; Publ. 30.04.92, Bul. № 16. - 4 with. : Ill.
2. Klochko, AA A physical picture of the effectiveness of progressive schemes of gear milling / AA Klochko // Advanced industrial experience and scientific and technical achievements: inform. Compilation. - M.: VNIITEMR, 1990. - Issue. 8. - P. 12-13.
3. Perspective work on the development of methods and means for controlling high-precision gear racks in the conditions of heavy engineering and machine-tool construction / A. A. Klochko, V. I. Pechenyi, V. A. Vyshlov, V. I. Zavgorodni // Advanced industrial experience and scientific -technical achievements: inform. Sat. - M.: VNIITEMR, 1989. - Issue. 6. - C. 1-2.
4. New technological directions of finishing processing of cogged rails / AA Klochko, NI Zinoviev, Yu. A. Klochko, EV Mironenko // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: zb. Sciences. Pr. KhPPU. - Kharkiv, 2000. - Vip. 1 (3). -FROM. 138-145.
5. Scientific substantiation of technological methods for ensuring the operational properties of hardened coarse-grained cogwheels / Yu. V. Timofeev, AI Voloshin, EV Mironenko, AA Klochko, AN Kravtsov // Instrument reliability and optimization of technological Systems: Sat. Sci. Tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 30. - P. 194-204.
6. Methods for calculating the parameters of the state of the surface layer of quenched coarse-grained gears, depending on the processing conditions / AN Shelkova, EV Mironenko, AA Klochko, DV Efremov, AA Klinovskii // Tool reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 31. - P. 157-173.
7. Investigation of the influence of ripple parameters on the operational properties of cylindrical coarse-grained cogwheels / E.V. Mironenko, A.A. Klochko, A.N. Shelkova, A.A. Yaroshenko, S.Yu. Palashek // Instrument reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr. - Krama-Torsk: DGMA, 2014. - Issue. 34. - P. 19-25.

Поступила (received) 12.04.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Синтез технологічних параметрів високопродуктивної обробки зубчастих рейок спареними фрезами / О.А. Пермяков, О.О. Клочко, Ю.О. Синица // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 71–77. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Синтез технологических параметров высокопроизводительной обработки зубчатых реек спаренными фрезами / А.А. Пермяков, А.А. Клочко, Ю.А. Синица // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 71–77. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Synthesis of technological parameters of high-performance processing of toothed racks by twin milling cutters / A. Permyakov, A. Klochko, Yu. Sinitsa // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.71–77. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пермяков Олександр Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: perm_a@i.ua;

Пермяков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: perm_a@i.ua;

Permyakov Oleksandr Anatoliyovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Department of engineering technology and machine tools; tel.: (057)-720-66-25, e-mail: perm_a@i.ua;

Клочко Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: klochko21@rambler.ru;

Клочко Александр Александрович – доктор технических наук, профессор, кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: klochko21@rambler.ru;

Klochko Alexander Alexandrovich - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and machine tools of the National Technical University "Kharkiv politechnichemkty Institute " Kharkiv; tel.: (067) 936-36-64; e mail: klochko21@rambler.ru;

Синица Юрій Олександрович – магістр кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (063) 656-75-16;

Синица Юрий Александрович – магістр кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; (063) 656-75-16;

Sinitsa Yuriy Oleksandrovich - magistre of the chair of the technology of machine-building and meteorological station of the National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute y" Kharkiv; Tel.: (063) 656-75-16.

УДК 621.9

Г. И. КОСТЮК, О.Д. ГРИГОР, А.В. МАТВЕЕВ

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА ЗАДАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР ИОНАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ И ПОЛУЧЕННЫХ КВАНТОВО МЕХАНИЧЕСКИХ МЕТОДОМ

В работе проведено сравнение влияния задания теплофизических и термомеханических характеристик магниевых сплавов при ионно-лучевой обработке с целью получения наноструктур с использованием стохастических и расчетных значений по квантово-механической теории. Показано, что для однозарядных ионов практически всегда при малых энергиях можно использовать стохастические значения, тогда как с ростом заряда иона зона технологических параметров, при которых оба способа задания теплофизических и термомеханических характеристик дают одинаковые результаты смещаются в сторону высоких энергий.

Ключові слова квантово-механический метод, наноструктуры, стохастический метод, теплофизические и термомеханические характеристики материала, ионы.

В роботі проведено порівняння впливу завдання теплофізичних і термомеханічних характеристик магнієвих сплавів при іонно-променевої обробці з метою отримання наноструктур з використанням стохастичних і розрахункових значень по квантово механічній теорії. Показано, що для однозарядних іонів практично завжди при малих енергіях можна використовувати стохастичні значення, тоді як з ростом заряду іона зона технологічних параметрів при яких обидва способи завдання теплофізичних і термомеханічних характеристик дають однакові результати зміщуються в бік високих енергій.

Ключевые слова: квантово-механический метод, наноструктуры, стохастичный метод, теплофизичні і термомеханічні характеристики матеріалу, іони.

In the comparison of the effect of thermal and thermo-setting performance magnesium alloys in ion beam processing For the purpose of obtaining nanostructures using stochastic and calculated values for the quantum mechanical theory. It is shown that for singly charged ions are almost always at low energies can be used stochastic values, whereas with increasing ion charge of technological parameters of the zone in which the two methods for defining thermal and thermomechanical characteristics give the same results are shifted toward higher energies.

Keywords: quantum mechanical method, nanostructures, stochastic method, thermal and thermomechanical properties of the material, the ions.

Введение. В настоящее время, к сожалению, в авиационной технике еще не достаточно широко применяется магниевые сплавы, так как они при малой массе не имеют достаточно высоких прочностных характеристик. Это связано с тем, что практически всегда разрушение начинаются с поверхности детали и желательно иметь поверхность с повышенными физико-механическими характеристиками, для этого обычно применялись различного рода покрытия, но это приводило к снижению усталостных характеристик материала. Создание слоя из наноструктур (НС) в магниевом сплаве может существенно повысить твердость поверхности, а, следовательно, и износостойкость детали, повысить усталостные характеристики за счет затруднения развития усталостной трещины в НС. Затруднение разрушения НС за счет повышения предела текучести, а также способности выдерживать ударные нагрузки в результате снижения модуля упругости.

Работа выполнена в рамках программы Министрства 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 дета-

лей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и свето-лучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса. К сожалению, в настоящее время нет как теоретических, так и экспериментальных работ по получению наноструктур (НС) на магниевых сплавах, хотя теоретическому исследованию получения наноструктур посвящены ряд наших монографий [1...5], а экспериментальные работы рассматривались в монографиях [6...11]. На основе этих работ можно сформулировать критерии образования наноструктур: достижение необходимого диапазона температур (500- 1500 К), превышения скорости роста температуры – 10^7 К/с и наличие температурных напряжений в диапазоне 10^7 - 10^9 Па. При реализации температурных напряжений превышающих 10^{10} Па есть вероятность непосредственного получения НС.

Ограничив область пространства в детали, где реализуются эти критерии можно найти объем зоны, где возможно получения НС при действии индивидуального иона, а далее по объему получаем размер зерна. Размер зерна обычно необходим, так как практически всегда исследуется влияние размера зерна на физико-механические характеристики материалов и детали. Поэтому в работе проводим исследование влияния энергии ионов на размер зерна при квантово-механическом и стохастическом определении теплофизических и термомеханических характеристик обрабатываемого материала.

Цель исследования. Целью исследования было определения технологических параметров, при кото-

© Г. И. Костюк, О.Д. Григор, А.В. Матвеев, 2017

рых необходимо учитывать изменение теплофизических и термомеханических характеристик материала при квантово механическом подходе по сравнению со стохастическими их значениями.

Расчетная модель и метод ее решения. Проведено сравнение результатов расчета размеров зерна в зоне действия ионов с разными зарядами ($z=1, z=2, z=3$) на магниевый сплав.

Показано, что определяющим является суммарное энергетическое воздействие, которое определяется величиной энергии иона и его заряда. Так при малом энергетическом воздействии – малая энергия и 200 эВ малое зарядовое число $z=1$. Результаты расчета размера зерна по обоим методам совпадают и в этом случае можно пользоваться стохастическими данными теплофизическим и термомеханическим характеристиками. С ростом энергии увеличивается расхождение результатов. Для больших зарядовых чисел $z=2$ результаты расчета размера зерна по обоим методам коррелируют только при энергии 2000 эВ. При дальнейшем увеличении зарядового числа результаты оценки размера зерна совпадают только при

энергии 20 КэВ. Причем везде кривые по полученные с применением квантово механического подхода являются более пологими, то есть в этом случае влияние на размер зерна осуществляется максимальным образом при малом энергетическом воздействии ($E_i \cdot z$)

Результаты расчета и их обсуждение. Были рассчитаны размеры зерна для случая действия ионов с зарядовыми числами ($z=1, z=2, z=3$). При двух методах задания теплофизических и термомеханических характеристик: стохастическим (---) и квантово механическим методом (---). Так для случая действия иона бора на магниевый сплав получены зависимости размера зерна от энергии иона видно, что при энергии 200 эВ ($z=1$) результаты по обоим методам совпадают.

С ростом энергии стохастическим метод дает большие размеры зерна. Увеличение зарядового числа до 2 приводит к тому, что результаты расчета по двум методам совпадают уже при энергии 2000 эВ, а квантово механический подход дает более пологую кривую размера зерна от энергии (рис. 1а).

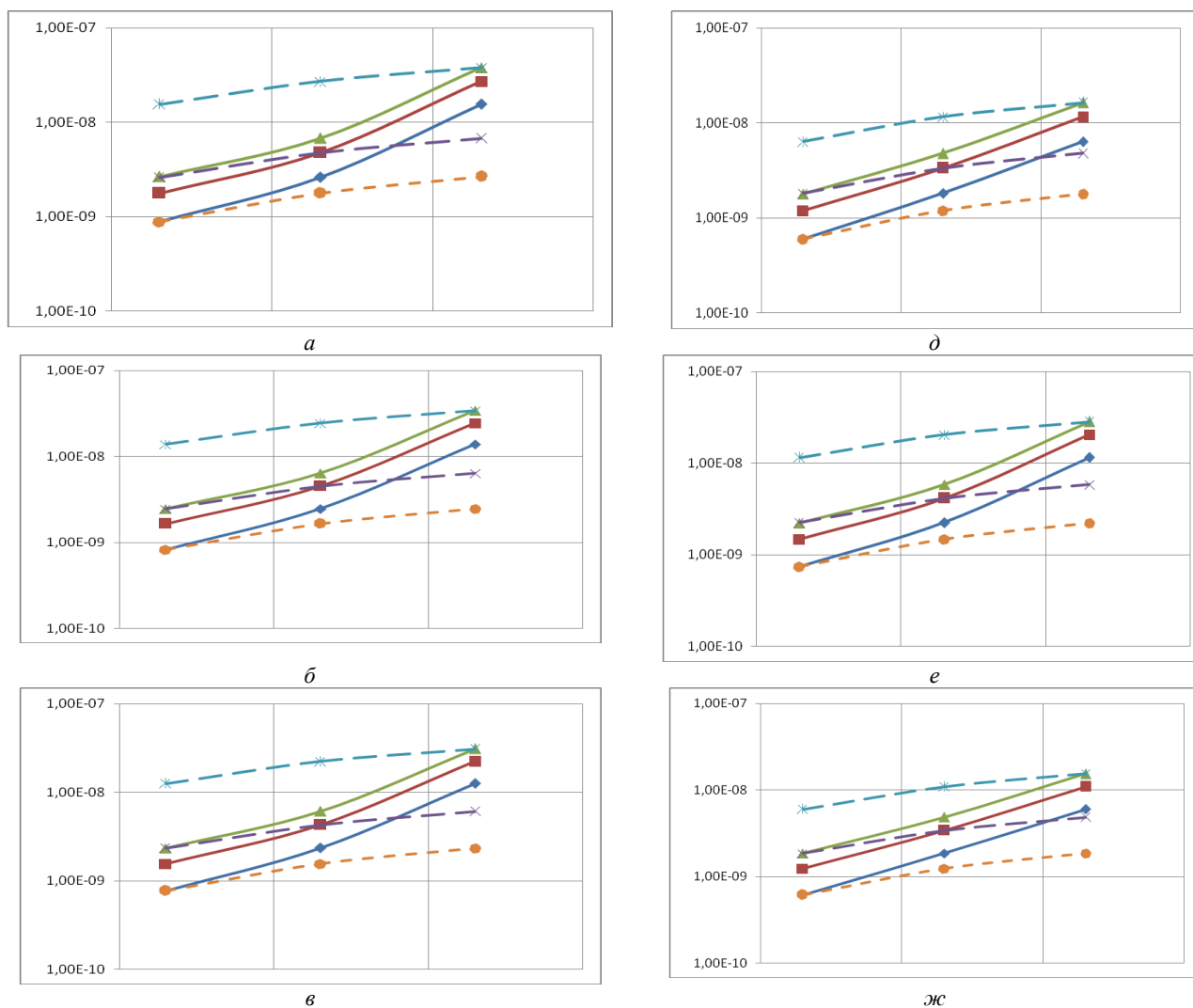


Рис.1 – Зависимости размера зерна в магниевом сплаве от энергии ионов в случае стохастического определения теплофизических и термомеханических характеристик материалов (---) и с применением квантово механическим подходом (---), при действии ионов: В⁺ – а, С⁺ – б, N⁺ – в, Al⁺ – г, Cr⁺ – д, O⁺ – е, Y⁺ – ж, Zr⁺ – з, Hf⁺ – и, W⁺ – к, V⁺ – л, Mo⁺ – м

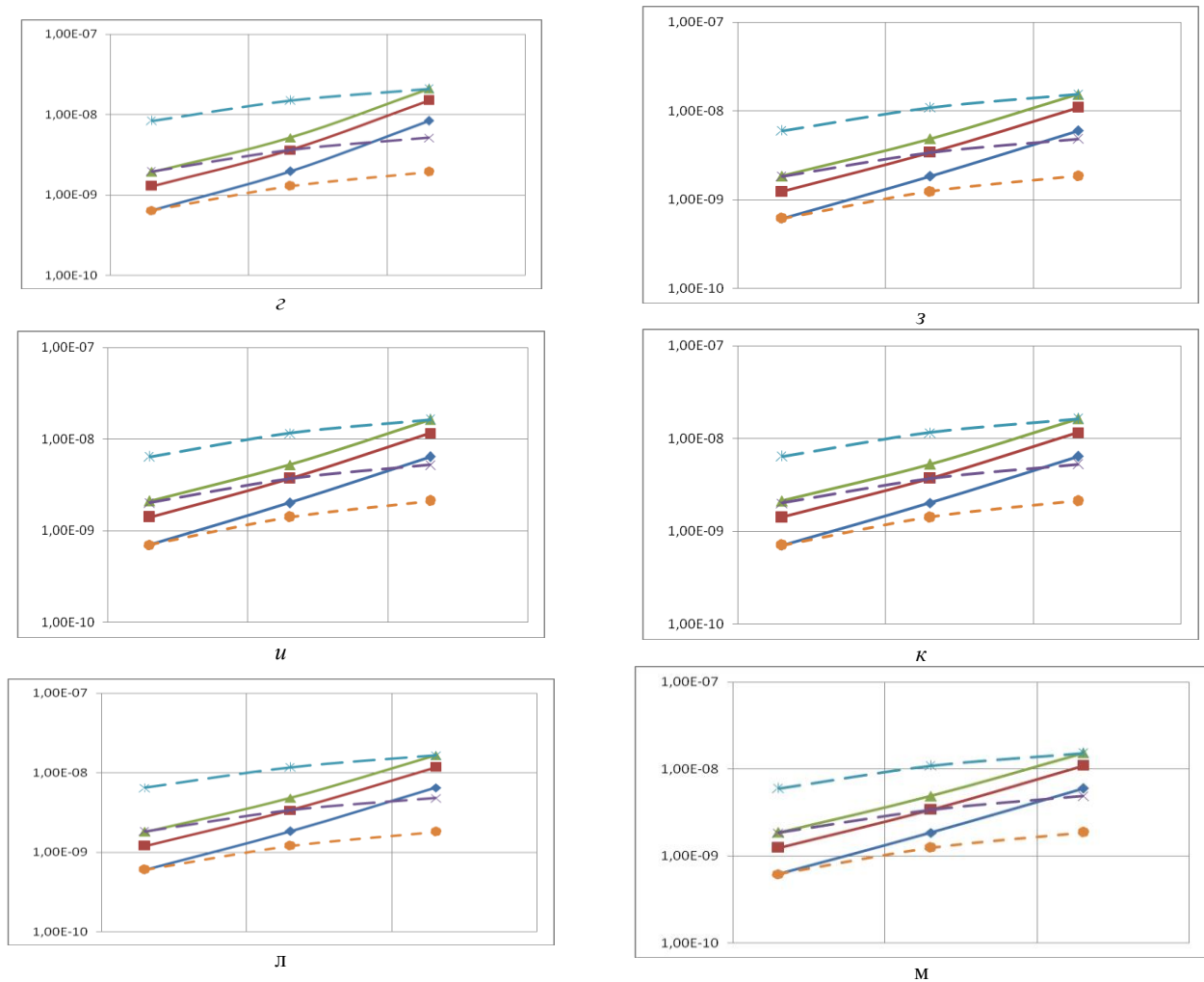


Рис. 1 – Продолжение

Дальнейшее увеличение зарядового числа до 3 приводит к совпадению результатов расчета по двум методам только при энергии 20 КэВ тогда как значение размера зерна полученного стохастическим методом, при меньших энергиях имеет значительно меньшее значение. Можно заметить, что как при стохастическом, так и при квантово механических методах кривые при разных зарядовых числах получаются эквидистантными. Для стохастического метода наблюдается быстрый рост размера зерна с увеличением энергии, а для квантово-механического относительно медленный рост размера зерна с увеличением энергии.

Переход к ионам углерода и азота, характер кривых и точки совпадения результатов остаются такими же. Только значение размера зерна начинает уменьшаться. Переход к ионам кислорода и алюминия приводит к еще большему уменьшению размера зерна, хотя точки корреляции значений по разным методам сохраняются для $z=1 - 200$ эВ, для $z=2 - 2000$ эВ, $z=3 - 20$ КэВ. Все это подтверждает наш тезис, что энергетическое воздействие является определяющим в выборе метода определения теплофизических и термомеханических характеристик.

Переход к ионам хрома и иттерия (рис 1 е, ж) приводит к дальнейшему снижению размера зерна. Которая даже при энергии 20 КэВ имеет величину порядка 10 нм. В этом случае точки совпадения ре-

зультатов расчета размера зерна совпадают с предыдущими: $z=1 - 200$ эВ, для $z=2 - 2000$ эВ, $z=3 - 20$ КэВ..

Видно, что проведенные расчеты приводят к практически одинаковым результатам по нахождению точек корреляции результатов рассчитанных по двум методам. Это значит, что можно использовать полученные закономерности для оценки размера зерна, при действии различных ионов используя соответствующий метод для соответствующей энергии и соответствующего зарядового числа. Это существенно может сократить объем проводимых расчетов.

Переход к более тяжелым ионам циркония и гафния позволяет оценить влияние и стохастического и квантово механического метода определения теплофизических и термомеханических характеристик для тяжелых ионов. Видно, что и для тяжелых ионов исследованные зависимости близки к ранее полученным но для случаев действия двух зарядных ионов есть уже две точки в которых результаты близки при энергии 200 и совпадают при 2000 эВ. То есть в этом случае уже в диапазоне 200 – 2000 эВ можно пользоваться стохастическим методом при оценке размера зерна в магниевом сплаве. В случае же энергии 20 КэВ они существенно разнятся.

Для более тяжелых ионов цирконий и гафний (рис. 1 з, и) результаты реализуются практически такие же как и в первом случае полное совпадение

реализуется при $z=1 - 200$ эВ, для $z=2 - 2000$ эВ, $z=3 - 20$ КэВ, хотя различие результатов по одному и второму методу сближаются по величинам размера зерна, что говорит о том, что для больших размеров зерна можно пользоваться стохастическим методом определения теплофизических и термомеханических характеристик и погрешность не будет превышать 10 – 25 % большие значения соответствуют большим энергиям.

Дальнейший рост массы ионов для молибдена и вольфрама (рис 1 к, л) показывает, что корреляция результатов проявляется при заряде ионов $z=1 - 200$ эВ, для $z=2 - 2000$ эВ, $z=3 - 20$ КэВ, а значения отличаются практически на те же величины. Это говорит о том, что можно пользоваться для последних четырех, результатами одного из них от этого точность не будет снижаться более чем на 2–5 %.

Выводы. На основе исследования влияния технологических параметров потоков ионов и заряда на размер зерна в магниевом сплаве показано, что учет теплофизических и термомеханических характеристик полученных как стохастическим, так и квантово механическим методом необходим далеко не всегда: при зарядах $z=1$ и энергии 200 эВ; для $z=2 - 2000$ эВ, $z=3 - 20$ КэВ, можно пользоваться стохастическими характеристиками практически для всех исследованных ионов и погрешность будет не более 2–3 %.

В случае отлечения заряда и энергии от перечисленных ранее для легких ионов (до кислорода) необходимо обязательно учитывать влияние квантово механического метода на определение теплофизических и термомеханических магниевых сплава.

При переходе к тяжелым ионам (цирконий, гафний, молибден и вольфрам) можно практически во всем исследованном диапазоне зарядов и энергий можно пользоваться стохастическими данными по теплофизическим и термомеханическим характеристикам и в этом случае погрешность расчетов размера зерна не будет превышать 25 %

Определение размера зерна позволяет, зная зависимость физико – механических характеристик материала от размера зерна прогнозировать эти характеристики для исследуемых материалов.

Список литературы

1. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями: Моногр.-справ.: в 2 кн. / Г. И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. Костюк Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. Костюк Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.

4. Костюк Г. И. Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. Костюк Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
7. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АІНУ, 2003. – 412 с.
8. Гречихин Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
10. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
11. Андриевский Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.

Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloym: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur: monogr* [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.
3. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G. I. *Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2009. 406 p.
5. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy: ucheb.posobiye* [The scientific basis for the creation of modern technologies] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2008. 552 p.
6. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloym: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2007. 633 p.
7. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloym: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, АІНУ, 2003. 412 p.
8. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologiy* [The physics of nanoparticles and nanotechnology] – Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
9. Aksenov, I. I. *Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy* [Vacuum arc erosion plasma sources] – Kharkiv, NII «KHFTI», 2005. 211 p.
10. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology] – Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.
11. Andriyevskiy, R. A. *Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy* [Nanomaterials: concept and modern problems] *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2003. – Т. 91, № 1. – p.p. 50 – 56.

Поступила (received) 17.04.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив характеру завдання теплофізичних і термомеханічних характеристик магнієвих сплавів при обробці з метою отримання наноструктур іонами з використанням стохастичних значень і отриманих квантово механічних методом / Г. І. Костюк, О.Д. Григор, А.В. Матвєєв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 78–82. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Влияние характера задания теплофизических и термомеханических характеристик магниевых сплавов при обработке с целью получения наноструктур ионами с использованием стохастических значений и полученных квантово механических методом / Г. И. Костюк, О.Д. Григор, А.В. Матвеев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 78–82. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Influence of the nature of the task of thermophysical and thermomechanical characteristics of magnesium alloys in processing for the purpose of obtaining nanostructures by ions using stochastic values and obtained by quantum mechanical methods / G. Kostyuk, O. Grigor, A. Matveyev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.78–82. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Костюк Геннадий Игоревич – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovsky, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Григор Ольга Діонісова – студентка кафедри теоретичної механіки, машинознавства і роботомеханічних систем, Національного аерокосмічного університету ім. Жуковського М.Є. «ХАІ», тел. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

Григор Ольга Дионисова – студентка кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национального аэрокосмического университета им. Жуковского Н.Е. «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

Grigor Olga Dionisova - student of the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robot Mechanics, National Aerospace University. Zhukovsky N.E. "KhAI", tel. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

Матвеев Олександр Вадимович – аспірант кафедри теоретичної механіки, машинознавства і роботомеханічних систем, Національного аерокосмічного університету ім. Жуковського М.Є. «ХАІ», тел. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

Матвеев Александр Вадимович – аспирант кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национального аэрокосмического университета им. Жуковского Н.Е. «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

Matveyev Alexander Vadimovich - postgraduate student of the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robot Mechanics, National Aerospace University. Zhukovsky N.E. "KhAI", tel. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

УДК 621.9.08 (083)

О.Ф. ЄНІКЄЄВ, Ф.М. ЄВСЮКОВА, О.Ю. ПРИХОДЬКО

АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ

Для побудови структурних схем вимірювальних перетворювачів потужності запропоновано методи цифро-аналогового та частотно-імпульсного перемноження сигналів струму і напруги, які споживає привод головного руху металорізального верстату. На основі методів теорій інформації, зокрема, інформаційного підходу розроблено методику статистичної обробки дослідних даних з метою визначення похибки запропонованих вимірювальних перетворювачів потужності. Встановлено, що метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів потужності задовольняють вимогам по точності.

Ключові слова: вимірювальний перетворювач, потужність, інформаційний підхід, похибка.

Для построения структурных схем измерительных преобразователей мощности предложены методы цифро-аналогового и частотно-импульсного перемножения сигналов тока и напряжения, которые потребляет привод главного движения металлорежущего станка. На основе методов теории информации, в частности, информационного подхода разработана методика статистической обработки экспериментальных данных с целью установления погрешностей предложенных измерительных преобразователей мощности. Установлено, что метрологические характеристики измерительных преобразователей мощности удовлетворяют требованиям по точности.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, мощность, информационный подход, ошибка.

To construct the structural diagrams of the power measuring converters, methods of digital-analog and frequency-pulse multiplication of current and voltage signals, which are consumed by the drive of the main movement of the metal-cutting machine, are proposed. Based on the methods of information theory, in particular, the information approach, a method for statistical processing of experimental data has been developed with the aim of establishing the errors of the proposed power transducers. It is established that the metrological characteristics of the power measuring converters satisfy the accuracy requirements.

Keywords: measuring transducer, power, information approach, error.

Вступ. Питанням розробки методів та апаратних засобів для контролю потужності металорізальних верстатів надається достатня увага в технічній літературі. Актуальність й важливість цієї задачі обумовлено тим, що вона не вирішена у повному обсязі. Складності її розв'язання обумовлено широким діапазоном зміни інформаційного сигналу (у межах 20...400 Вт) та достатньо жорсткими вимогами до метрологічних характеристик вимірювального перетворювача потужності (0.1...0.3%).

Постановка проблеми. У більшості випадків задача вирішується методом перемноження сигналів струму та напруги генератора. Відомі методи та апаратні засоби перемноження вхідних сигналів не забезпечують належну точність. Так, наприклад, мікросхема 525ПС2 виконує процедуру перемноження сигналів струму та напруги з похибкою 1...2% [1]. Така похибка оцінювання сигналу потужності приводу головного руху верстату неприпустима. Десяти розрядна мікросхема 564ІП5 задачу перемноження кодів струму та напруги вирішує з похибкою 0.1...0.2%. Мікросхеми 588ВР1, 1802ВР4 або 1802ВР5 надають можливість побудувати цифровий пристрій для перемноження кодів струму та напруги з достатньо нескладною схемою управління. Однак, цей метод побудови вимірювального перетворювача потужності (ВПП) вимагає суттєвих апаратних витрат.

Мета статті. Розробка методів та побудова апаратних засобів для вимірювання потужності приводу головного руху верстату, які задовольняють вимогам за величиною похибки перетворення. Досягнення поставленої мети забезпечується розв'язуванням таких задач:

- розробка методу цифро-аналогового перемноження сигналів струму та напруги;
- побудова частотно-імпульсного пристрою для перемноження кодів;

- порівняльний аналіз ВПП.

Цифро-аналоговий ВПП. При отриманні сигналу струму приводу головного руху верстату використовуються вимірювальні шунти на 5 А, падіння напруги на яких за умов протікання номінального струму складає 75 мВ. Потужність приводу головного руху верстату у межах швидкісного режиму роботи двигуна постійна. Межі зміни сигналів струму та напруги приводу головного руху верстату в залежності від режиму різання заготівлі складають: 0,20...3,60 А та 100 В.

ВПП можливо побудувати з використанням цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) [2]. Його вихідна напруга визначається за допомогою наступного виразу

$$U_{вих} = \frac{NU_{on1}}{2^{n_1}}, \quad (1)$$

де N – вихідний код; n_1 – розрядність; U_{on1} – опорна напруга.

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) сигнал напруги приводу головного руху верстату перетворює у цифровий код у відповідності з таким виразом

$$N = \frac{U_x 2^{n_2}}{U_{on2}}, \quad (2)$$

де U_x – вхідна напруга; n_2 – розрядність; U_{on2} – опорна напруга.

Вираз (2) підставимо в рівняння (1) та із урахуванням $n_1 = n_2$ маємо

$$U_{вих} = \frac{U_x U_{on1}}{U_{on2}}. \quad (3)$$

Прийнявши $U_{on2} = const$, та на основі наведених перетворень принципово можливо побудувати пристрій для перемноження сигналів струму та напруги приводу головного руху металорізального верстату. Структурну схему цифро-аналогового ВПП подано на рис. 1.

© А. Ф. Єнікєєв, Ф. М. Євсюкова, О. Ю. Приходько, 2017

няння згладженої кривої розкиду вихідного коду цифрового ВПП має вигляд

$$f_2(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \text{ при } x \in (-0.60, 0.60). \quad (10)$$

Для отриманого закону розподілу похибки маємо

$$\ln f_2(x) = -\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma}. \quad (11)$$

Звідси ентропія похибки запропонованого ВПП

$$H\left(\frac{x}{x_n}\right) = \ln\left(2\sigma e^{\frac{\mu}{\sigma}}\right). \quad (12)$$

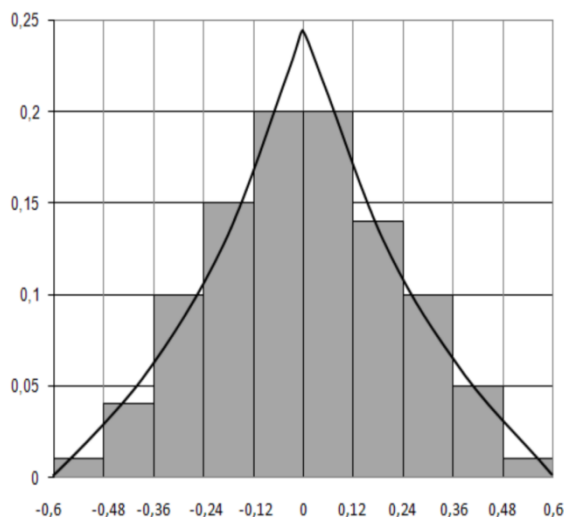


Рис. 4 – Гістограма розкиду вихідного коду ВПП

Ентропійний інтервал невизначеності вихідного коду цифрового ВПП

$$\Delta_2 = \sigma e^{\frac{\mu}{\sigma}} = 0.25. \quad (13)$$

Виконаємо порівняння запропонованих ВПП з метою вибору найбільш ефективного. Складові похибок ВПП знаходять свій кількісний вираз у змінах їхніх вихідних сигналів. Інформаційна технологія визначення похибок ВПП складає такі обчислювальні процедури [5]:

- розрахунок математичного очікування сигналу потужності P_{cp} ;
- визначення середньоквадратичного відхилення за допомогою наступного виразу

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}, \quad (14)$$

де $\Delta_i = P_{cp} - P_i$ – абсолютна похибка i -того виміру;

- задавшись величиною довірчої ймовірності визначаємо довірчий інтервал навколо номінальної похибки перетворення таким чином

$$\Delta = t_c \sigma; \quad (15)$$

- розраховуємо відносну похибку оцінювання потужності приводу головного руху верстату

$$\delta = \frac{\Delta}{P_{cp}} 100\%. \quad (16)$$

Результати розрахунку похибки запропонованих ВПП наведені у табл. 1. У ній вказано: δ_1 – похибка цифро-аналогового; δ_2 – похибка цифрового ВПП.

Таблиця 1
Результати розрахунку похибок ВПП

№ n/n	P, Вт	δ_1 (%)	δ_2 (%)
1	18.53	0.67	0.53
2	31.11	0.44	0.36
3	52.40	0.27	0.22
4	96.10	0.19	0.15
5	103.20	0.16	0.14
6	153.91	0.14	0.11
7	195.21	0.12	0.09
8	261.29	0.10	0.08
9	341.18	0.09	0.06

Висновок. Побудовано апаратні засоби для вимірювання потужності приводу головного руху верстату на базі цифро-аналогового та цифрового методів перемноження сигналів струму та напруги. У результаті статистичної обробки дослідних даних на основі інформаційного підходу визначено ентропійні похибки пристроїв. Похибка вимірювань потужності приводу головного руху верстату зменшується при зростанні вимірювальних сигналів струму та напруги. Встановлено, що вимірювальні перетворювачі мають потрібну точність у межах зміни режимів роботи приводу головного руху металорізального верстату.

Список літератури

1. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В.С. Гутников –Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304с.
2. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной технике / Е.А. Зельдин. –Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 280с.
3. Алексенко А.Г. Применение прецизионных аналоговых микросхем / А.Г. Алексенко, Е.А. Коломбег, Г.Н. Стародуб. –М.: Радио и связь, 1985. – 255с.
4. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. –Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
5. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования / А.Ф. Еникеев. –Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с.

Bibliography (transliterated)

1. Gutnikov V.S. *Integral Electronics in Measuring Devices* V.S. Gutnikov. Leningrad. Energoatomizdat, 1988. 304p.
2. Zeldin E.A. *Digital integrated circuits in information-measuring technology*. E.A. Zeldin. Leningrad. Energoatomizdat, 1986. 280p.
3. Alexenko A.G. *Application of precision analog circuits* / A.G. Alexenko, E.A. Kolombeg, G.N. Starodub. Moscow. Radio and communication, 1985. 255p.
4. Novitsky P.V. *Estimation of errors in measurement results*. P.V. Novitsky, I.A. Zograf. Leningrad. Energoatomizdat, 1991. 304p.
5. Yenikieiev A.F. *Optimalnoe upravlenie tehnologicheskim processom almaznogo shlifovaniya*. A.F. Yenikieiev. [Optimal management by the technological process of the diamond polishing.] . Kramatorsk: DGMA, 2001. 160 p.

Поступила (received) 21.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз метрологічних характеристик вимірювальних перетворювачів потужності / О.Ф. Єнікєєв, Ф.М. Євсюкова, О.Ю. Приходько // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 83–86. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Анализ метрологических характеристик измерительных преобразователей мощности / А.Ф. Еникеев, Ф.М. Евсюкова, О.Ю. Приходько // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 83–86. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Analysis of metrological characteristics of power transducers / A. Yenikieiev, F. Yevyukova, O. Prihodko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.83–86. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єнікєєв Олександр Фанилович – док. техн. наук, доцент, ДДМА, тел.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, (063)-205-93-97, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net;

Еникеев Александр Фанилович – док. техн. наук, доцент, ДГМА, тел.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, (063)-205-93-97, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net;

Yenikieiev Aleksandr – doctor of technical sciences, reader, Donbas State Engineering Academy, tel.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, (063)-205-93-97, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net;

Євсюкова Фатима Магометбіївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru; Харків;

Евсюкова Фатима Магометбиевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru; Харьков;

Yevsyukova Fatyma Magometbiivna – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Senior Lecturer at the Department of engineering technology and machine tools; tel.: (057)-720-66-25, +380979412299, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru; Kharkov;

Приходько Ольга Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru;

Приходько Ольга Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru;

Prihodko Olga Yurievna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of engineering technology and machine tools; tel.: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru.

УДК 621.923

Ф.В. НОВИКОВ, В.И. ПОЛЯНСКИЙ

УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

Отримано спрощені аналітичні залежності для визначення температури різання при шліфуванні та лезовій обробці з урахуванням балансу тепла, яке йде в оброблювану деталь і стружки, що утворюються. Розрахунками встановлено, що при багатопрохідному шліфуванні в оброблювану деталь йде майже все тепло, що утворюється при шліфуванні. Доведено, що при шліфуванні та лезовій обробці температура різання описується фактично однаковими залежностями, а зменшити температуру різання можна головним чином за рахунок зменшення умовного напруження різання шляхом підвищення ріжучої здатності круга та зниження інтенсивності тертя в зоні різання, а також зменшенням глибини шліфування й збільшенням швидкості деталі.

Ключові слова: шліфування, лезова обробка, баланс тепла, температура різання, умовне напруження різання, ріжуча здатність круга, тертя в зоні різання, шліфувальний круг.

Получены упрощенные аналитические зависимости для определения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке с учетом баланса тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки. Расчетами установлено, что при многопроходном шлифовании в обрабатываемую деталь уходит почти все образующееся при шлифовании тепло. Доказано, что при шлифовании и лезвийной обработке температура резания описывается фактически одинаковыми зависимостями, а уменьшить температуру резания можно главным образом за счет уменьшения условного напряжения резания путем повышения режущей способности круга и снижения интенсивности трения в зоне резания, а также уменьшением глубины шлифования и увеличением скорости детали.

Ключевые слова: шлифование, лезвийная обработка, баланс тепла, температура резания, условное напряжение резания, режущая способность круга, трение в зоне резания, шлифовальный круг.

Simplified analytical dependencies are obtained to determine the cutting temperature during grinding and blade machining, taking into account the heat balance flowing into the workpiece and the formed chips. It has been found by calculations that in the case of multi-pass grinding, almost all the heat generated during grinding goes into the workpiece. It has been proved that during grinding and cutting, the cutting temperature is described by virtually identical dependencies, and the cutting temperature can be reduced mainly by reducing the nominal cutting voltage by increasing the cutting capacity of the wheel and reducing the cracking intensity in the cutting zone, as well as by decreasing the grinding depth and increasing Speed parts.

Keywords: grinding, blade processing, heat balance, cutting temperature, conventional cutting stress, cutting capacity of the circle, friction in the cutting zone, grinding wheel.

Постановка проблеми. Возникающие при механической обработке тепловые процессы существенно снижают показатели производительности и качества: приводят к появлению на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов, а также снижают стойкость инструмента. Поэтому при механической обработке необходимо управлять тепловыми процессами, не допуская превышения температурой резания предельных значений. В особой мере это относится к шлифованию материалов, характеризующемуся повышенной тепловой напряженностью вследствие интенсивного трения связки круга с обрабатываемым материалом, что приводит к ухудшению качества обрабатываемых поверхностей деталей машин. В связи с этим в работе рассмотрены вопросы распределения температуры в поверхностном слое обрабатываемого материала при шлифовании и лезвийной обработке и на этой основе определены условия ее уменьшения.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблеме аналитического определения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке в научно-технической литературе уделено большое внимание [1 – 3]. Разработана математически формализованная теплофизическая теория механической обработки. Произведены расчеты нестационарных температурных полей на основе решения дифференциальных уравнений частных производных, что позволило обосновать основные условия уменьшения температуры резания. Однако эти расчеты достаточно сложны для выработки простых инженерных решений по снижению тепловой нагруженности процесса реза-

ния и выбору оптимальных условий обработки с учетом ограничения по температурному критерию. Поэтому в работах [4, 5] предложены упрощенные аналитические подходы к определению температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке, которые дополняют классические теплофизические решения и позволяют довольно просто подойти к оптимизации условий обработки. Настоящая работа является развитием этих работ и направлена на установление новых упрощенных зависимостей для определения температуры резания и обоснования условий ее уменьшения.

Цель работы – определение условий уменьшения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке на основе ее аналитического определения с учетом баланса тепла, возникающего в процессе резания и уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки.

Изложение основного материала. Предположим, что все образующееся при шлифовании тепло уходит в обрабатываемый материал (рис. 1). Необходимо определить глубину его проникновения в обрабатываемый материал, при которой температура достигает нулевого значения. Для решения этой задачи следует воспользоваться известной зависимостью для определения количества тепла Q_1 , выделяющегося в теле, имеющем форму адиабатического стержня (рис. 1), при его нагреве до некоторой температуры θ в процессе шлифования:

$$Q_1 = c \cdot m \cdot \theta, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град);

$m = \rho \cdot S \cdot l$ – масса нагретого адиабатического стержня, кг;

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³;

S – площадь поперечного сечения адиабатического стержня, м²;

l – длина нагретой части адиабатического стержня, м.

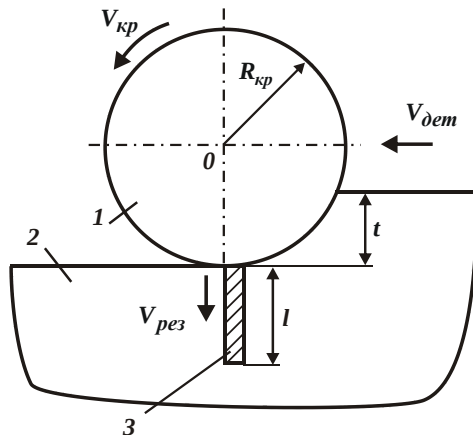


Рис. 1 – Расчетная схема параметров процесса шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – адиабатический стержень

С другой стороны, $Q_1 = N \cdot \tau = q \cdot S \cdot \tau$, где $N = q \cdot S$ – мощность резания, Вт; τ – время действия теплового источника на адиабатический стержень, с; q – плотность теплового потока, Вт/м². После преобразования зависимости (1) определена температура резания:

$$\theta = \frac{q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l}. \quad (2)$$

Вследствие теплопроводности материала адиабатического стержня, количество тепла Q_2 , прошедшего вдоль адиабатического стержня длиной l за время τ , равно:

$$Q_2 = \lambda \cdot S \cdot \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{l} \cdot \tau, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·град;

θ_2, θ_1 – значения температуры в начале и конце адиабатического стержня, град.

С учетом $Q_2 = Q_1 = q \cdot S \cdot \tau$ имеем:

$$(\theta_2 - \theta_1) = \frac{q \cdot l}{\lambda}. \quad (4)$$

Рассматривая температуру θ в виде $\theta = 0,5 \cdot (\theta_2 + \theta_1)$, зависимость (2) примет вид:

$$(\theta_2 + \theta_1) = \frac{2 \cdot q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l}. \quad (5)$$

Очевидно, максимальная температура будет достигаться на торце адиабатического стержня, где действует тепловой источник. Тогда, разрешая совместно зависимости (4) и (5) относительно температур θ_2 и θ_1 , имеем:

$$\theta_2 = \frac{q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l} + \frac{q \cdot l}{2 \cdot \lambda}, \quad (6)$$

$$\theta_1 = \frac{q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l} - \frac{q \cdot l}{2 \cdot \lambda}. \quad (7)$$

Как видно, справедливо неравенство $\theta_2 > \theta_1$, т.е. расчеты выполнены правильно.

Исходя из зависимости (6), длина нагретой части адиабатического стержня l неоднозначно влияет на температуру θ_2 , т.е. имеет место экстремум функции θ_2 от l . Для его определения следует подчинить зависимость (6) необходимому условию экстремума: $(\theta_2)'_l = 0$. В результате преобразований получено:

$$(\theta_2)'_l = -\frac{q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l^2} + \frac{q}{2 \cdot \lambda} = 0. \quad (8)$$

Соответственно, вторая производная равна:

$$(\theta_2)''_l = \frac{2 \cdot q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l^3} > 0. \quad (9)$$

Поскольку вторая производная $(\theta_2)''_l$ в точке экстремума больше нуля, то имеет место минимум температуры θ_2 .

Экстремальное значение длины нагретой части адиабатического стержня, исходя из уравнения (8), равно:

$$l_{\text{экстр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}} = \sqrt{2 \cdot a \cdot \tau}, \quad (10)$$

где $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м²/с.

Подставляя зависимость (10) в (6), определена минимально возможная температура θ_2 :

$$\theta_2 = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (11)$$

Для определения температуры θ_1 в точке экстремума (минимума) температуры θ_2 необходимо подставить зависимость (10) в (7). После преобразований получено: $\theta_1 = 0$, что соответствует физическому смыслу решаемой задачи.

В табл. 1 приведены расчетные значения первого и второго слагаемых зависимости (6), а также температуры θ_2 для исходных данных (шлифование закаленной стали ШХ15): $q = 1$ Вт/м²; $\tau = 0,01$ с; $a = \lambda / (c \cdot \rho) = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 42$ Вт/(м·град.). Как

видно, с увеличением параметра l первое слагаемое и температура θ_2 уменьшаются, а второе слагаемое увеличивается. При значении $l_{экстр}=410$ мкм, рассчитанном по зависимости (10), температура θ_2 принимает минимальное значение $\theta_2=10^{-5}$ град, которое рассчитано по зависимости (11). Этим показано, что действительно в точке экстремума имеет место минимум температуры θ_2 .

Таблица 1
Расчетные значения первого и второго слагаемых зависимости (6) и температуры θ_2

$l \cdot 10^{-6}$, м	1	10	100	1000
$\frac{q \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot l}$, град	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
$\frac{q \cdot l}{2 \cdot \lambda}$, град	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
θ_2 , град	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$

При обработке детали толщиной $l < l_{экстр}$, согласно табл. 1, температура θ_2 будет меньше экстремального (минимального) значения θ_2 , определяемого зависимостью (11). Для определения текущего значения температуры θ_2 следует использовать зависимость (6), а для определения температуры θ_1 – соответственно зависимость (7). Исходя из зависимости (7), температура θ_1 с уменьшением длины $l \rightarrow 0$ увеличивается от 0 до ∞ .

При этом разность температур $(\theta_2 - \theta_1)$, исходя из зависимости (4), уменьшается с уменьшением длины l , т.е. температура становится приблизительно одинаковой вдоль всей нагретой части длиной l адиабатического стержня. В этом случае в первом приближении температуру адиабатического стержня можно определить по среднему значению на основе зависимости (1) без учета зависимости (2), обусловленной теплопроводностью обрабатываемого материала. Наибольшее значение $(\theta_2 - \theta_1)$, исходя из зависимости (4), определяется из условия $l = l_{экстр}$:

$$(\theta_2 - \theta_1) = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (12)$$

Этим показано, что при шлифовании тонкостенных деталей, когда толщина поверхностного слоя обрабатываемого материала меньше экстремального значения длины $l_{экстр}$, температура резания будет существенно увеличиваться, а это может привести к возникновению различных температурных дефектов. Поэтому необходимо уменьшать $l_{экстр}$ путем уменьшения времени τ за счет увеличения скорости перемещения теплового источника (шлифовального круга) вдоль обрабатываемой детали.

Уменьшить $l_{экстр}$ и соответственно температуру $\theta_2 = q \cdot l_{экстр} / \lambda$ можно также увеличением коэффициента теплопроводности обрабатываемого ма-

териала λ , входящего в зависимость (10), т.е. за счет выбора оптимальной характеристики обрабатываемого материала.

Как показано выше, при условии $l < l_{экстр}$ температуру резания можно в первом приближении рассчитывать по зависимости (2), рассматривая $Q_1 = N \cdot \tau$, где $N = P_z \cdot V_{кр}$ – мощность резания, Вт; $P_z = \sigma \cdot Q / V_{кр}$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $Q = V_{рез} \cdot S$ – производительность обработки, м³/с; $V_{рез}$ – скорость перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом (рис. 1), м/с; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

После преобразований получено:

$$Q_1 = \sigma \cdot S \cdot t, \quad (13)$$

где $t = V_{рез} \cdot \tau$ – глубина шлифования, м.

Подставляя зависимость (13) в (1), имеем

$$\theta = \frac{Q_1}{c \cdot m} = \frac{\sigma \cdot t}{c \cdot \rho \cdot l}. \quad (14)$$

Согласно зависимости (14), уменьшение длины l приводит к увеличению температуры резания θ . Уменьшить θ можно уменьшением условного напряжения резания σ и глубина шлифования t . Очевидно, с целью увеличения производительности обработки $Q = B \cdot V_{дем} \cdot t$ (где B – ширина шлифования, м; $V_{дем}$ – скорость перемещения детали, м/с) необходимо увеличивать $V_{дем}$, т.е. обработку производить по схеме многопроходного шлифования. Однако, наибольший эффект в снижении температуры резания θ достигается за счет уменьшения условного напряжения резания σ путем повышения режущей способности круга и снижения интенсивности трения в зоне резания.

Полученное решение справедливо и при резании лезвийными инструментами. Например, при продольном точении

$$Q_1 = P_z \cdot V \cdot \tau = \sigma \cdot S_0 \cdot V \cdot \tau = \sigma \cdot t \cdot S_{прод} \cdot V \cdot \tau, \quad (15)$$

где $P_z = \sigma \cdot S_0$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

$S_0 = t \cdot S_{прод}$ – площадь поперечного сечения среза, м²;

t – глубина резания, м;

$S_{прод}$ – продольная подача, м/об.;

V – скорость резания, м/с.

Зависимость (15) можно представить в виде:

$Q_1 = \sigma \cdot Q \cdot \tau$, где $Q = t \cdot S_{прод} \cdot V = V_{рез} \cdot S$. Тогда

$$Q_1 = \sigma \cdot V_{рез} \cdot S \cdot \tau = \sigma \cdot S \cdot t, \quad (16)$$

где $t = V_{рез} \cdot \tau$ – глубина шлифования, м.

Подставляя зависимость (16) в (1), получено

$$\theta = \frac{Q_1}{c \cdot m} = \frac{\sigma \cdot t}{c \cdot \rho \cdot l}. \quad (17)$$

В итоге установлена зависимость для определения температуры резания θ , идентичная зависимости (14). Следовательно, температура резания θ при шлифовании и лезвийной обработке описывается одной и той же зависимостью. Уменьшить θ при лезвийной обработке, также как и при шлифовании, можно обеспечением высокой режущей способности инструмента и снижением интенсивности трения в зоне резания.

Для окончательного определения температуры θ_2 при шлифовании необходимо в зависимости (11) выразить плотность теплового потока q через параметры режима шлифования: $q = N / S = \sigma \cdot V_{рез}$ [4]. С учетом соотношения $V_{рез} = t / \tau = t \cdot V_{дем} / L$ (рис. 1) получено:

$$\theta_2 = \sigma \cdot \sqrt{\frac{Q_{y\partial}}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{кр}}}, \quad (18)$$

где $\tau = L / V_{дем}$;

$L = \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}$ – длина контакта круга с обрабатываемой деталью, м;

$R_{кр}$ – радиус круга, м;

$Q_{y\partial} = V_{дем} \cdot t$ – удельная производительность обработки, м²/с.

Как видно, уменьшить температуру θ_2 можно уменьшением параметров σ , $Q_{y\partial}$ и t . Поскольку удельную производительность обработки $Q_{y\partial}$ необходимо увеличивать, то основными условиями уменьшения температуры θ_2 следует рассматривать уменьшение параметров σ и t за счет обеспечения высокой режущей способности круга (соответственно уменьшения интенсивности трения в зоне резания) и применения многопроходного шлифования.

Зависимость (18) получена из условия, что все выделяющееся при шлифовании тепло уходит в обрабатываемую деталь. В действительности, выделяющееся тепло уходит как в обрабатываемую деталь, так и в образующуюся стружку и шлифовальный круг [1, 2]. Поэтому для определения температуры θ_2 с учетом тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и в образующуюся стружку, необходимо работу резания $A = N \cdot \tau$ принять равной количеству выделившегося при шлифовании тепла

$$\begin{aligned} Q_1 &= c \cdot \left(m_1 \cdot \theta_2 + m_2 \cdot \frac{\theta_2}{2} \right) = \\ &= c \cdot \rho \cdot B \cdot L \cdot \theta_2 \cdot \left(t + \frac{l_{эксп}}{2} \right), \end{aligned} \quad (19)$$

где $m_1 = \rho \cdot B \cdot L \cdot t$ – масса образующихся стружек, кг;

$m_2 = \rho \cdot B \cdot L \cdot l_{эксп}$ – масса объема обрабатываемого материала $B \cdot L \cdot l_{эксп}$, кг.

Исходя из зависимости (19), с учетом соотношения $A = \sigma \cdot B \cdot L \cdot t$ и условия $A = Q_1$, определена температура θ_2 :

$$\theta_2 = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{l_{эксп}}{2 \cdot t} \right)}. \quad (20)$$

Длина нагретой части адиабатического стержня $l_{эксп}$, определяемая зависимостью (10), с учетом соотношений $\tau = L / V_{дем}$ и $L = \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}$ принимает следующий вид:

$$l_{эксп} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}}{V_{дем}}. \quad (21)$$

Подставляя зависимость (21) в (20), имеем:

$$\theta_2 = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \frac{1}{Q_{y\partial}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{2 \cdot t}} \right)}. \quad (22)$$

Как видно, с увеличением глубины шлифования t и удельной производительности обработки $Q_{y\partial} = V_{дем} \cdot t$ температура θ_2 непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению $\sigma / c \cdot \rho$ (рис. 2). Этим показано, что учет одновременно тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь, изменяет характер формирования температуры θ_2 , поскольку зависимости (18) и (22) различны.

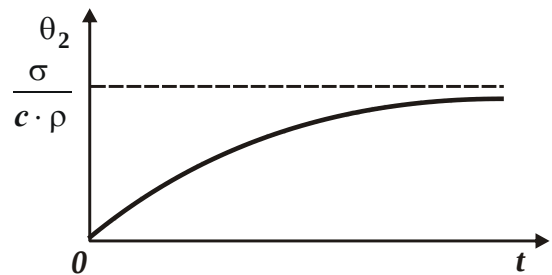


Рис. 2 – Зависимость температуры θ_2 от глубины шлифования t

Уменьшить температуру θ_2 при условии $Q_{y\partial} = const$ можно уменьшением глубины шлифования t при одновременном увеличении скорости детали $V_{дем}$, т.е. применением схемы многопроходного шлифования.

Исходя из зависимости (19), определена доля тепла, уходящего в образующиеся стружки:

$$\alpha_1 = \frac{c \cdot m_1 \cdot \theta_2}{c \cdot \left(m_1 \cdot \theta_2 + m_2 \cdot \frac{\theta_2}{2} \right)} = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot Q_{y\partial}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{kp}}{2 \cdot t}} \right)} \quad (23)$$

и доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь:

$$\alpha_2 = \frac{c \cdot m_1 \cdot \frac{\theta_2}{2}}{c \cdot \left(m_1 \cdot \theta_2 + m_2 \cdot \frac{\theta_2}{2} \right)} = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot Q_{y\partial}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{kp}}{2 \cdot t}} \right)} \cdot (24)$$

Как следует из зависимостей (23) и (24), с увеличением глубины шлифования t доля тепла α_1 , уходящего в образующиеся стружки, увеличивается от 0 до 1, а доля тепла α_2 , уходящего в обрабатываемую деталь, наоборот, уменьшается от 1 до 0.

В табл. 2 приведены расчетные значения отношения $l_{экстр}/2 \cdot t$, параметров α_1 и α_2 для исходных данных (шлифование закаленной стали ШХ15): $a = \lambda / (c \cdot \rho) = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = 42 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град.})$; $Q_{y\partial} = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $R_{kp} = 0,2 \text{ м}$.

Таблица 2
Расчетные значения отношения $l_{экстр}/2 \cdot t$ и параметров α_1 и α_2

$t \cdot 10^{-6}, \text{ м}$	10	20	40	80	160	320
$l_{экстр}/2 \cdot t$	9,17	7,7	6,47	5,44	4,57	3,84
α_1	0,1	0,12	0,14	0,155	0,18	0,2
α_2	0,9	0,88	0,86	0,845	0,82	0,8

Как видно, с увеличением глубины шлифования t в условиях обычного многопроходного шлифования имеет место незначительное увеличение параметра α_1 и уменьшение параметра α_2 , т.е. в обрабатываемую деталь уходит практически все образующееся при шлифовании тепло. Длина нагретой части адиабатического стержня $l_{экстр}$ значительно превышает глубину шлифования t . Этим и объясняется высокая вероятность образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях детали при шлифовании.

Сравнение зависимостей (22) и (23) показывает, что характер изменения доли тепла α_1 , уходящего в образующиеся стружки, идентичен характеру изменения температуры θ_2 . Следовательно, температура θ_2 изменяется по закону изменения параметра α_1 и зависимость (22) может быть представлена в виде:

$$\theta_2 = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \alpha_1. \quad (25)$$

Исходя из этого, важным условием уменьшения температуры θ_2 является уменьшение параметра α_1 за счет уменьшения глубины шлифования t при за-

данном значении $Q_{y\partial}$. Однако, основным условием уменьшения температуры θ_2 следует рассматривать уменьшение условного напряжения резания σ , которое прямо пропорционально связано с температурой резания θ_2 .

Зависимость (18) после преобразований можно представить в виде:

$$\theta_2 = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{Q_{y\partial}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{kp}}{2 \cdot t}} \right)}. \quad (26)$$

Как видно, зависимость (26) отличается от аналогичной зависимости (22) лишь отсутствием в знаменателе (в скобках) первого слагаемого, равного единице. Однако, судя по расчетным значениям параметра α_1 (табл. 2), который входит в зависимость (25), он принимает небольшие значения – значительно меньше единицы. Поэтому в первом приближении зависимости (26) и (22) можно рассматривать фактически идентичными, и расчеты температуры резания θ_2 производить по обеим зависимостям. Данная закономерность обусловлена тем, что фактически все образующееся при многопроходном шлифовании тепло уходит в обрабатываемую деталь. Следовательно, учет тепла, уходящего в образующиеся стружки, не вносит принципиальных изменений в закономерности формирования температуры θ_2 .

К такому же выводу можно прийти, рассматривая процесс продольного точения, для которого справедлива зависимость (19), учитывая соотношения $Q_1 = A = \sigma \cdot B \cdot L \cdot t$. В итоге приходим к зависимости (20), полученной применительно к процессу шлифования.

Следовательно, температура резания θ_2 при шлифовании и лезвийной обработке описывается одной и той же зависимостью. Отличие состоит лишь в значениях условного напряжения резания, которое, как известно, меньше при лезвийной обработке, так как при шлифовании оно определяется, главным образом, интенсивным трением связки круга с обрабатываемым материалом. Этим объясняются более высокие значения температуры резания при шлифовании. Поэтому лезвийную обработку целесообразно использовать на финишных операциях, когда необходимо исключить образование температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях детали и обеспечить высококачественную обработку.

Выводы. В работе получены упрощенные аналитические зависимости для определения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке с учетом баланса тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки. Расчетами установлено, что при многопроходном шлифовании в обрабатываемую деталь уходит фактически все образующееся при шлифовании тепло, чем и объясняется высокая вероятность образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях детали. Доказано, что при шлифовании и лезвийной обработке тем-

пература резания описывается фактически одинаковыми зависимостями, а уменьшить температуру резания можно главным образом за счет уменьшения условного напряжения резания путем повышения режущей способности круга и снижения интенсивности трения в зоне резания, а также уменьшением глубины шлифования и увеличением скорости детали. Показано, что вследствие меньших значений условного напряжения резания при лезвийной обработке, ее целесообразно использовать на финишных операциях взамен процессов шлифования, которые характеризуются повышенными показателями энергоемкости обработки и температуры резания.

Список литературы

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 127 с.
4. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф.В.

Новиков, С.М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: междунар. Научн.-техн. конф., 19-20 апреля 2007 г.: труды – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8-20.

5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 2. “Теплофизика резания материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с.

References (transliterated)

1. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya. Moscow. Mashinostroenie, 1975. 175 p.
2. Reznikov A.N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov. Moscow. Mashinostroenie, 1981. 279 p.
3. Evseev D. G. Formirovaniye svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke / D. G. Evseev. – Saratov: Izd-vo Sarat. Un-ta, 1975. – 127 s.
4. Novikov F.V. Povysheniye effektivnosti tekhnologii finishnoy obrabotki detaley par treniya porshnevyykh nasosov. Fizicheskie i kompiuternye tekhnologii: mezhdun. Nauchn.-tekhn. konf., 19-20 aprelya 2007. Kharkov: KhNPK “FED”, 2007. – pp. 8-20.
5. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod obsh. Red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. – V 10 tomakh. – Odessa: ONPU, 2003. Vol. 2. “Teplofizika rezaniya materialov”. 625 p.

Поступила (received) 22.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Спрощений розрахунок температури різання при шліфуванні та лезовій обробці / Ф. В. Новіков, В. І. Полянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 87–92. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Упрощенный расчет температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке / Ф. В. Новиков, В. И. Полянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 87–92. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Simplified calculation of the cutting temperature during grinding and blade machining / F. Novikov, V. Polyanskiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.83–86. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

Novikov Fedor Vasiliviyth – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of «Science and Technology» Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

Полянський Володимир Іванович – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ «Імперія металів», Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com;

Полянський Владимир Иванович – кандидат технических наук, Генеральный директор, ООО «Империя металлов», Харьков; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com4

Polyansky Vladimir Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, General Director of LLC “Empire Metals”, Kharkov; tel.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com.

ЗМІСТ

<i>Хавина И.П., Молчанов Г.И.</i> Мультиагентная система оптимального управления коалицией роботов	5
<i>Онисько О.Р., Псюк М.І.</i> Аналіз забезпечення точності профілю замкової нарізи виготовленої різцями із загальним положенням передньої поверхні та заданої точністю її встановлення.....	10
<i>Гнатюк А. О.</i> Експериментальні дослідження показників точності при шліфуванні профілю цівкового колеса героторної пари в умовах планетарного обкату.....	18
<i>Добротворский С.С., Алексенко Б.А., Добровольская Л.Г.</i> Влияние микроволнового излучения на интенсивность процесса десорбции влаги с поверхности молекулярных сит.....	26
<i>Іванов В. О., Карпуть В. Є., Ващенко С. М., Заяць Й., Кармаза А. І.</i> Структурно-функціональне моделювання процесу проектування верстатних пристроїв.....	30
<i>Новиков Ф. В., Кленов О.С.</i> Условия уменьшения энергоемкости и повышения производительности механической обработки.....	38
<i>Ковалевська О.С.</i> Динамічний аналіз нових конструкцій верстатів – роботів.....	45
<i>Костюк Г.И.</i> Фемтосекундная лазерная обработка ри из «волкар» для создания на нём наноструктурного слоя.....	49
<i>Петрусенко Л.О., Антонюк В.С.</i> Расчётный метод определения геометрических параметров твердосплавного режущего инструмента.....	55
<i>Костюк Г. И., Панченко Ю.С.</i> Эффективность получения наноструктур на инструментальной стали у12 за счет действия лазерного излучения.....	61
<i>Новік М.А., Юрчишин О.Я., Музиченк В.В.</i> Дослідження статичних та динамічних характеристик безкамерних затискних патронів для високошвидкісної обробки матеріалів різанням.....	67
<i>Пермяков А.А., Ключко А.А., Сеница Ю.А.</i> Синтез технологических параметров высокопроизводительной обработки зубчатых реек спаренными фрезами.....	71
<i>Костюк Г. И., Григор О.Д., Матвеев А.В.</i> Влияние характера задания теплофизических и термомеханических характеристик магниевых сплавов при обработке с целью получения наноструктур ионами с использованием стохастических значений и полученных квантово механических методом.....	78
<i>Єнікєєв О.Ф., Євсюкова Ф.М., Приходько О.Ю.</i> Аналіз метрологічних характеристик вимірювальних перетворювачів потужності.....	83
<i>Новиков Ф. В., Полянский В. И.</i> Упрощенный расчет температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке.....	87

CONTENTS

<i>Khavina I., Molchanov G.</i> Multi-agent systems optimal control coalition robots.....	5
<i>Onysko O., Psiuk M.</i> Analysis to ensure the accuracy of the tool-joint tapered thread profile manufactured by lathe tool with tool face general provisions and set accuracy of installation.....	10
<i>Gnatyuk A.</i> Research precision parameters for generating gear grinding bobbin wheel profile of gerotor.....	18
<i>Dobrotvorsky S., Aleksenko B., Dobrovolska L.</i> Influence of microwave radiation on the intensity of the moisture desorption from the surface of the molecular sieves.....	26
<i>Ivanov V., Karpus V., Vaschchenko S., Zajac J., Karmaza A.</i> Structural-functional simulation of fixture design.....	30
<i>Novikov F., Klenov O.</i> Conditions for reducing energy intensity and increasing the productivity of machining	38
<i>Kovalevska O.</i> Dynamic analysis of new designs of machines – robots.....	45
<i>Kostyuk G.</i> Femtosecond laser treatment from "Volkar" to create nanostructured layer on it.....	49
<i>Petrusenko L., Antonyuk V.</i> Calculation method for determining the geometric parameters of carbide cutting tools.....	55
<i>Kostyuk G., Panchenko Yu.</i> Efficiency of obtaining nanostructures on instrumental steel u12 due to the action of laser radiation.....	61
<i>Novik M., Yurchyshyn O., Muzychenko V.</i> Investigation of static and dynamic characteristics tubeless clamping cartridges for high-speed machining.....	67
<i>Permyakov A., Klocho A., Sinitsa Yu.</i> Synthesis of technological parameters of high-performance processing of toothed racks by twin milling cutters.....	71
<i>Kostyuk G., Grigor O., Matveyev A.</i> Influence of the nature of the task of thermophysical and thermomechanical characteristics of magnesium alloys in processing for the purpose of obtaining nanostructures by ions using stochastic values and obtained by quantum mechanical methods.....	78
<i>Yenikieiev A., Yevukova F., Prihodko O.</i> Analysis of metrological characteristics of power transducers.....	83
<i>Novikov F., Polyanskiy V.</i> Simplified calculation of the cutting temperature during grinding and blade machining.....	92

ДЛЯ НОТАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:
Технології в машинобудуванні

№ 17 (1239) 2017

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. О.А. Пермяков,
д-р техн. наук, проф. О.О. Клочко
Технічні редактори канд. техн. наук, доц. Є.В. Басова,
канд. техн. наук, доц. Іванова М.С.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів.
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com.

Обл.-вид № 16–17.

Підп. до друку 07.06.2017 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. № 301133. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Надруковано в друкарні ФО-П Дуюнова Т.В.
Свідоцтво про державну реєстрацію № 2475418720 від 19.11.2014 р.
61023, Харків, вул. Веснина, 12.
тел. +38 (057) 717-28-80, e-mail: promart_order@ukr.net