

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Технології в
машинобудуванні**

№ 2'2021 (4)

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: Techniques in
a machine industry**

No. 2'2021 (4)

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2021

Kharkiv
NTU "KhPI", 2021

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Технологии в машиностроении = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2021 — № 2(4). — 53 с. — ISSN 2079-004X.

Видання присвячене освітленню досягнень в галузі машинобудування. Мета видання полягає у публікації оригінальних досліджень, які теоретично досліджують та вдосконалюють технологічні процеси виготовлення деталей машин і складання виробів, технологічного обладнання та оснащення, із приділенням особливої уваги: методам механічної обробки, їх стабільності і надійності; формуванню точності й якості поверхонь деталей машин; моделюванню, проектуванню й оптимізації технологічних процесів; організаційно-технологічним проблемам гнучкого виробництва; автоматизації операцій механоскладального виробництва; створенню, управлінню та діагностиці технологічних і мехатронних систем; інтегрованим та комп'ютерним технологіям в машинобудуванні; проблемам створення систем підтримки життєвого циклу виробу машинобудування; фізико-механічним та нанотехнологіям в машинобудуванні.

Для науковців та фахівців в галузі технологій машинобудування, викладачів вищої школи, аспірантів і студентів. This issue is devoted to clarify achievements in the mechanical engineering. The purpose of the edition is publishing original researches which explore theoretically and improve the engineering processes of machines parts manufacturing and products assembly, equipment, jigs and fixtures with paying special attention to stability and reliability of machining methods; assurance of accuracy and quality of surfaces; modeling, design and optimization of machining processes; organizational and technical problems of flexible production; automation of operations of mechanical assembly production; creation, management and diagnostics of technological and mechatronic systems; integrated and computer technologies in engineering; design problems of systems for supporting the life cycle of a machine-building product; physical-mechanical technologies and nanotechnologies in mechanical engineering. The edition is intended for scientists and specialists of mechanical engineering, lecturers, post-graduate students and students.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України
КВ № 24359-14199Р від 10 лютого 2020 р.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).
Офіційний сайт видання: <http://web.kpi.kharkov.ua/tmms/ru/vestnik-ntu-hpi/>, <http://tm.khpi.edu.ua>

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Відповідальний редактор:

Пермяков О.О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Анділахай О.О., д-р техн. наук, проф., ПНТУ, Україна
Антонюк В.С., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна
Воронцов Б.С., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна
Гасанов М.І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Добротворський С.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Дмитриев Д.О., д-р техн. наук, проф., ХНТУ, Україна
Драган Перакович (Peraković, Dragan) -PhD, полный профессор, Университет Загреб, Хорватия
Кальченко В.В., д-р техн. наук, проф., ЧНТУ, Україна
Кане М.М., д-р техн. наук, проф., Білоруський НТУ, Білорусь
Клочко О.О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Ковальов В.Д., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна
Ларшин В.П., д-р техн. наук, проф., ОНПУ, Україна
Мироненко Є.В., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна
Набока О.В., к-т техн. наук, НТУ «ХПІ», Україна
Михел Балол (Балог, Михал), доцент, доктор філософії, Технічний університет Кошице, Словаччина
Пасічник В.А., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна
Сталінський Д.В., д-р техн. наук, проф., ДП УкрНТЦ «ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна
Степанов М.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Ступницький В.В., д-р техн. наук, проф., Львівська «Політехна», Україна
Фадєєв В.А., д-р техн. наук, проф., ПАТ «ФЕД», Україна
Хавін Г.Л., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Editorial staff

Associate editor:

Permiakov A.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Andilakhai O.O., professor, PNTU, Ukraine
Antonyuk V.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine
Vorontsov B.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine
Hasanov M.I., professor, NTU "KhPI", Ukraine
Dobrotvorsky S.S., professor, NTU "KhPI", Ukraine
Dmitriev D.O., prof., KhNTU, Ukraine
Dragan Perakovich -PhD, full professor, University of Zagreb, Croatia
Kalchenko V.V., professor, ChNTU, Ukraine
Kane M.M., professor, Bilorusky NTU, Bilorus
Klochko O.O., prof. NTU "KhPI", Ukraine
Kovalov V.D., professor, DDMA, Ukraine
Larshin V.P., prof., ONPU, Ukraine
Mironenko E.V., professor, DDMA, Ukraine
Naboka O.V., Ph.D. sciences, NTU "KhPI", Ukraine
Michel Ballol, Associate Professor, Doctor of Philosophy, Technical University of Kosice, Slovakia
Pasichnik V.A., prof., NTUU "KPI", Ukraine
Stalinsky D.V., prof., DP UkrSTC ENERGOSTAL, Ukraine
Stepanov M.S., professor, NTU "KhPI", Ukraine
Stupnitsky V.V., prof., Lvivska Politeha, Ukraine
Fadeev V.A., professor, PAT "FED", Ukraine
Khavin G.L., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 11 від 26 листопада 2021р.

А.А.ПЕРМЯКОВ, докт.техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
С.Е.СЛИПЧЕНКО, науч. сотр НТУ «ХПИ»

ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В статье рассматривается интерпретация управляющих сетей (SN), которая построена на основе безопасных сетей Петри (SPN). Приведено обоснование применения сетей Петри при решении задач технологии машиностроения. На примере задачи об эффективном использовании производственных ресурсов продемонстрированы возможности SN, проведено сравнение с моделями на основе безопасных сетей Петри. Рассмотрена возможность моделирования параллельных процессов обработки сложных деталей на базе SPN.

Ключевые слова: сети Петри, имитационное моделирование, деталь, макропереход, метка, алгоритм, управляемые переходы.

О.А.ПЕРМЯКОВ, С.Е.СЛИПЧЕНКО ЗАСТОСУВАННЯ КЕРІВНИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ ДЛЯ ОБРОБКИ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ

У статті розглядається інтерпретація мереж, що управляють (SN), яка побудована на основі безпечних мереж Петрі (SPN). Наведено обґрунтування застосування мереж Петрі під час вирішення завдань технології машинобудування. На прикладі завдання про ефективне використання виробничих ресурсів продемонстровано можливості SN, проведено порівняння з моделями на основі безпечних мереж Петрі. Розглянуто можливість моделювання паралельних процесів обробки складних деталей на базі SPN.

Ключові слова: мережі Петрі, імітаційне моделювання, деталь, макроперехід, мітка, алгоритм, керовані переходи.

A.A. PERMYAKOV, S.E. SLIPPCHENKO APPLICATION OF CONTROL PETRI NETS FOR PROCESSING BODY PARTS

The article deals with the interpretation of control nets (SN), which is based on secure Petri nets (SPN). The rationale for the use of Petri nets in solving problems of mechanical engineering technology is given. On the example of the problem of the efficient use of production resources, the capabilities of SN are demonstrated, a comparison is made with models based on secure Petri nets. The possibility of modeling parallel processes for processing complex parts based on SPN is considered.

Keywords: Petri nets, simulation, detail, macro transition, label, algorithm, controlled transitions.

Введение. В статье рассмотрены управляющие сети Петри с функциональными расширениями, позволяющими моделировать управление асинхронными параллельными потоками при многовариантном выборе в вершинах мест и вершинах переходов, а также при соблюдении запрещающих условий.

Моделирование сложных управляющих алгоритмов на основе сетей Петри. Имитационное моделирование часто применяется при разработке программного обеспечения, когда возникает задача оценки эффективности его работы

При выборе средства имитационного моделирования руководствуются рядом требований, таких как возможность проверки работоспособности, отображение корректного формирования и взаимодействия параллельных потоков, возможность отслеживания тупиковых ситуаций, возможность проверки корректности реализации задачи в параллельном алгоритме.

Для удовлетворения вышеназванных требований в теории сетей Петри разработаны наборы статических и динамических свойств, которые позволяют отслеживать топологию модели на этапе построения, устранять свойства небезопасности и конфликтности, определять неживые участки сети Петри при имитационном моделировании.

Перспективными с точки зрения изобразительной мощности являются управляющие сети Петри (SN), которые основываются на свойствах безопасной интерпретации сетей Петри (SPN) с применением ингибиторных дуг и управляющих векторов для моделирования параллельных процессов с многовариантным выбором. Такие задачи возникают при моделировании логистических задач, задач об эффективном размещении, задач об оптимальном использовании производственных ресурсов и многих подобных задач.

Постановка задачи. При формулировании задачи об эффективном использовании производственных ресурсов важно задать ограничения, налагаемые внутренними и внешними обстоятельствами, а также начальные ресурсы и их распределение. Задача состоит в оптимальном использовании свободных производственных ресурсов при обработке корпусных деталей на многооперационных станках с ЧПУ (обрабатывающих центрах). Критерием оптимальности является максимизация производительности и точности обработки при минимизации времени обработки и задействованных производственных ресурсов. При решении задачи должны быть учтены особенности обрабатываемых деталей, технологические возможности станков и предусмотрены алгоритмы минимизации производственных ресурсов. Кроме того по условию задачи необходимо исключить обработку двух деталей на одном обрабатывающем центре.

Применение управляющих сетей Петри. При создании моделей систем управления параллельными процессами с неравномерным распределением условий и ресурсов неизбежно возникает необходимость обработки вариантов решений и выбора наилучшего по установленному критерию решения для реализации дальнейших действий.

В случае построения модели поставленной задачи на основе безопасных сетей Петри возникают трудности с отображением и проверкой функционирования алгоритмов выбора альтернативного варианта из множества доступных. Так на рис. 1 представлена модель решения поставленной задачи для трех обрабатываемых деталей (p_1, p_2, p_3) для изделия (B), которые могут быть изготовлены на многооперационных станках с ЧПУ (A_1, A_2, A_3).

На первом этапе построения модели необходимо отобразить конструкцию, которая позволит выбрать наиболее сложную деталь и подобрать для нее оптимальные условия обработки. Дальнейшие действия по обработке оставшихся деталей должны быть отображены с использованием тех же алгоритмов, что и для первой детали. Для отображения таких алгоритмов в безопасных сетях Петри необходимо применить макропереходы τ_i , которые позволяют производить совместную обработку условий и осуществлять перекрещивание потоков действий.

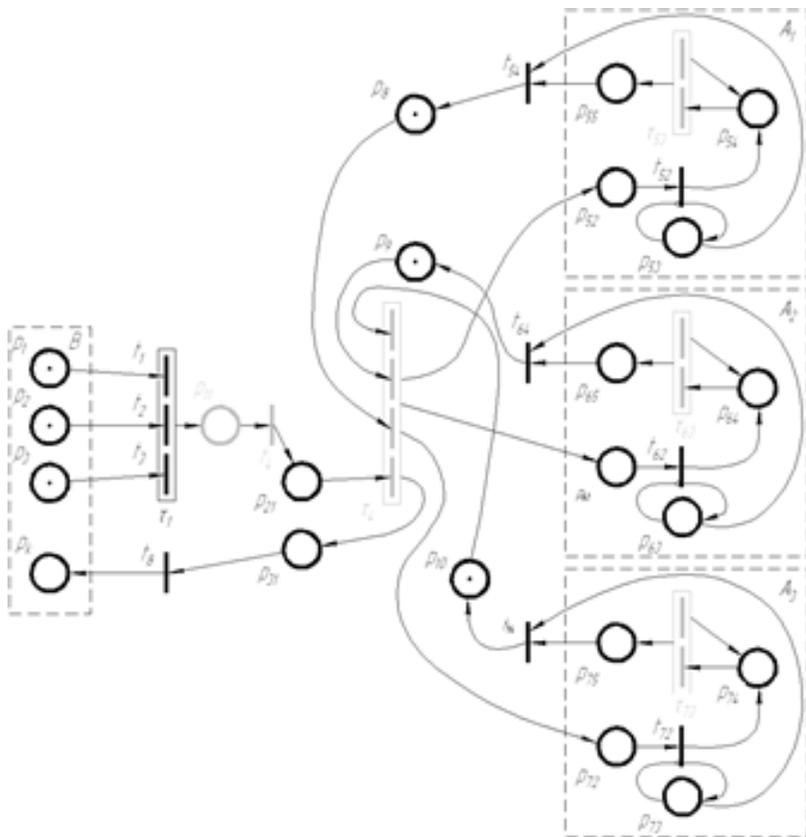


Рис. 1 – Модель оптимизации обработки трех деталей представленная безопасной сетью Петри.

Начальными (входными) вершинами в модели задачи являются p_1, p_2, p_3 , которые содержат заготовки (метки), предоставленные для обработки. Заготовки концентрируются через соответствующие переходы t_1, t_2, t_3 , в макропереходе τ_1 и последовательно поступают в вершину места p_{11} , далее

для составления списка передаются в вершину перехода t_4 , где и проводится выбор наиболее сложной детали. Данная заготовка поступает в макропереход τ_4 , в котором проводится анализ поступившей информации о возможностях многооперационных станков с ЧПУ (по количеству координат обработки).

После срабатывания макроперехода τ_4 , метки передаются в вершины мест $p_{52}, p_{62}, p_{72}, p_{31}$. Информация, которая переносится этими метками, будет различной, поскольку заготовка может обрабатываться только на одном станке, то на остальные многооперационные станки с ЧПУ приходят метки с нулевыми значениями, и в конечную вершину p_k также, поскольку до совершения операций в ней не должны появиться другие значения. Метки с нулевыми значениями сжигаются в вершинах переходов t_{i2} и t_8 . Допустим наибольшее значение получено для станка A_1 , тогда метка, которая будет передана в p_{52} , содержит определенное значение (число обрабатываемых поверхностей), а метки поступившие в вершины p_{62}, p_{72}, p_{31} , нулевые значения (эти метки будут удалены из сети в вершинах переходов t_{62}, t_{72} и t_8).

Метка из вершины места p_{52} активизирует переход t_{52} , поскольку в вершине p_{53} , от которой идет ингибиторная (запрещающая) дуга к t_{52} , нет метки. Переход t_{52} моделирует принятие решения об обрабатываемом оборудовании, а перемещение метки в вершину p_{54} – начало обработки; в p_{53} – блокирование новых заданий для поступления на станок на протяжении времени обработки. Если условия обработки остаются в пределах допустимых отклонений, определяемых требованиями заказчика, то метка, активизируя макропереход τ_{53} , возвращается в вершину места p_{54} . Если отклонения превышают допустимые пределы, метка из макроперехода τ_{53} направляется в вершину p_{55} , активизируя переход t_{54} погашая метки в вершинах мест p_{55} и p_{53} . При удалении метки из p_{53} , получаем новую возможность активизировать переход t_{52} , срабатывание которого моделирует обработку новой заготовки. Из вершины перехода t_{54} , моделирующей окончание обработки (из-за неудовлетворительного качества или по окончанию партии деталей), метка передается в вершину места p_8 . Далее метка возвращается в вершину макроперехода τ_4 , из которой может опять перейти в одну из вершин p_{52}, p_{62}, p_{72} для обработки если таковая обоснована, иначе метка будет передана через вершины p_{31} (окончание периода обработки) и t_8 , в которой производится технический контроль полученной детали, в выходную вершину p_k – итоговые ресурсы заказчика.

Условия запрета обработки двух деталей на одном многооперационном станке с ЧПУ реализовано в модели конструкцией с ингибиторной дугой, которая на время поступления одной заготовки на станок, блокирует входящую в подмодель станка A_i вершину t_{i2} (метка в вершине p_{i3}) и не позволяет до окончания обработки (до активизации вершины перехода t_{i4}) ее разблокировать.

При представлении модели управляющей сети Петри (рис.2) большинство макропереходов представляем управляемыми переходами, в которых реализуются алгоритмы расчета условий выбора альтернатив или проводится перекрещивание потоков действий (моделируемых движением меток). Также избавляемся от избыточных вершин, которые на рис. 1 выделены серым цветом.

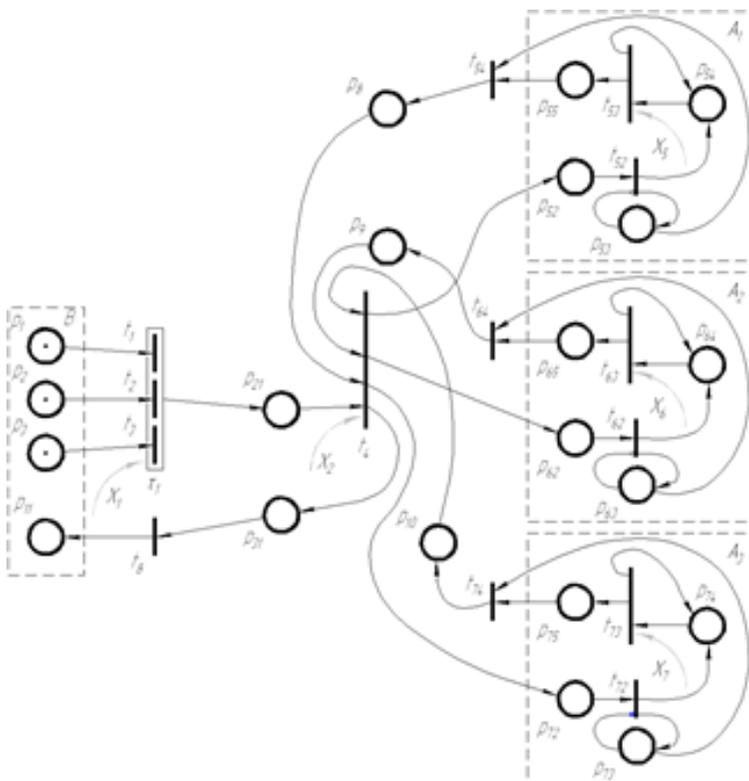


Рис. 2 – Модель оптимизации обработки трех деталей представленная управляющей сетью Петри.

При рассмотрении модели, представленной управляющей сетью Петри, нужно обратить внимание на различные функции, моделируемые управляющими векторами X_i .

Вектор X_1 моделирует выбор наиболее сложной обрабатываемой детали и передает его в вершину места p_{21} для выбора его дальнейшего размещения, которое производится в вершине t_4 . Вектор X_2 позволяет скоординировать передачу метки только в одну из вершин p_{52} , p_{62} , p_{72} , p_{31} , что избавляет от

ненужных операций с передачей и погашением нулевых пакетов. Вектора X_5 , X_6 , X_7 позволяют моделировать изменение условий обработки и принимать решение о сохранении или прекращении дальнейшей обработки деталей.

Результаты исследования. Рассмотренный пример позволяет сравнить полученные модели задачи, построенные безопасной и управляющей сетями Петри. Анализируя рисунки 1 и 2 можно наглядно убедиться в лаконичности управляющей сети, которая избавляя от мелких элементов модели, все же позволяет достичь адекватного визуального отражения основных внутренних и внешних факторов, более обстоятельно провести анализ модели, устранить критические свойства, не наращивая при этом количество служебных элементов сети Петри.

Заключение. На примере задачи об эффективном использовании производственных ресурсов продемонстрированы преимущества управляющей сети (SN) в сравнении с безопасной сетью (SPN). При использовании управляющей сети удастся наглядно отобразить многовариантный выбор альтернатив, передачу управляющей информации от внешних систем, более лаконично построить модель исследуемой системы. Важным свойством управляющих сетей Петри является установка приоритетов в вершинах переходов и мест, основанная на логических конструкциях, параметрами которых являются как внутренние, так и внешние переменные. Это позволяет говорить о возможности построения адаптивных моделей сложных систем с многопоточным параллелизмом, оперативно реагирующих на изменение внутренних и внешних условий. Представленное средство моделирования позволяет проводить в динамике (при перемещении меток) контроль критических свойств в модели и указывать локализацию небезопасных и конфликтных участков.

Список литературы

1. Бородакий В.Ю. Анализ средств имитационного моделирования распределенных информационных систем./ В.Ю. Бородакий, Г.Е. Окороченко //Компьютерные системы и технологии: Научная сессия МИФИ. - 2007. - Том 12. – С. 129-130. 2. Васильев В.В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем./ В.В.Васильев, В.В. Кузьмук – Киев: Наукова думка, 1990 - 216с. 3. Кузьмук В.В. Модифицированные сети Петри и устройства моделирования параллельных процессов / В.В. Кузьмук , О.О. Супруненко : Монография. - Киев: Маклаут, 2010.-252с.

Bibliographi (transliterated)

1. *Borodakij V.YU., Okorochenko G.E. Analiz sredstv imitacionnogo modelirovaniya raspredelennyh informacionnyh system. Kompyuternye sistemy i tehnologii: Nauchnaya sessiya MIFI – 2007. – Tom 12 – P. 129-130.* 2. *Vasilev V.V., Kuzmuk V.V. Seti Petri, paralelne algoritmy i modeli multiprocessorny system – Kiev: Naukova dumka, 1990 - 216P.* 3. *Kuzmuk V.V., Suprunenko O.O. Modificirovannye seti Petri i ustrojstva modelirovaniya paralelny processov. Monografiya. – Kiev: Maklout.2010.-252P.*

Поступила (received) 15.06.2021

А.А. АНДИЛАХАЙ, докт. техн. наук, доц., ГВУЗ “ПГТУ”, Марнуполь

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИНИШНОЙ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ

В статье разработаны обобщающие эмпирические математические модели параметров абразивной обработки деталей затопленными струями, которые позволяют по критериям наименьшей шероховатости поверхности и наибольшей производительности определить рациональные параметры обработки. Установлено, что в процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях, образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах $R_a = 0,8 - 1,25$ мкм, с упрочняющим наклепом (сжимаемыми напряжениями глубиной 5 – 6 мкм), существенно уменьшается трудоемкость обработки.

Ключевые слова: абразивная обработка, абразивные зерна, мелкие детали, сжатый воздух, сопло Лавала, шероховатость поверхности, производительность обработки.

О.О. АНДИЛАХАЙ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІНІШНОЇ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ДРІБНИХ ДЕТАЛЕЙ

У статті розроблено узагальнюючі емпіричні математичні моделі параметрів абразивної обробки деталей затопленими струменями, які дозволяють за критеріями найменшої шорсткості поверхні та найбільшою продуктивністю визначити раціональні параметри обробки. Встановлено, що в процесі обробки відбувається заокруглення кромek деталей, усуваються задирки, сліди корозії та різні неоднорідності на оброблюваних поверхнях, утворюється однорідна матова поверхня з шорсткістю в межах $R_a = 0,8 - 1,25$ мкм, зі зміцнювальною наклепом - 6 мкм), суттєво зменшується трудомісткість обробки.

Ключові слова: абразивна обробка, абразивні зерна, дрібні деталі, стиснене повітря, сопло Лавала, шорсткість поверхні, продуктивність обробки.

A.A. ANDILAHAY

INCREASING THE EFFICIENCY OF FINISHING JET AND ABRASIVE PROCESSING OF SMALL PARTS

The article develops generalizing empirical mathematical models of the parameters of abrasive machining of parts by submerged jets, which allow, according to the criteria of the least surface roughness and the highest productivity, to determine rational processing parameters. It has been established that during processing, the edges of the parts are rounded, burrs, traces of corrosion and various inhomogeneities on the treated surfaces are eliminated, a uniform matte surface is formed with a roughness in the range of $R_a = 0.8 - 1.25 \mu\text{m}$, with hardening (compressive stresses of depth 5 – 6 μm), the complexity of processing is significantly reduced.

Key words: abrasive processing, abrasive grains, small parts, compressed air, Laval nozzle, surface roughness, processing performance.

Введение. Струйно-абразивная обработка получила применение при обработке деталей сложной конфигурации. Однако интенсивный износ каналов сопел, через которые прокачивается абразивная суспензия, в ряде случаев ограничивает ее эффективное использование.

© А.А. Андилахай, 2021

Поэтому применительно к обработке мелких деталей (массой до 3 г) предложен метод абразивной обработки затопленными струями. Его сущность состоит в том, что через сопла прокачивается только сжатый воздух, а абразивные зерна, находящиеся в абразивной суспензии, присоединяются к струям сжатого воздуха после срезов сопел. Струи сжатого воздуха подаются таким образом, чтобы достигались обработка и равномерное перемешивание деталей, а также обеспечивалась сохранность внутренних поверхностей рабочей камеры. Учитывая недостаточную изученность этого прогрессивного метода обработки, настоящая работа посвящена обоснованию его технологических возможностей с точки зрения повышения качества и производительности обработки, а также разработки практических рекомендаций.

Анализ основных достижений и литературы. Проблемам струйно-абразивной обработки посвящены многочисленные исследования [1,2], на основе которых созданы специальные установки и определены оптимальные условия осуществления процесса обработки. При этом установлено, что изготовление сопел из износостойких материалов не решает проблемы их интенсивного износа. Поэтому кардинальным решением проблемы износа сопел стало создание метода абразивной обработки деталей затопленными струями, когда абразивные зерна присоединяются к абразивной струе за пределами сопла. В работах [3,4] определены основные технологические возможности этого метода обработки. Однако для обоснованного выбора рациональных условий обработки необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований качества и производительности обработки.

Цель исследования, постановка задачи. Целью данной работы является обоснование условий повышения качества и производительности абразивной обработки мелких деталей затопленными струями. Для этого необходимо выявить и реализовать основные факторы, определяющие функционирование процесса, разработать математические эмпирические модели шероховатости и производительности обработки и на их основе определить рациональные параметры обработки и размеры конструктивных элементов струйно-абразивных установок при их проектировании.

Материалы исследования. Для решения поставленной задачи проведен комплекс экспериментальных исследований основных параметров абразивной обработки деталей затопленными струями на установке, показанной на рис. 1. Экспериментально установлено, что плотность покрытия следами абразивных зерен обрабатываемой поверхности детали (рис. 2) увеличивается от середины к ее кромкам (рис. 3). Следовательно, наибольшая интенсивность съема материала при абразивной обработке затопленными струями достигается на торцовых поверхностях обрабатываемых мелких деталей.

На базе планированного дробного факторного эксперимента $2 \cdot 10^{-6}$ (1/8 реплики) построены математические модели определения производительности обработки (в качестве критерия оценки выбран

металлосъем M в мг за 30 минут обработки) и шероховатости поверхности (по критерию R_{max} , в мкм):

$$M = 39,9 \frac{V_a^{0,313} \cdot D_a^{0,046} \cdot m_d^{0,002} \cdot \Sigma^{0,833} \cdot W_{жс}^{0,16} \cdot d_c^{0,088} \cdot n_c^{0,4} \cdot D_{разм}^{0,074} \cdot \zeta^{0,009}}{\delta^{0,02}}, \quad (1)$$

$$R_{max} = 7,4 \frac{V_a^{0,27} \cdot D_a^{0,083} \cdot m_d^{0,028} \cdot \Sigma^{0,277} \cdot W_{жс}^{0,136} \cdot d_c^{0,09} \cdot n_c^{0,04} \cdot D_{разм}^{0,273} \cdot \zeta^{0,143}}{\delta^{0,054}}, \quad (2)$$

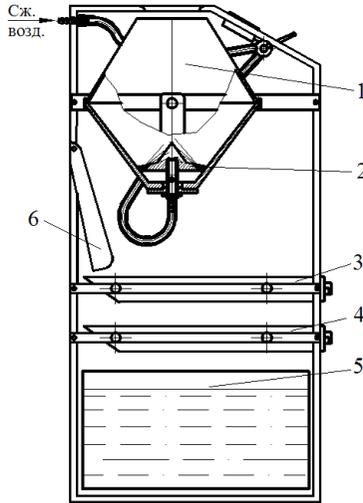


Рис. 1 – Схема лабораторной струйно-абразивной установки с объемом рабочей камеры 30 л: 1 – рабочая камера; 2 – сопловый аппарат (завихритель); 3 – решетка для деталей; 4 – решетка для абразивного зерна; 5 – бак-отстойник; 6 – желоб для суспензии



Рис. 2 – Образцы из латуни ЛС59.1 в форме диска диаметром 20 мм и толщиной 0,5; 1; 2; 4 и 8 мм: а – до обработки; б – после обработки

где V_a – объем загружаемого абразива, л;
 D_a – зернистость абразива, мм;
 m_d – единичная масса обрабатываемых деталей, г;
 Σ – суммарная масса обрабатываемых деталей, кг;
 $W_{жс}$ – объем заливаемой жидкости, л;

d_c – диаметр сопел, мм; n_c – количество сопел;

$D_{разм}$ – диаметр размещения сопел, м;

ζ – угол оси сопла к горизонту, градус;

δ – угол между осью сопла и касательной к окружности в точке ее размещения, градус.

Как следует из зависимости (1), наибольшее влияние на производительность обработки оказывает суммарная масса деталей Σ и в меньшей мере параметры n_c , V_a и $W_{жс}$. Установлено также незначительное влияние зернистости абразива D_a на производительность абразивной обработки затопленными струями (рис. 4, а), тогда как в известных методах струйно-абразивной обработки зернистость абразива является определяющим параметром процесса.

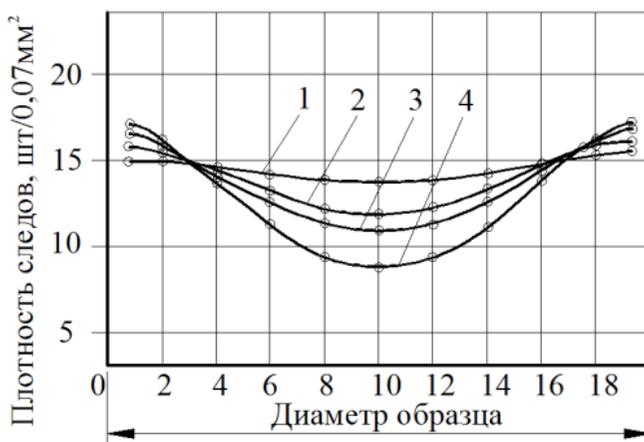


Рис. 3 – Плотность следов абразивных зерен (в поле зрения объектива – 0,07 мм²) в диаметральной направленности образцов в форме диска при толщине диска:
1 – 4,0 мм; 2 – 2,0 мм; 3 – 1,0 мм; 4 – 0,5 мм

Как следует из зависимости (2), фактически в одинаковой степени основное влияние на максимальную высоту микронеровностей обработанной поверхности R_{max} оказывают параметры Σ , V_a и $D_{разм}$. Доказано, что достигаемая высота микронеровностей R_{max} (рис. 4,б) находится в непосредственной связи с производительностью обработки, представленной съемом металла, и стабилизируется для данных условий обработки при $R_{max} = 3,4$ мкм.

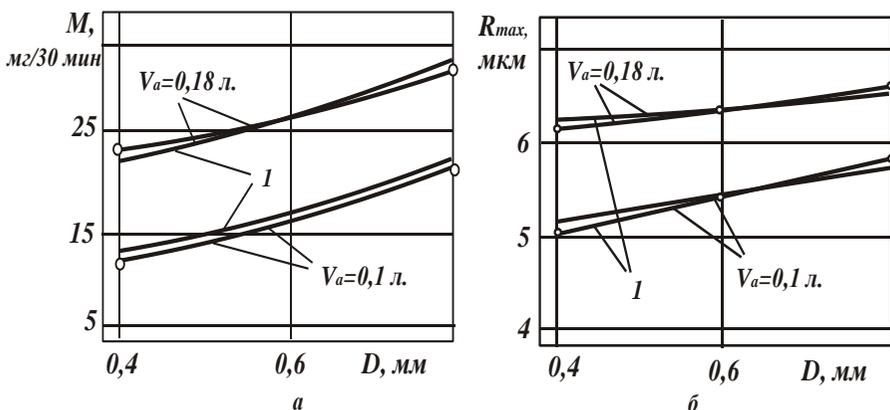


Рис. 4 – Исследуемые параметры механообработки: а – зависимость производительности обработки M от размера абразивного зерна D_a ; б – зависимость высоты микронеровностей R_{max} от размера абразивного зерна; 1 – расчетные кривые

Таким образом, разработанные обобщающие эмпирические математические модели параметров процесса абразивной обработки деталей затопленными струями (M и R_{max}) дают достаточно полное представление о технологических возможностях процесса и позволяют по критериям наибольшей производительности и наименьшей шероховатости поверхности определить рациональные параметры обработки. Экспериментально установлено, что реализовать наибольшую производительность обработки, например, для заданной шероховатости поверхности $R_{max} = 3,4$ мкм можно применением следующих условий обработки: объем загружаемого абразива – 0,18 л.; зернистость абразива – № 40; суммарная масса обрабатываемых деталей – 0,4 кг; объем заливаемой жидкости – 3,0 л.; диаметр сопел – 2 мм; количество сопел – 8; диаметр размещения сопел – 110 мм, угол оси сопла к горизонту – 25° ; угол между осью сопла и касательной к окружности в точке ее размещения – $0 \dots 5^{\circ}$. Полученные эмпирические зависимости для определения производительности обработки и шероховатости поверхности позволяют производить выбор рациональных технологических и конструктивных параметров и научно обоснованно подходить к проектированию оборудования для отделочной абразивной обработки деталей затопленными струями.

На этой основе разработано эффективное оборудование в виде гаммы установок (защищенных авторскими свидетельствами и патентами) для абразивной отделочной обработки мелкогабаритных деталей затопленными струями, позволяющее ликвидировать трудоемкие ручные зачистные операции, повысить качество, производительность и стабильность обработки за счет улучшения товарного вида обработанных деталей при одновременной обработке большого количества деталей с загрузкой в рабочую камеру

«навалом». Разработанные установки обеспечивают высокоэффективную направленную обработку торцовых поверхностей, плоских поверхностей и одновременно торцовых и плоских поверхностей деталей, а также обеспечивают улучшение эргономических показателей обработки за счет ее автоматизации и механизации. Повышение качества и производительности обработки достигается за счет применения сверхзвуковых профилированных сопел Лавала.

Проведенные экспериментальные исследования абразивной обработки деталей затопленными струями на разработанной установке показали возможность увеличения производительности обработки (рис. 5) при обеспечении требуемого качества обработанных поверхностей деталей по сравнению с используемыми базовыми установками. В процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях (рис. 6), образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах $R_a = 0,8 \dots 1,25$ мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями глубиной 5–6 мкм).

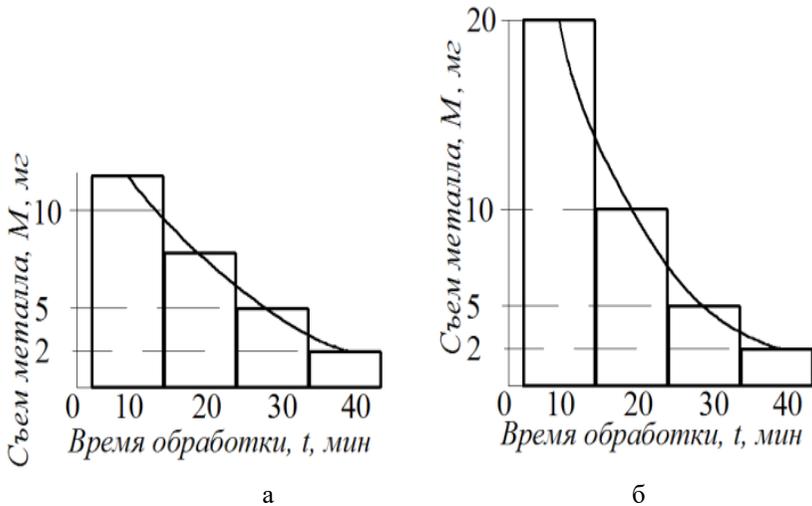


Рис. 5 – Зависимость съема металла M для различных промежутков времени обработки t : а – при использовании базовой установки; б – при использовании разработанной установки. Условия обработки: шлифзерно 63С; зернистость абразива 63П (630 мкм); давление сжатого воздуха 0,5 МПа; угол наклона осей сопел к горизонту 10°; сопловой аппарат базовой установки оснащен цилиндрическими соплами диаметром 2 мм, вновь разработанной установки - соплами Лавала с критическим сечением 2 мм

Проведенные испытания разработанных установок показали, что благодаря новым техническим решениям в конечном итоге удалось на 62% повысить производительность обработки при обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей. При этом установлено, что за счет создания дополнительного источника перемешивания обрабатываемых деталей, обеспечивающего увеличение количества одновременно обрабатываемых деталей, производительность обработки выросла на 10%. Установлено также, что благодаря улучшению качества абразивного материала, за счет очистки от отходов, а также использования чистой воды, достигнуто увеличение производительности обработки в среднем на 5 %.

Значительный прирост производительности обработки (на 39 %) получен в результате замены сопел с цилиндрическим каналом на профилированные сверхзвуковые сопла Лавала. Применение сопла Лавала стало возможным лишь благодаря использованию принципиально новой схемы струйно-абразивной обработки – абразивной обработки деталей затопленными струями, исключаящей износ каналов сопел потоком абразивных зерен, т.к. при использовании традиционных схем струйно-абразивной обработки “узким” местом (подверженным повышенному износу) в профилированном сопле является его критическое сечение.

Практикой установлено, что эффективной областью применения абразивной обработки затопленными струями является обработка мелких точных деталей малой жесткости и сложной конфигурации радио- и электротехнической промышленности, приборостроения, точной механики, оптико-механического производства, прецизионных деталей, используемых для нанотехнологий, общемашиностроительного назначения и деталей ювелирных изделий и геральдики.

Промышленные испытания разработанных установок показали, что за счет сохранности каналов сопел обеспечивается их надежная и бесперебойная работа, практически не нуждающаяся в техническом обслуживании. Установлено, что за время выполнения операции (приблизительно 40 минут) основное (машинное) время составляет 30 – 35 минут, т.е. оператор занят на обслуживании одной установки 5 – 10 минут. Следовательно, в условиях участка отделочной обработки оператор может одновременно обслуживать три таких установки с последовательным запуском их в работу.

Производительность обработки мелких деталей на разработанных установках по сравнению с их традиционной ручной немеханизированной обработкой может быть увеличена до 66 раз. Все зависит от количества обрабатываемых деталей: с их увеличением производительность резко увеличивается. Это, естественно, позволяет исключить технологические операции на предприятии, связанные с ручной отделочной (зачистной) обработкой данных деталей, и уменьшить число рабочих на этих операциях.

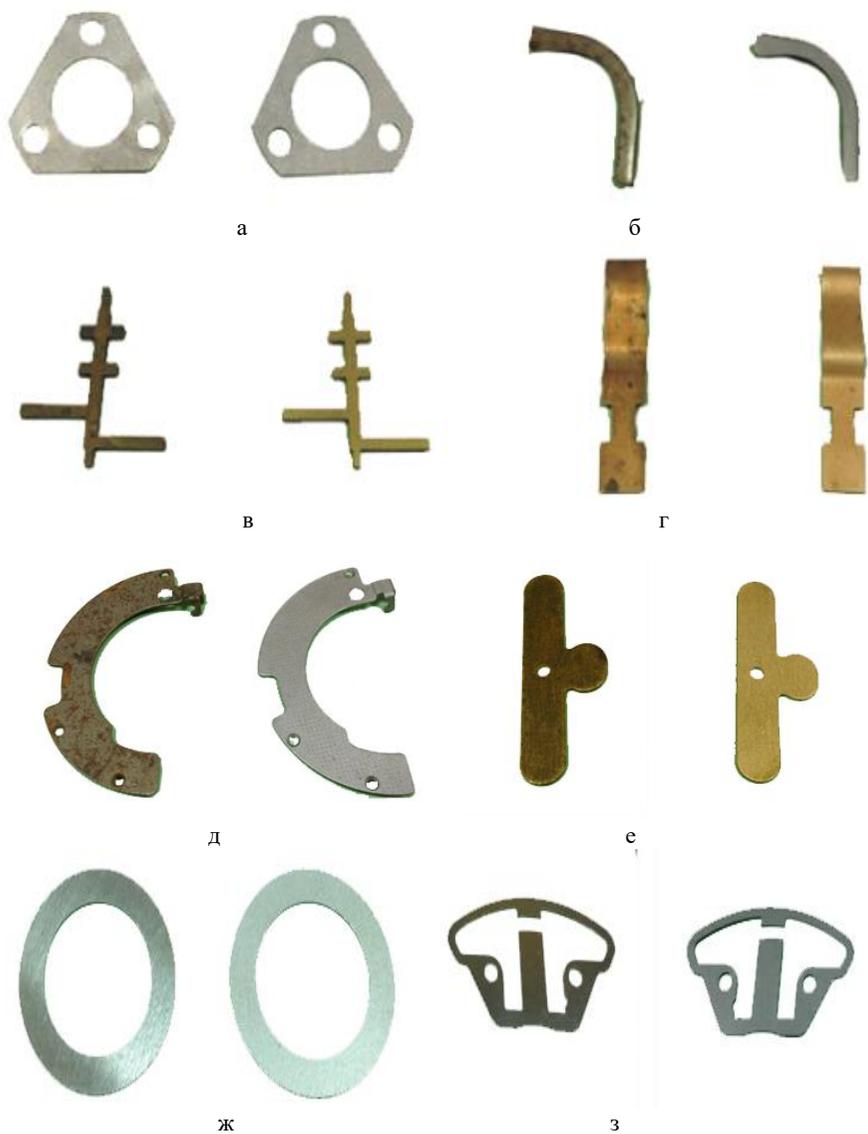


Рис. 6 – Внешний вид деталей из различных материалов до и после обработки:
а – алюминий; б – сталь-3; в – латунь ЛС59.1; г – бериллиевая бронза БрБ2;
д – сталь 3; е – титановый сплав ВТ-1; ж – латунь Л63; з – дуралюмин Д16.

Выводы. Экспериментально установлено, что наибольшая интенсивность съема материала при абразивной обработке затопленными струями достигается на торцовых поверхностях обрабатываемых мелких деталей, что позволяет в первую очередь рекомендовать предлагаемый метод для обработки торцовых поверхностей мелкогабаритных деталей. Разработаны обобщающие эмпирические математические модели параметров абразивной обработки деталей затопленными струями, которые позволяют по критериям наименьшей шероховатости поверхности и наибольшей производительности определить рациональные параметры обработки и произвести выбор количества и размеров конструктивных элементов установок при их проектировании. Установлено, что в процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях, образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах $R_a = 0,8 - 1,25$ мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями глубиной 5 – 6 мкм), существенно уменьшается трудоемкость обработки.

Список литературы

1. Кремень З.И. Турбоабразивная обработка деталей сложного профиля / З.И. Кремень, М.Л. Миссарский, В.З. Гузель. – М.: НИИмаш, 1987. – 53 с. 2. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий – К: Техника, 1989. – 177 с. 3. Андилахай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с. 4. Андилахай А.А. Технологические возможности абразивной обработки деталей затопленными струями / А.А. Андилахай // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2010. – № 49. – С. 140-143.

Bibliography (transliterated)

1. Kremen Z.I., Missarskiy M.L., Guzél V.Z. Turboabrazivnaya obrabotka detaley slozhnogo profilya., – Moscow: NIImach, 1987. – 53 P. 2. Provoloitskiy A.E. Struyno-abrazivnaya obrabotka detaley mashin. – Kiev: Tekhnika, 1989. – 177 P. Andilakhay A.A. Abrazivnaya obrabotka detaley zatoplennymi struyami. – Mariupol: PGTU, 2006. – 190 P. 4. Andilakhay A.A. Tekhnologicheskie vozmozhnosti abrazivnoy obrabotki detaley zatoplennymi struyami. Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh pratP. Tematychnyi vypusk: Tekhnologii v mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2010. – No 49. – P. 140-143.

Поступила (received) 12.08.2021

Ф.В. НОВИКОВ, д-р техн. наук, проф., ХНЭУ, Харьков;
О.С. КЛЕНОВ, канд. техн. наук, Фирма “ДиМерус Инженеринг”, Харьков

УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Приведено аналитическое решение об условиях уменьшения технологической себестоимости обработки и возможности реализации высокоскоростного резания. Показано, что скорость резания ограничена экстремумом (минимумом) себестоимости обработки. Увеличить скорость резания и реализовать условия высокоскоростной обработки можно за счет повышения стойкости режущего инструмента путем применения более прочных и износостойких инструментальных материалов и покрытий инструментов, характеризующихся низким коэффициентом трения.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, инструментальный материал, себестоимость обработки, скорость резания, температура резания, производительность обработки.

Ф.В. НОВІКІВ, О.С. КЛЕНОВ УМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИСОКОВИРОБНИЧОЇ ОБРОБКИ

Наведено аналітичне рішення щодо умов зменшення технологічної собівартості обробки та можливості реалізації високошвидкісного різання. Показано, що швидкість різання обмежена екстремумом (мінімумом) собівартості обробки. Збільшити швидкість різання та реалізувати умови високошвидкісної обробки можна за рахунок підвищення стійкості різального інструменту шляхом застосування більш міцних та зносостійких інструментальних матеріалів та покриттів інструментів, що характеризуються низьким коефіцієнтом тертя.

Ключові слова: високошвидкісна обробка, інструментальний матеріал, собівартість обробки, швидкість різання, температура різання, продуктивність обробки.

F.V. NOVIKOV, O.S. KLENOV CONDITIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF HIGH-PERFORMANCE PROCESSING

An analytical solution is given on the conditions for reducing the technological cost of processing and the possibility of implementing high-speed cutting. It is shown that the cutting speed is limited by the extremum (minimum) of the cost of processing. It is possible to increase the cutting speed and implement high-speed machining conditions by increasing the tool life by using stronger and more wear-resistant tool materials and tool coatings characterized by a low coefficient of friction.

Key words: high-speed machining, tool material, machining cost, cutting speed, cutting temperature, machining productivity.

Введение. Современные металлорежущие станки с ЧПУ типа “обрабатывающий центр” реализуют условия высокоскоростного резания, что открывает широкие возможности повышения точности, качества и производительности обработки. Однако, как показывает практика, обработка в условиях высокоскоростного резания характеризуется повышенной технологической себестоимостью, что нивелирует преимущества этого

© Ф.В. Новиков, О.С. Кленов, 2021

прогрессивного метода обработки. В связи с этим актуальной является проблема поиска новых технологических решений, обеспечивающих снижение себестоимости обработки без снижения параметров точности, качества и производительности обработки в условиях высокоскоростного резания.

Анализ основных достижений и литературы. Задачи теоретического определения условий уменьшения технологической себестоимости освещены в работах [1-3]. Вместе с тем, полученные решения основаны на использовании эмпирических зависимостей для определения стойкости режущего инструмента, справедливых для частных условий обработки. Кроме того, используемые эмпирические зависимости содержат лишь параметры режима резания, тогда как стойкость инструмента зависит от различных физических факторов, учет которых позволил бы получить более общие теоретические решения и обосновать основные пути снижения технологической себестоимости обработки в условиях высокоскоростного резания. Поэтому теоретический анализ технологической себестоимости обработки с позиции аналитического представления стойкости инструмента позволит более полно раскрыть технологические закономерности и возможности высокоскоростной обработки по критерию себестоимости обработки.

Цель исследования, постановка задачи. Целью работы является обоснование условий уменьшения технологической себестоимости обработки на основе математического моделирования технологические закономерности и возможности высокоскоростной обработки. Работа является развитием работ по исследованию технологической себестоимости обработки [4-6].

Материалы исследования. Для достижения поставленной цели воспользуемся зависимостью для определения технологической себестоимости обработки C при продольном точении для трех основных изменяющихся статей затрат, учитывающих затраты по заработной плате рабочего за обработку партии деталей и замену изношенного инструмента, а также затраты на инструмент [4,6]:

$$C = N \cdot t_0 \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N_0 \cdot t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N_0 \cdot Ц, \quad (1)$$

где N, N_0 – количество обрабатываемых деталей и потребляемых режущих инструментов;

t_0 – основное технологическое время обработки, мин;

$S_{\text{час}}$ – тарифная ставка рабочего, грн/мин;

k – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего;

t_c – время, затрачиваемое на снятие затупившегося инструмента [1], мин;

$Ц$ – цена инструмента, грн.

С учетом соотношений $t_0 = \mathcal{G}/Q$ и $N \cdot t_0 = N_0 \cdot T$ получено:

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{чac}} \cdot k + N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{чac}} \cdot k + \Pi)}{T}, \quad (2)$$

где $Q = V \cdot t \cdot S$ – производительность обработки (при продольном точении), $\text{м}^3/\text{с}$;

V – скорость резания, $\text{м}/\text{мин}$;

t – глубина резания, м ;

S – подача, $\text{м}/\text{об}$;

T – стойкость режущего инструмента, с .

Стойкость режущего инструмента T можно представить:

$$T = \frac{h}{V_{\text{изн}}}, \quad (3)$$

где h – длина площадки износа на задней поверхности инструмента, м ;

$V_{\text{изн}}$ – скорость износа инструмента на задней поверхности, $\text{м}/\text{с}$.

Тогда зависимость (2) опишется:

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{чac}} \cdot k + N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{чac}} \cdot k + \Pi) \cdot V_{\text{изн}}}{h}. \quad (4)$$

Как видно, с увеличением параметров режима резания V , t , S и T (или h) себестоимость обработки C будет уменьшаться. Однако при этом с увеличением V , t , S , очевидно, будет увеличиваться $V_{\text{изн}}$ и уменьшаться T , что приведет к увеличению C . Следовательно, в общем случае себестоимость обработки C будет изменяться по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Для определения экстремального значения C выразим стойкость режущего инструмента T эмпирической зависимостью [1]:

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}, \quad (5)$$

где C_4, m_1, q, p – постоянные для определенных условий обработки ($m_1 > p > q; m_1 > 1$).

В результате зависимость (2) примет вид:

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{чac}} \cdot k + N \cdot \mathcal{G} \cdot V^{m_1-1} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-1} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{чac}} \cdot k + \Pi)}{C_4}. \quad (6)$$

Поскольку $m_1 > 1$, $p > 1$, $q < 1$, то скорость резания V и подача S неоднозначно влияют на себестоимость обработки C , т.е. существуют экстремумы функции C от переменных V и S . Для определения экстремальных значений V и S следует подчинить функцию C необходимым условиям экстремума: $C'_V = 0$; $C'_S = 0$. Тогда

$$-N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V^2 \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \mathcal{G} \cdot (m_1 - 1) \cdot V^{m_1 - 2} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-1} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0; \quad (7)$$

$$-N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S^2} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \mathcal{G} \cdot (p - 1) \cdot V^{m_1 - 1} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-2} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0. \quad (8)$$

После преобразований получено:

$$-N \cdot \mathcal{G} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \mathcal{G} \cdot (m_1 - 1) \cdot V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0; \quad (9)$$

$$-N \cdot \mathcal{G} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \mathcal{G} \cdot (p - 1) \cdot V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0. \quad (10)$$

Как видно, решением системы уравнений является условие $m_1 = p$. Однако, как установлено экспериментально, $m_1 > p$. Следовательно, данное решение лишено физического смысла. Такое же неопределенное решение получено в работе [3]. Чтобы уйти от неопределенности, необходимо в качестве переменной величины рассматривать производительность обработки $Q = V \cdot t \cdot S$, а не ее компоненты V и S . Тогда зависимость (2) примет вид:

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{Q} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \frac{Q^{m_1 - 1}}{t^{m_1 - q} \cdot S^{m_1 - p}} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4}. \quad (11)$$

Из зависимости (11) вытекает, что минимум себестоимость обработки C будет достигаться при экстремальной производительности обработки $Q_{\text{эктр}}$ и максимально возможных значениях глубины резания t и подачи S . Подчиняя функцию C необходимому условию экстремума $C'_Q = 0$ получено:

$$Q_{\text{эктр}} = \left[\frac{S_{\text{vac}} \cdot k \cdot C_4}{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi) \cdot (m_1 - 1)} \cdot S^{m_1 - p} \cdot t^{m_1 - q} \right]^{\frac{1}{m_1}}; \quad (12)$$

$$C_{\text{min}} = \frac{N \cdot \mathcal{G} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k}{Q_{\text{эктр}}} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (13)$$

Как следует из зависимостей (12) и (13), увеличить $Q_{экстр}$ и уменьшить минимальное значение себестоимости обработки C_{min} можно главным образом за счет увеличения величины C_4 , зависящей от физико-механических свойств инструментального материала. Экстремальное значение скорости резания $V_{экстр}$ определяется из зависимости $V_{экстр} = Q_{экстр} / t \cdot S$. Следовательно, увеличение $V_{экстр}$ ограничено экстремумом (минимумом) себестоимости обработки C_{min} . Увеличить $V_{экстр}$ и соответственно реализовать условия высокоскоростной обработки можно в основном увеличением величины C_4 за счет применения более прочных и износостойких инструментальных материалов и покрытий инструментов.

Для раскрытия физической сущности полученного решения проведем его анализ на основе аналитической зависимости для определения температуры резания, возникающей на задней поверхности резца [6]:

$$\theta = f \cdot HV \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot V}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (14)$$

где f – коэффициент трения резца с обрабатываемым материалом;

HV – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м²;

c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К).

Как видно, при заданной температуре резания θ существенно увеличить скорость резания V и таким образом осуществить высокоскоростную обработку можно уменьшением двух параметров – f и h за счет применения инструментальных материалов, характеризующихся низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью, например, синтетических сверхтвердых материалов (алмаз, эльбор и т.д.), твердых сплавов с износостойкими покрытиями. Уменьшение длины площадки износа на задней поверхности инструмента h предполагает уменьшение стойкости режущего инструмента T . Если представить $V_{изн} = k_1 \cdot V^{n_1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}$ (где k_1 , n_1 , n_2 , n_3 – величины, зависящие от физико-механических свойств инструментального материала), то с учетом зависимости (3) зависимость (14) примет вид:

$$\theta = f \cdot HV \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_1 \cdot T \cdot V^{n_1+1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (15)$$

Откуда

$$T = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}{2k_1 \cdot f^2 \cdot HV^2 \cdot V^{n_1+1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}}. \quad (16)$$

Сравнивая зависимости (5) и (16) видно, что по структуре они фактически идентичны, рассматривая

$$C_4 = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}{2k_1 \cdot f^2 \cdot HV^2}. \quad (17)$$

Таким образом, полученное аналитическое решение позволяет раскрыть физическую сущность постоянной величины C_4 (которая устанавливается экспериментальным путем) и определить условия осуществления высокоскоростной обработки, которые, как установлено выше, состоят в увеличении C_4 . Согласно зависимости (17), они реализуются за счет увеличения предельной температуры резания θ и уменьшения коэффициента трения f .

Из зависимости (16) вытекает, что стойкость режущего инструмента T обусловлена температурным фактором. Чем больше предельная температура резания θ для рассматриваемого инструментального материала, тем больше T . Причем, наличие квадратичной зависимости между T и θ указывает на существенное влияние физико-механических свойств инструментального материала на стойкость режущего инструмента T . Такое же существенное влияние на T оказывает и коэффициент трения инструмента с обрабатываемым материалом f : чем меньше f , тем больше T , а соответственно и производительность обработки $Q_{эксп}$, и меньше технологическая себестоимость обработки C_{min} .

Выводы. В работе получено аналитическое решение об условиях уменьшения технологической себестоимости обработки и возможности реализации высокоскоростного резания. Показано, что скорость резания ограничена экстремумом (минимумом) себестоимости обработки. Увеличить скорость резания и реализовать условия высокоскоростной обработки можно за счет повышения стойкости режущего инструмента путем применения более прочных и износостойких инструментальных материалов и покрытий инструментов, характеризующихся низким коэффициентом трения.

Список литературы

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
3. Армарего И.Дж.А. Обработка металлов резанием / И.Дж.А. Армарего, Р.Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
4. Новиков Ф.В. Разработка

эффективных технологий механической обработки деталей машин / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов. – Х.: ХНАДУ, вып. 29, 2011. – С. 212-215. **5.** Новиков Ф.В. Определение оптимальных условий механической обработки деталей машин по критерию наименьшей себестоимости / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, Е.Ю. Бенин // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ “Приазов. держ. техн. ун-т”, 2012. – №1 (24). – 2012. – С. 241-247. **6.** Жовтобрюх В.А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / В.А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.

Bibliography (transliterated)

1. *Bobrov V.F.* Osnovy teorii rezaniya metallov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 343 P. **2.** *Granovskiy G.I., Granovskiy V.G.* Rezanie metallov: uchebник. – Moscow: Vysshaya shkola, 1985. – 304 P. **3.** *Armarego I.Dzh.A., Braun R.Kh.* Obrabotka metallov rezaniem. – Moscow: Mashinostroenie, 1977. – 325 P. **4.** *Novikov F.V., Zhovtobrukh V.A.* Razrabotka effektivnykh tekhnologiy mekhanicheskoy obrabotki detaley mashin. Avtomobil transport: sbornik nauchnykh trudov. – Kharkov.: KhNADU, vyp. 29, 2011. – P. 212-215. **5.** *Novikov F.V., Zhovtobrukh V.A., Benin E.Y.* Opredelenie optimalnykh usloviy mekhanicheskoy obrabotki detaley mashin po kriteriyu naimenshey sebestoimosti. Visnyk Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Ser.: Tekhnichni nauky: Zb. nauk. pratP. – Mariupol: DVNZ “Priazov. derzh. tekhn. un-t”, 2012. – No1 (24). – 2012. – P. 241-247. **6.** *Zhovtobrukh V.A.* Povyshenie effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki detaley gidravlicheskikh sistem putem vybora ratsionalnykh parametrov operatsiy po kriteriyu sebestoimosti: avtoref. diP. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tekhn. nauk: spetP. 05.02.08 “Tekhnologiya mashinostroeniya”. – Mariupol, 2012. – 21 P.

Поступила (received) 12.08.2021

V.*STUPNYTSKYI*, Dr. tech. Sciences, National University “Lviv Polytechnic”

FEATURE-ORIENTED PROCESS OPTIMIZATIONS

The example of structural and parametric optimization of the functionally-oriented technological process machining of mold's parts is described in the article. The most essential criteria of optimization are wearproofness, fatigue strength, contact stiffness and corrosion resistance of production. In the article the brought methodology over of researches and algorithm of optimization.

Keywords: functionally-oriented technological process, optimization, wear resistance, residual stress, contact stiffness, corrosion resistance, coefficient of friction, CAF- system

В.СТУПНИЦЬКИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА

В статье описан пример структурно-параметрической оптимизации функционально-ориентированного технологического процесса обработки деталей пресс-формы. Наиболее существенными критериями оптимизации являются износостойкость, усталостная прочность, контактная жесткость и коррозионная стойкость продукции. В статье приведена методология исследований и алгоритм оптимизации.

Ключевые слова: функционально-ориентированный технологический процесс, оптимизация, износостойкость, остаточное напряжение, контактная жесткость, коррозионная стойкость, коэффициент трения, САФ-система.

В.СТУПНИЦЬКИЙ ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ, ОРІЄНТОВАНА НА ФУНКЦІЇ

У статті наведено приклад конструктивної та параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу обробки деталей прес-форми. Найважливішими критеріями оптимізації є зносостійкість, втомна міцність, контактна жорсткість і корозійна стійкість виробництва. У статті наведено методологію досліджень та алгоритм оптимізації.

Ключові слова: функціонально-орієнтований технологічний процес, оптимізація, зносостійкість, залишкові напруження, контактна жорсткість, корозійна стійкість, коефіцієнт тертя, САФ-система

Introduction. The systems approach to technological ensure efficiency components based on the one hand, the evaluation of parts quality indicators that characterize their geometric shape, surface layer microstructure and its physical and mechanical properties (including residual) based on technological factors and other hand, the forecasting measure parts properties (wear resistance, the contact stiffness, corrosion resistance, etc.) depending on their quality. Obviously, providing only some local indicators of quality products not guarantee optimal measure properties of the product as a whole. It is therefore necessary to design functional- oriented process, based on the analysis of a set of interrelated operational measures of the product.

Manufacture of various parts of dies and molds is extremely difficult in modern engineering. This is due to their high accuracy, low roughness of the functional surfaces, significant temperature changes during operation (to 500-700°C), difficult workability of these parts material, high frequency and intensity of cyclic and alternating loads more. Particular attention to the operation of molds are ejectorP. As described in [1] statistics bounce functional parts and assemblies molds, pushing the system accounts for 25-30 % of all failures at work and breakdowns of these productP. This is due to high-frequency complex thermodynamic operating conditions ejector, cooling problems, combined with their non-rigid structure (ratio of length to diameter in the range of 15-20), the requirements of superdense mobile connection tightness, wear resistance, fatigue strength and high manufacturing quality (precision size - 5-7 ISO accuracy degree, functional surface roughness - 0.2-0.8 microns, etc.). The working surface of the mold insert with ejector form a joint that can roll over. During this period numb molten metal, forming fin on the casting surface. Therefore, the gap between the ejector and the hole in the ear performed within 0,08-0,1 mm. On the other side, this gap should be the maximum, it depends on the use of materials for inserts and ejector fabrication, casting material, temperature, pouring temperature heating molds, liquid metal flow rate, specific pressure on the walls of the working cavity and other factors [2].

In this example ejector is made from the high-alloy low-carbon steel 316L. This design element is subject to intense wear and alternating power and thermal loads during operation, which combined to cause loss of use of molds in general. Therefore, the most important measure properties ejector is wear resistance, contact stiffness, fatigue strength and corrosion resistance. The above measure properties depend strongly from parameters such as surface layer microstructure, functional surfaces microhardness (hardness of the surface layer), character and depth of the residual stress and deformation.

Measure as a working surface formed mainly at the final stage of the process manufacturing ejector comprising finish turning and smoothing diamond shapeP. It is the final stage of manufacturing ejector investigated in part in this example. Principles of functional and process -oriented indicators formation of a product intended to for given values of quality parameters of the finished part, known range of values of the original piece and given information about their transformation, technological heredity and mutual influence in the formation of functional surfaces to develop the most efficient technological process to ensure the optimal combination of product quality parameters

Main part. Consider the implementation of 2 version workflow handling most accurate cylindrical surface on finish operation.

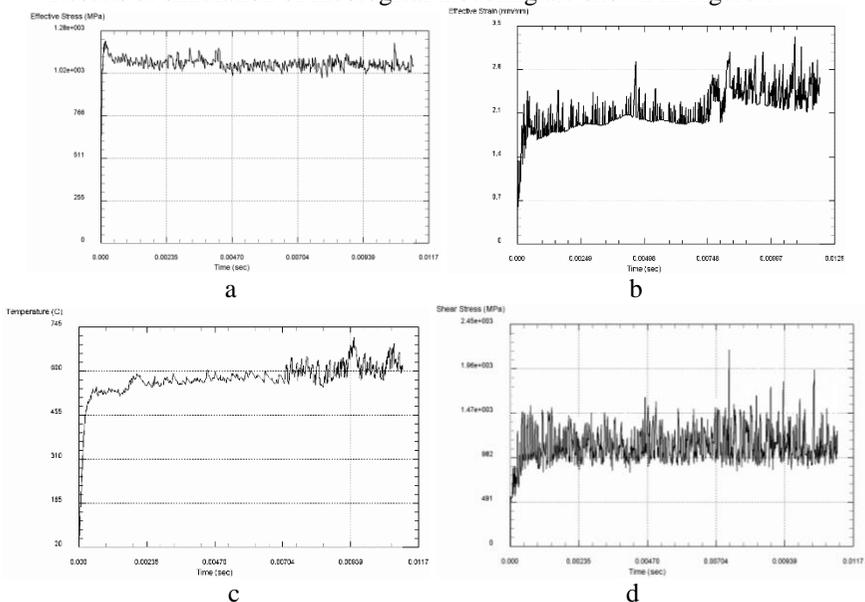
– 1-st variant. Finish grinding by the abrasive wheel.

– 2-nd variant. Fine turning tool with synthetic polycrystalline diamond - carbonado (as an example, suggested the use of PCD universal mark - CTM302 ElementSix [3]).

To determine the basic measure criteria functionally-oriented technological process mold ejector machining, it is necessary to analyze the mechanisms of formation parameters durability, fatigue strength, corrosion resistance and so on. To do this, CAF system simulation rheological model of formation of base surfaces ejector and identify indicators of stress- strain state (including residual) parameters mikrotopolohiyi surface and its structural and phase state as a result of cutting [4,5].

Featured [6] geometrical parameters for sharpening cutters with PCD $\gamma = 15-20^\circ$, $\alpha = 10-12^\circ$, $r = 0,3-0,5$ mm. Tools with circles sharpen PCD ACB 100/80-50/40 TO2 50% with the use of lubricoolant containing water as coolant soda solution. After bringing sharpening is performed by iron discs, overact diamond powder ACM 40/28-28/20. The model implemented within the system Deform-2D, use: type of modeling - Lagrangian Incremental (Lagrangian Analysis) with gradient mesh (ratio - 0.1 mm); shows the geometry of the object modeling - Plane Strain; object type modeling: workpiece - Elasto-Plastic; tool - Rigid; iterative method for solving problems - Newton-Raphson; condition of convergence calculation - Conjugate-Gradient Solver (combined gradient method); condition yield stress - Generalized Johnson & Cook Model; criterion destruction - Normalized C & L Fracture; model of structural phase machinings - Avrami model.

Results of simulation of rheological modeling are shown in Figure 1.



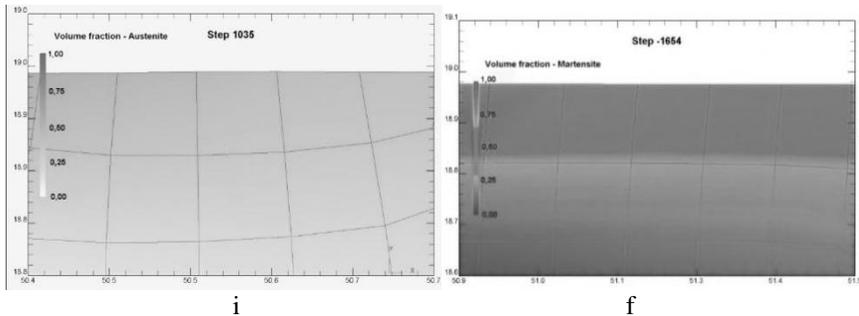


Fig.1–Results of the rheological modeling machining mold’s ejector by tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302. a - effective stress; b – effective strain; c - temperature in the cutting zone; d – shear stress; i-f - picture structure and phase state of the surface after machining.

Microprofile finish surface, which determines the value of its roughness, formed by vector addition of three components: the microscopic height derived as a result of copying the cutting wedge tool considering its kinematic characteristics of motion (Δ_1), microscopic height, which is determined by fluctuations in the elements of the cutting tool (Δ_2) and the component profile roughness caused by plastic deformation in the contact zone of tool and workpiece (Δ_3).

Geometric-kinematic component of roughness Δ_1 under the conditions: $\varphi > \arcsin(\frac{s}{2r})$ i $\varphi_1 \geq \arcsin(\frac{s}{2r})$ after transformation in Chebyshev equation [7]:

$$\Delta_1 = \frac{S^2}{8r} = \frac{0,05^2}{8 \cdot 0,5} = 0,000625 \text{ mm} = 0,625 \text{ mic} \quad (1)$$

Method of determining the microscopic of roughness height, which is determined by fluctuations elements of the cutting tool (Δ_2) is written in [8]. Moreover, the nonlinear dynamic model of self-oscillation technology system allows for regenerative mechanism of excitation of vibrations when moving the tool along the workpiece surface formed by the previous machining ($Ra_{i-1}=5$ microns). In the model the cutting force depends on the geometrical parameters of the tool and mechanical properties of orthogonal cutting:

$$\begin{cases} M\ddot{x} + K_x \dot{x} + C_x x = \tau_{xy} \cdot S_i \times \\ \times \left(b_1 + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\sin \beta \cdot \cos(\beta + \eta - \gamma)} \\ M\ddot{y} + K_y \dot{y} + C_y y = \tau_{xy} \cdot S_i \times \\ \times \left(b_1 + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\sin(\eta - \gamma)}{\sin \beta \cdot \cos(\beta + \eta - \gamma)} \end{cases} \quad (2)$$

Surface microrelief in the transverse direction is modeled by imposing an array of tool motion profile in terms of its summit, which describes an arc with radius R. In this case [9]

$$\Delta_2 = 2A_{max} - H_B = 2 \cdot 0,00027 - 0,00015 = 0,00039 \text{ мм} = 0,4 \text{ мкм} \quad (3)$$

where $A_{max} = \frac{\chi}{\sqrt{(J^p + \chi - mp^2\omega^2)^2 + \mu_{mp}^2 p^2 \omega^2}} H_6$ - maximum amplitude of

oscillation tool, determined in solving the differential equations of the tool motion; J^p - radial stiffness of the technological system, N/mm; (χ - coefficient depending on the specific machining conditions; m - reduced mass of the moving system, kg;

$\omega = \frac{\pi n}{30} = 167,5 \text{ rad}$ - cyclic frequency of the main motion;

$H_{6_{i-1}} = \frac{Ra_{i-1}}{2} = 0,0025 \text{ мм}$ - amplitude of surface irregularities resulting from implementation of previous technological machining.

It is the top of the tool in this technological machining step:

$$\begin{aligned} H_{6_i} &= R - (R - r) \cos \frac{\psi}{2} - \sqrt{r^2 - \left((R - r) \sin \frac{\psi}{2} \right)^2} = \\ &= 0,85 - (0,85 - 0,5) \cos \frac{0,143}{2} - \\ &\quad - \sqrt{0,5^2 - \left((0,85 - 0,5) \sin \frac{0,143}{2} \right)^2} = 0,00015 \text{ мм} \end{aligned} \quad (4)$$

Where central angle tips:

$$\psi = \arccos \left(1 - \frac{S^2}{2(R - r)^2} \right) = \arccos \left(1 - \frac{0,05^2}{2(0,85 - 0,5)^2} \right) = 0,143 \text{ рад} \quad (5)$$

Component profile roughness caused by plastic deformation in the contact zone of tool and workpiece Δ_3 determined from the [7] under the conditions: $\varphi > \arcsin(\frac{s}{2r})$ and $\varphi_1 \geq \arcsin(\frac{s}{2r})$:

$$\begin{aligned} \Delta_3 &= \frac{\left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}} \right) \cdot \left(2S_i + \frac{r}{2} \cdot \left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}} \right) \right)}{64} = \\ &= \frac{\left(1 - \frac{992}{\sqrt{992^2 + 1099^2}} \right) \cdot \left(2 \cdot 0,05 + \frac{0,5}{2} \cdot \left(1 - \frac{992}{\sqrt{992^2 + 1099^2}} \right) \right)}{64} = 0,0001 \text{ мм} \end{aligned}$$

where τ_{xy} - dynamic shear stress, MPa; $\bar{\sigma}$ - effective mean stress, MPa.

So, in this case the average value of the roughness derived as a result of copying the cutting wedge tool considering its kinematic characteristics of motion (Δ_1) constitute 55,5%, microscopic height, which is determined by fluctuations elements of the cutting tool (Δ_2) – 34,7% and the component profile roughness caused by plastic deformation in the contact zone of tool and workpiece (Δ_3) - 9,8%, respectively. Thus, the result $Ra = 0,625 + 0,39 + 0,13 = 1,125 \text{ mic}$ corresponding specifications drawings (set $Ra = 1,25 \text{ mic}$).

In Fig.2 is shown the picture of residual stresses rheological modeling as a result of finishing lathe machining mold's ejector tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302. These stresses exponential decrease as a result of thermodynamic relaxation with increasing distance from the top of the cutting wedge along the machined surface. The depth of plastic deformation is based on solving of the Prandtl problem [7].

The curve of residual stresses I type (Fig.2) shows an interference pattern manifestation fluktatsiynyh stretching (temperature and friction) and compressive (force) loadP. Average values the of residual stresses in the zone of thermal stabilization (at about 100°C) will be approximately 170 MPa for machining the workpiece ejector manufactured from steel 316L by tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302.

Steel 316L has high viscosity due to the low carbon content. In the annealed steel contains about 12% soluble carbide M6P. Hardening steel in oil at a temperature of 1050 - 1100°C dissolved in austenite is about 7 % of carbides, enriching it with carbon, tungsten and chromium.

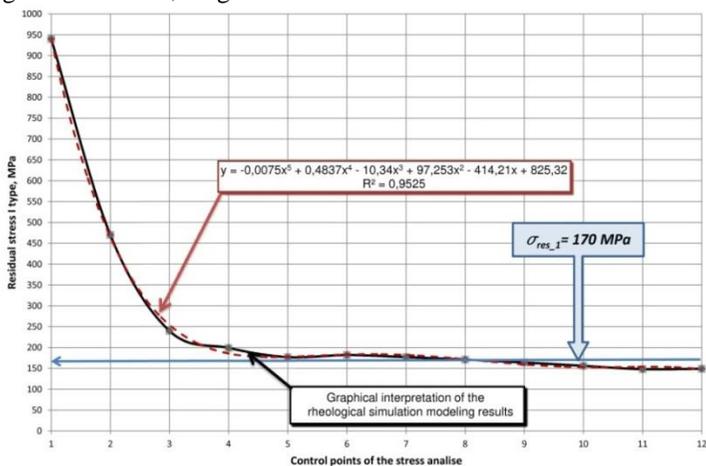


Fig.2 – Graphical dependence of residual stresses I type, resulting in rheological modeling technology finishing lathe mold's ejector machining by tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302

After quenching structure consists of alloyed martensite, 5% excess carbides and a small amount of residual austenite, HRC 48-50. After tempering at 600 - 620°C structure consists of troostyta and 5% excess carbides, HRC 38-44. Carbide M6S coagulates only at temperatures above 600°C that provides high red hardness and heat resistance. Thus, if the machining of hardened steel 316L parts a martensitic structure in the surface layer, there will be a of martensite-austenite or martensite-troostite structure, then treated will create conditions of residual tensile stress since $1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} > 0$.

Structural volume austenitic phase ζ_A was determined from the joint modeling of thermal fields and structural phase machinings using the Avrami equation [10]:

$$\zeta_A = 1 - \exp\{-k \cdot \tau^n\} \quad (6)$$

where ζ_A - volume fraction of austenite phase formed by machining; k and n - kinetic parameters calculation which takes place from the kinetic diagrams of austenite decomposition [11]; τ - cutting time.

Thus, the modeled stress-strain and thermodynamic state of the cutting area and with empirical coefficients $\psi_1, \psi_2, \psi_{31}, \psi_{32}, \psi_4$ [12], you can make a simulation of residual stresses II type in the environment Deform HT 2. We can use the coefficients in Maggie equation:

$$\zeta_M = 1 - \exp\{0,025T - 0,002315\sigma_m - 0,003314\bar{\sigma} - 5,35\} \quad (7)$$

Average values of density ρ_Σ formed by the impact force and thermodynamic factors finish cutting of the polyphase structure is equivalent density ρ_i different phases according to their percentage ζ_i . That is:

$$\sigma_\phi(l) = E_M \left(1 - \frac{\rho_M \cdot \zeta_M(l) + \rho_{II} \cdot [1 - \zeta_M(l)]}{\rho_{II}} \right) \quad (8)$$

where $\sigma_\phi(l)$ - the value of residual stress II type of depth l (mic) of their occurrence on the treated surface; $E_M = 224$ - Young's modulus of 314L steel, GPa

According to the results of rheological analysis (Fig.1) on the workpiece surface the volume phase is $\zeta_M = 0,45 \dots 0,47$ (45-47%), denying the formation of "white layer". According to the calculations (12) $\zeta_M = 0,395$ (39,5%):

$$\zeta_M = 1 - \exp\{0,025 \cdot 330 - 0,002315 \cdot 620 - 0,003314 \cdot 594 - 5,35\} = 0,395$$

The error of simulation and design value does not exceed in this case 12,5%, which is quite receptive to confirm the adequacy of modeling.

Thus, the value of residual stress II type is just $\sigma_{r_2} \approx 5,5$ MPa. This is primarily due to the low temperature in the cutting zone, which does not contribute

to the phase transformation and, consequently, does not produce significant II type residual stresses.

Degree label can be calculated by the prof. Silin empirical equation [13]:

$$N = 40h_3T^{-0,72} = 40 \cdot 0,12 \cdot 580^{-0,72} = 0,049 \quad (9)$$

where $h_3 = 0.12$ mm - depth of the strain hardening, determined by the results of rheological modeling of technological machining, mm (Fig.1); $T = 580^\circ\text{C}$ - the temperature in the cutting zone when working tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 ($S = 0,05$ mm; $t = 0,12$ mm; $V = 50,2$ m/min).

The value of the degree of work hardening in the case of the finishing lathe machining ejector by tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 not relatively large, because depth of cut is small ($t = 0,12$ mm) and temperature in the cutting area is relatively low ($T \approx 580^\circ\text{C}$). According to experimental results [13] for grinding stainless steel 316L importance degree deformation is $N = 0,5...0,6$ which having a significant negative impact on the operating conditions of molds partP.

According defined in [14] algorithm structural and parametric optimization of functionally -oriented process ejector machining, should be implemented step of calculating local criteria - the wear of functional surfaces in terms of the potential operation of the product, depending on the variable structure parameters and functional- oriented process of forming most loaded surfaces of the product. It is important to formulate the initial conditions for the subsequent calculation: A fully conjugated wear two bodies in a stationary (steady) mode of dry friction or boundary; subject to wear ejector mold: the body - hard and rough; coupled guide bushing is taken as smooth and deformed counterbody; rated pressure, speed and temperature sliding friction constant in time and uniformly distributed over the contact surface.

Table. 1– Comparative table of analytical and experimental studies results of finish machining mold’s ejector

		The results of analytical studies in the system Deform2D	Of average results of experimental and industrial research ("Interterm Ltd")	
Parameters		Finishing lathe cutting tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 (machining rates: $S = 0,05$ mm; $t = 0,12$ mm; $V = 50,2$ m/min)	DIA diamond grinding around 125/100 M5-2 (machining rates $V_c = 31$ m/s, $t = 0,01$ mm, $S_n = 6$ m/min)	
file finis h	Ra, mic	1,125	1,29	1,22

	$\Delta_1, \text{ mic}$	0,625	-	
	$\Delta_2, \text{ mic}$	0,39		
	$\Delta_3, \text{ mic}$	0,13		
	Rpk, mic	0,30	0,28	0,43
	Rk, mic	0,75	0,84	0,61
	Rvk, mic	0,12	0,17	0,18
	Rmax	-	2,0	2,2
	r	-	35	20
	b	-	2,0	1,29
	v	-	1,7	1,9
	$\Delta = \frac{R \max}{rb} \%$	-	0,024	0,096
Residual stress	$\pm\sigma_{r-1}, \text{ MPa}$	+170	-	

Mark "+" implies on the treated surface of the workpiece residual stresses of compression, and the mark "-" - tensile residual stresses

Sequel tabl. 1

	$\pm\sigma_{r_2}$, MPa	-5		
	$\pm\sigma_{r_\Sigma}$, MPa	+165	+143	-130
Residual deformation	Depth of hardening h_3 , mm	0,12	-	-
	Level of hardening, N	0,049	0,06	0,5

In terms of elastic contact intensity of wear depends on the topology mikroheometrychnykh conjugate surfaces (b , v , Rvk , Rpk , Rk , $Rmax$, tm), mechanical properties (σ_T , σ_B , $\sigma_{0,2}$, E , μ), coefficient of friction f , fatigue characteristics and pressures t : nominal - Pa and contour - Pc.

λ - Coefficient taking into account the influence of surface residual stresses on wear intensity (provided that the limit of fatigue strength for steel 316L - $\sigma_B=1530$ MPa; $t_y=3$ - coefficient of friction fatigue in elastic contact surfaces is given:

- for turning

-

$$\lambda_1 = \left(\frac{1530 - 143}{1530} \right)^3 = 0,75 \quad (10)$$

- for grinding

-

$$\lambda_2 = \left(\frac{1530 - (-130)}{1530} \right)^3 = 1,27 \quad (11)$$

The intensity of wear on the product under given conditions of operation in the case of the second option and process of manufacturing this product, we can write [15]

$$I_{hi} = \frac{0,6(1 - \mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_i}{\sqrt{V_i} (V_i^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \quad (12)$$

Then a relative measure of durability $K(I_h)$, that characterizes the change in the wear rate depending on the state of functional surfaces arising from the implementation of different variants of structures and process parameters is given by:

$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\left[\frac{0,6(1-\mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_1}{\sqrt{v_1}(v_1^2-1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \right]}{\left[\frac{0,6(1-\mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_2}{\sqrt{v_2}(v_2^2-1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \right]} = \frac{\sqrt{v_2}(v_2^2-1) \cdot \lambda_1}{\sqrt{v_1}(v_1^2-1) \cdot \lambda_2} \quad (13)$$

where v_i - parameter curve fitting step.

Comparing finishing lathe machining ejector by the tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 (cutting conditions: $S = 0,05$ mm; $t = 0,12$ mm; $V = 50,2$ m/min) and its grinding by the diamond wheels DIA 125/100 M5-2 (cutting conditions $V_c = 31$ m/sec, $t = 0,01$ mm, $S_n = 6$ m/min), we obtain a relative measure of durability $K(I_h)$:

$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\sqrt{1,9}(1,9^2-1) \cdot 0,75}{\sqrt{1,7}(1,7^2-1) \cdot 1,27} = 0,86$$

That is, as a result of changes in the structure of the process of finishing machining ejector wear functional surface increases about 14% due to changes in the prevailing surface microstructure and changes in the nature and nominal values of residual stress P .

Among the important measure factors of the ejector should be noted relative measure of fatigue strength. As stated in [14], the overall impact to the safety factor in fatigue strength with a number of design and technological factors: effective stress concentration factor (n_{eK}); coefficient of influence of geometrical dimensions of the parts (n_{eD}); influence of surface hardening coefficient (n_{eV}); coefficient of influence of surface roughness (n_{eR}) and coefficient of influence of residual deformations resulting from machining parts (n_{eZ}). Moreover, only the last 2 figures depend on the quality of the surface layer of formation which is a consequence of the structure and parameters of the process of its machining.

Factor influence surface roughness functional ejector if it is a finishing lathe cutting tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 can be defined by the Stepnov equation [16]

$$n_{eR_{-1}} = 1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left(\lg \left(\frac{\sigma_e}{20} \right) - 1 \right) = 1 - 0,22 \cdot \lg 2,0 \cdot \left(\lg \left(\frac{1530}{20} \right) - 1 \right) = 0,94$$

Similarly, this coefficient for the case of grinding ejector is:

$$n_{eR_{-2}} = 1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left(\lg \left(\frac{\sigma_e}{20} \right) - 1 \right) = 1 - 0,22 \cdot \lg 2,2 \cdot \left(\lg \left(\frac{1530}{20} \right) - 1 \right) = 0,93$$

Factor influence functional surface residual stress n_{eZ} in case of the finishing by lathe cutting tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 is determined by the interference dominance residual stresses first and second type for compression $\sigma_{el}^+, \sigma_{eII}^+$ and tension $\sigma_{el}^-, \sigma_{eII}^-$

$$n_{eZ_{-1}} = \frac{\sigma_{-1} + (\sigma_{el}^+ + \sigma_{eII}^+)}{\sigma_{-1}} = \frac{780 + 143}{780} = 1,18$$

where $\sigma_{-1} = 780$ MPa - tensile strength of the material when tested in tension-compression cycle for outzero load, which is typical for ejector working [17].

When grinding ejector mold by the around diamond DIA 125/100 M5-2:

$$n_{eZ_{-2}} = \frac{\sigma_{-1} - (\sigma_{el}^- + \sigma_{eII}^-)}{\sigma_{-1}} = \frac{780 - 130}{780} = 0,83$$

The other coefficients do not depend on the quality of the surface layer and therefore will not be important for structural and parametric optimization process machining ejector for functionally-oriented criteria.

Then a relative measure of fatigue strength $K(n_{-1})$, which characterizes the change in fatigue strength safety factor depending on the state of functional surfaces arising from the implementation of different variants of structures and process parameters is given by:

$$K(n_{-1}) = \frac{n_{-1_{-1}}}{n_{-1_{-2}}} = \frac{n_{BR_{-1}} \cdot n_{eZ_{-1}}}{n_{BR_{-2}} \cdot n_{eZ_{-2}}} = \frac{0,94 \cdot 1,18}{0,93 \cdot 0,83} = 1,43 \quad (14)$$

That is, as a result of changes in the structure of the process of finishing machining ejector surface functional fatigue strength increases about 43% due to

changes in the prevailing surface microstructure and changes in the nature and nominal values of residual stresses.

Measure of corrosion resistance in a volume equivalent τ_m determined taking into account the fact that the decrease in mass per unit area to be permissible value $\Delta m = (Rp k_{ekv} + Rk_{ekv}) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)$. In this case, approximate interaction of rough surfaces in the form of a spherical contact surface and a planar plastic half-space by the Ishlinsky method [18]. Then a relative measure of the speed of fretting corrosion $K(\tau)$ is given as:

$$K(\tau) = \frac{\tau_{m_1}}{\tau_{m_2}} = \frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = \frac{(Rp k_1 + Rk_1) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)}{(Rp k_2 + Rk_2) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)} = \quad (15)$$

$$= \frac{(Rp k_1 + Rk_1)}{(Rp k_2 + Rk_2)} = \frac{0,28 + 0,84}{0,43 + 0,61} = 1,07$$

That is, as a result of changes in the structure of the process of finishing machining ejector intensity fretting corrosion-functional surface increases about 7% due to changes in the prevailing surface.

As one of the most important criteria of efficiency of mobile connections is adherence to fluid friction between surfaces conjugated components by providing a minimum thickness of liquid friction in the contact zone, relative rate coefficient of reliability of mechanical systems in liquid contact mode $K(S)$ is given:

$$K(S) = \frac{h_{\min_1}}{h_{\min_2}} = \frac{k_s \cdot Rv k_1}{k_s \cdot Rv k_2} = \frac{Rv k_1}{Rv k_2} = \frac{0,17}{0,18} = 0,94 \quad (16)$$

Tribological quality conjugations by the energy losses due to friction in the conjugate surfaces of machine part. The relative index $K(f)$, that characterizes the change from the coefficient of friction in the conjugated tribological pair depending on the state of functional surfaces arising from the implementation of different variants of structures and process parameters is given:

$$K(f) = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{\frac{R \max_1}{rb_1^{1/\nu_1}}}}{\sqrt{\frac{R \max_1}{rb_1^{1/\nu_1}}}} = \sqrt{\frac{\Delta_1}{\Delta_2}} = \sqrt{\frac{0,024}{0,096}} = 0,5 \quad (17)$$

Calculation non-standardize local criteria optimization qualimetric indicators for finishing lathe machining functional surface ejector by the tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 for this example is in relative terms durability $Q_1 = 0,28$; safety factor for fatigue strength $Q_2 = 0,30$; the parameter tribotechnical as conjugations $Q_3 = 0,10$; parameter for corrosion resistance $Q_4 = -0,14$; safety factor for liquid contact $Q_5 = -0,17$. Finally, a generic optimization criterion, determined by the method [14] is $F_1 = 0,383$. As in this example compared only 2 options of technological processes, generalized optimization criterion for the case of functional surface grinding ejector around diamond DIA 125/100 M5-2, the amount accordingly $F_2 = -0,383$.

Conclusion. Thus, the variant of finishing lathe machining functional surface mold's ejector by the tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 compared to grinding diamond wheels DIA 125/100 M5-2 is more optimal for qualimetric integral indicator system characterizes wear resistance, fatigue strength, quality of the tribotechnical conjugations, corrosion resistance and ensure the option of carrying capacity lubricant layer and is obtained as a result of the formation process of forming microstructure surface layer, residual stresses and strainP.

Список літератури

1. Maus W. Simulation as tool in high-pressure die casting processes / W. Maus H.Rockmair, Seefeldt.R. // *MAGMA*, 2002. – 23 p.
2. Палей М.М. Технология производства приспособлений пресс-форм и штампов / М.М.Палей // – М.: Машиностроение, 1979. – 293 с.
3. Smith G. Cutting Tool Technology: Industrial Handbook. / Smith G. // London: Springer-Verlag London Limited, 2008. – 559 p.
4. Stupnytskyy Vadym. New features CAD/CAM/CAE systems in mechanical engineering / V. Stupnytskyy// *Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. Stuttgart, Germany. 2012. – № 1. – P.327–329.*
5. Stupnytskyy Vadym. Planning features of function-oriented technology engineering production / V.Stupnytskyy // «Scientific Potential». Elkraft, Indiana, USA – 2013.– Vol. 1.– Issue 1.– P.60–64.
6. Борисов А.А. Производство и эксплуатация современного режущего инструмента. / А.А.Борисов, Г.В.Боровский, В.А.Вычеров, В.А. Гречишников, Е.А.Негинский // М.: Издательство "ИТО", 2011.– 104 с.
7. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / Суслов А.Г. // М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
8. Ступницький В.В. Математичне моделювання автоколивань різального інструменту та їхній вплив на інженерію поверхні / В.В.Ступницький, Я.М. Новіцький // *Машинознавство*, 2013.– №1–2 (187–188). – С.19–22.
9. Марецька В.В. К вопросу автоматизации направленного формирования показателей качества деталей / В.В.Марецька // *Вестник компьютерных и информационных технологий*,– 2008. – № 3.– С. 29 – 34.
10. Ramesh A. White Layer Formation in Machining of Hardened Steel: Experiments and Modeling / A.Ramesh, P.N.Melkote // *Dojo on High Speed Machining of Hard/Super Hard Materials, JSME, Singapore, 2003.– P.16–29.*
11. Sheng I. Modeling Welding by Surface Healing / I.Sheng, Y.Chen // *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.114.– 1992.– P.439–448.
12. Han P. Mechanism and Modeling of White Layer Formation in Orthogonal Machining of Steels / P.Han // *Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2006.– 213p.*
13. Силян С.С. Применение метода подобия для определения обрабатываемости резанием современных материалов / С.С.Силян // *Труды Рыбинского авиационного технолог. ин-та: Новые методы определения обрабатываемости материалов резанием и шлифованием. Ярославль, 1975.– с. 5–33.*
14. Ступницький В.В. Структурно-параметрична оптимізація технологічних процесів при забезпеченні експлуатаційних властивостей деталей / В.В.Ступницький // *Східно-Європейський журнал передових технологій, Харків.– 2014.– №2/3(68).– с.9–16.*
15. Крагельський І.В. Основи расчета на трение и знос / И.В.Крагельский,

М.Н.Добычин, В.С.Комбалов // М.: «Машиностроение», 1977. – 526 с. 16. Степнов М.Н. Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций / Степнов М.Н. // М.: МАТИ, 2003.– 119 с. 17. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С.Писаренко, А.П.Яковлев, В.В.Матвеев // Киев: Наукова думка, 1988.– 736 с. 18. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Демкин Н.Б., Рьжов Э.В. // М.: Машиностроение, 1981.– 224 с.

Bibliography (transliterated)

1. Maus, W., Rockmair, H. and Seefeldt, R. *Simulation as tool in high-pressure die casting processes*. Bremen: MAGMA, 2002. Print.
2. Paley, M.M. *Tekhnologiya proizvodstva prispobleny press-form i shtampov*. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1979. Print.
3. Smith, G. *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook*. London: Springer-Verlag, 2008. Print.
4. Stupnytskyy, V. "New features CAD/CAM/CAE systems in mechanical engineering". Stuttgart: Europäische Fachhochschule, Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. 2012. No 1. 327–329. Print.
5. Stupnytskyy, V. "Planning features of function-oriented technology engineering production". Elkraft: Scientific Potential. USA. 2013. Vol. 1. No 1. 60–64. Print.
6. Borisov, A.A., Borovsky, G.V., Vyshero V.A., Grechishnikov V.A., Neginsky Y.A. *Proizvodstvo i ekspluatatsiya sovremennogo rezhushchego instrumenta*. Moscow: ITO, 2011. Print.
7. Suslov, A.G. *Inzheneriya poverkhnosti detaley*. Moscow: Mashinostroyeniye, 2008. Print.
8. Stupnitsky, V.V. and Novitsky, Y.M. "Matematichne modelyuvannya avtokolivan rizalnogo instrumentu ta yikhniy vpliv na inzheneriyu poverkhni". Lviv: Mashinoznavstvo, 2013. No1–2. (187–188). Print.
9. Maretskaya, V.V. "K voprosu avtomatizatsii napravlenno formirovaniya pokazately kachestva detaley". Moscow: Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh technology. 2008. No3. 29–34. Print.
10. Ramesh, A. and Melkote, P. "White Layer Formation in Machining of Hardened Steel: Experiments and Modeling". Singapore: Dojyo on High Speed Machining of Hard/Super Hard Materials, JSME. 2003. 16–29. Print.
11. Sheng, I. and Chen, Y. "Modeling Welding by Surface Healing". London: Journal of Engineering Materials and Technology, No.114. 1992. 439–448. Print.
12. Han P. *Mechanism and Modeling of White Layer Formation in Orthogonal Machining of Steels*. Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology. 2006. Print.
13. Silin, P.P. "Primeneniye metoda podobiya dlya opredeleniya obrabatyvayemosti rezaniyem sovremennykh materialov". Yaroslavl: Trudy Rybinskogo aviatsionnogo tekhnologicheskogo instituta. Novye metody opredeleniya obrabatyvayemosti materialov rezaniyem i shlifovaniyem. 1975. 5–33. Print.
14. Stupnitsky, V.V. "Strukturno-parametrichna optimizatsiya tekhnologichnykh protsesiv pri zabezpechni ekspluatatsiynikh vlastivostey detaley". Kharkiv: Skhidno-Evropeysky zhurnal передових technology. 2014. No 2/3(68). 9–16. Print.
15. Kragelsky, I.V., Dobychin, M.N. and Komalov, V.P. *Osnovy rascheta na treniye i znos* Moscow: Mashinostroyeniye, 1977. Print.
16. Stepnov M.N. *Raschetnye metody otsenki kharakteristik soprotivleniya ustalosti materialov i elementov konstruktsey* Moscow: MATI, 2003. Print.
17. Pisarenko, G.P. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov*. Kiev: Naukova dumka, 1988. Print.
18. Demkin, N.B., Ryzhov, E.V. *Kachestvo poverkhnosti i kontakt detaley mashin*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. Print.

Received 20.09.2021

О.Л. КОНДРАТЮК, канд. техн. наук., доц. УПА, Харків;
А.О. СКОРКИН, асистент УПА, Харків

РОЗРОБКА ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР ЗБОРКИ СКЛАДНИХ МАШИНОБУДІВНИХ ВИРОБІВ

Велику питому вагу в загальному об'ємі складальних операцій займають операції по зборці типових з'єднань, що характеризуються високим рівнем монотонності праці, повторюваності робочих рухів, а також які не вимагають високої кваліфікації працівника. Виходячи з цього в даній роботі розглянуті принципи розробки організаційно-технологічних структур системи дрібносерійної зборки складних машинобудівних виробів на основі комплексного аналізу існуючих методів розробки структур збирання для дрібносерійного збирання. Зроблені висновки, щодо вибору раціональних структур зборки для конкретних умов та виду машинобудівних виробів

Ключові слова: технологічний процес складання, складальна одиниця, точність, робоче місце.

О.Л. КОНДРАТЮК, А.А. СКОРКИН РАЗРАБОТКА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР СБОРКИ СОСТАВНЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Большой удельный вес в общем объеме сборочных операций занимают операции по сборке типовых соединений, характеризующиеся высоким уровнем монотонности труда, повторяемости рабочих движений, а также не требующие высокой квалификации работника. Исходя из этого, в данной работе рассмотрены принципы разработки организационно-технологических структур системы мелкосерийной сборки сложных машиностроительных изделий на основе комплексного анализа существующих методов разработки структур сборки для мелкосерийной сборки. Сделаны выводы о выборе рациональных структур сборки для конкретных условий и вида машиностроительных изделий

Ключевые слова: технологический процесс сборки, сборочная единица, точность, рабочее место.

O.L. KONDRATYUK, A.O. SKORKIN DEVELOPMENT OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL STRUCTURES OF ASSEMBLY OF COMPLEX MACHINE-BUILDING PRODUCTS

A large share in the total volume of assembly operations is occupied by operations for the assembly of standard joints, characterized by a high level of monotony of labor, repetitive labor movements, as well as those that do not require high skills of the employee. Based on this, this paper considers the principles of development of organizational and technological structures of the system of small-scale assembly of complex machine-building products based on a comprehensive analysis of existing methods of developing assembly structures for small-scale assembly. Conclusions are made on the choice of rational assembly structures for specific conditions and types of machine-building products

Key words: technological process of assembly, assembly unit, accuracy, workplace.

Вступ. Продуктивність праці в складальному виробництві залежить від ряду суб'єктивних чинників і її рівень має тенденцію періодичної зміни.

© О.Л. Кондратюк, А.О. Скоркін, 2021

Відповідно до цього потрібна корекція виробничих завдань і розробка організаційно-технічних заходів для забезпечення необхідної тривалості, що до випуску продукції.

Постановка задачі: Технологічний процес складання містить дії з установки і утворення з'єднань деталей, складальних одиниць у виріб. При цьому враховується доцільна техніко-економічна послідовність отримання виробу (рис. 1).



Рис. 1 – Інформаційна схема технологічної операції складання виробу

Якість складальної одиниці характеризується точністю відносного руху або розташування деталей в складальній одиниці, силовим замиканням, натягом в нерухомих з'єднаннях, проміжком в рухливих з'єднаннях, якістю прилягання поверхонь і іншими.

Основний зміст: Під складальною операцією розуміється процес безпосереднього формування складальної одиниці. Він, як правило, включає орієнтацію, з'єднання, регулювання і закріплення (фіксацію) деталей і складальних одиниць. Складання з'єднань умовно можна розділити на зборку з натягом і без натягу.

Зборка з натягом здійснюється або методом пластичної деформації, або тепловим методом. У свою чергу, тепловий метод реалізується за допомогою нагріву деталі, що охоплює, або охолодженням охоплюваної деталі.

Інформаційний зміст технології, залежно від участі технологічно значимих чинників, можна розділити на рівні:

Постійні чинники:

- специфіка операції - набір типових методик складання (джерело інформації - карта інструкції);
- організація робочого місця (джерело інформації - технологія, планування робочого місця);
- основне устаткування - конфігурація, габаритні розміри, розташування робочої зони, методика управління устаткуванням (зміна режимів роботи), специфіка зміни встановлюваного на нім оснащення, розташування органів

управління і їх параметри (джерело інформації - технічна документація (паспорт, експлуатаційна інструкція і таке інше);

Умовно постійні чинники:

- пристосування - маса, конфігурація, габаритні розміри, способи його установки, кріплення, технологічні базові поверхні (елементи), елементи кріплення (джерело інформації - технічна документація (паспорт, експлуатаційна інструкція пристосування і таке інше);
- основний і допоміжний інструмент - маса, конфігурація, габаритні розміри, спосіб установки, функціональне призначення, методика використання (джерело інформації - технічна література, документація);
- засоби вимірювання - маса, конфігурація, габаритні розміри, функціональне призначення, методика використання (джерело інформації : паспорт, технічна література, документація);

Змінні чинники:

- стани "деталь – комплект – підвузол – вузол - виріб" - параметри деталей, що з'єднуються: маса, конфігурація, габаритні розміри; параметри базових і кріпильних поверхонь (джерело інформації - технологічний процес, складальні креслення, креслення деталей, технічні вимоги);
- - положення основного інструменту відносно поверхонь і деталей, що з'єднуються (джерело інформації - технологічний процес, робоча програма).

Таким чином, можна вважати, що будь-який елементарний складальний технологічний процес, в контексті реалізації внутрішньо операційної технології, своєю появою зобов'язаний збігу певних обставин технологічного, організаційного, технічного й ергономічного характеру. Тому представляється доцільним ввести ієрархічне розбиття множини властивостей об'єктів робочого місця на базові фізичні, геометричні характеристики і технічні, технологічні властивості.

При цьому, технологічний процес, як ініціатор виділення технічних властивостей, вносить логіку в взаємодію об'єктів робочого середовища через комбінації відповідних характеристик, які, у свою чергу, залежать від значимих, в тому або іншому ступені, чинників складального процесу.

Рівень побудови структури роботи з урахуванням принципової можливості реалізації руху в певному напрямі, де враховується величина протидії виконавчим одиницям (м'язам) діючих (силових) і статичних навантажень (маси, показників міцності). Параметри, що задовольняють можливості реалізації руху і здатність навантаження конструкцій предметів при маніпуляціях з ними (показники міцності) можна виразити таким чином (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{\text{move}} \times \kappa_T > F_{\text{reac}}, \\ m_o < m_{\text{max}}, \\ F_{\text{static}} < \frac{\sigma_{\text{max}} \times S_{\text{travers}}}{n}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де: F_{move} – сила, що забезпечує рух, Н;

k_T – коефіцієнт тертя;

F_{reac} – реакція поверхні, Н;

m_o – маса об'єкту, кг;

m_{max} – маса, що максимально допустима для підйому, кг;

F_{static} – статичне зусилля, що розвивається при маніпуляціях з предметом, Н;

σ_{max} – гранична допустима напруга матеріалу конструкції предмета (при стискуванні, розтягуванні), Н/мм²;

$S_{travers}$ – площа поперечного перерізу предмета, мм²;

n – коефіцієнт запасу міцності.

2. Рівень побудови процесу з урахуванням особливостей фізичних характеристик вузлів, деталей та їхніх поверхонь. Наявність поверхні, стабільність її динамічних характеристик (швидкість і спрямованість руху), величина притуплення (радіус кривизни : 1 .0,1 мм - «притуплена», < 0,1 мм - гостра кромка) температура (> 51⁰ С - дуже гаряча, 51⁰ ÷ 41⁰ С - гаряча, 34⁰ ÷ 30⁰ С нормальна, < 10⁰ С холодна і таке інше).

3. На рівні пристосування виконавця до робочого простору в ході виконання основних і допоміжних переходів, мають значення характеристики опорних, настановних поверхонь: лінійна величина поверхні - протяжність, мм; кут її нахилу по відношенню до сусідньої – ухилу, град.; чи представляє вона виступ (западину), мм; показник площинної (радіус кривизни : >1000 мм - «плоска», 1000.50 мм - «крива», 50.1 мм - «скруглення»), показники шорсткості поверхні, вібрації і таке інше.

4. Рівень дистанційного орієнтування в системі розташування поверхонь, що переміщуються і стаціонарних об'єктів робочого місця в просторових коридорів, способи розміщення елементарних поверхонь (координати об'єктів всередині робочого місця, в робочій зоні, розташування орієнтуючих елементів) і відстані між ними.

5. На рівні технічної взаємодії об'єктів необхідно визначити відповідні властивості предметів складального процесу - властивості, що визначають можливість взаємодії, суб'єкта і предметів складальної операції, суб'єкта і інструментів при зміні стану технічних підсистем. Інструмент, предмет або інша технічна підсистема на робочому місці надає інформацію до інформаційної і функціональної моделі, пов'язаної з елементами процесу складання в такій послідовності (рис. 2).

6. Для умов реалізації технологічного процесу складання в технологічних зонах (зонах зберігання деталей, технологічного оснащення і інструментів, установки; базування, закріплення, транспортування виробу і таке інше) - мають значення властивості, що визначають способи взаємодії технічних підсистем.

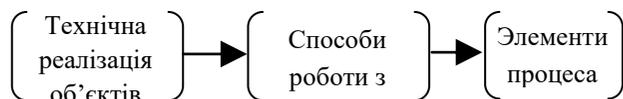


Рис. 2 – Схема відповідності технічних властивостей елементам процесу

Для вирішення кожного, з перелічених вище, завдань використовуються способи, засновані на технічній реалізації цих об'єктів.

Висновки. Запропоновані нові принципи проектування організаційно-технологічної структури системи дрібносерійної зборки складних машинобудівних виробів, пов'язані із застосуванням багаторівневого підходу до моделювання процесу складання на засадах логіко-лінвістичного опису моделі її елементів.

Список літератури

1. Андрущенко В.А. Следящие системы автоматизированного сборочного оборудования. / В. А. Андрущенко// Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. - 246 с. 2. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения / Б.М. Базров // Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2005. - 736 с. 3. Балабанов А.Н. Краткий справочник технолога-машиностроителя. / А.Н. Балабанов // - М.: Изд-во стандартов, 1992. - 464 с. 4. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. / Б.С. Балакшин // М.: Машиностроение, 1982. - 367 с. 5. Вартанов М.В. Обеспечение технологичности конструкции изделий при их многоуровневом преобразовании в структуру процесса автоматизированной сборки / М.В. Вартанов //Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специям: 05.02.08 – технология машиностроения, 05.13.06 – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям). Москва, - 2005. – 419с.

Bibliography (transliterated)

1. Andriushenko V.A. *Sledjashhie sistemy avtomatizirovannogo sborocznego oborudovanija*. Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. ot-d-nie, 1979. - 246 P. 2. Bazrov B.M. *Osnovy tehnologii mashinostroenija. Uchebnik dlja vuzov*. Moscow: Mashinostroenie, 2005. - 736 P. 3. Balabanov A.N. *Kratkij spravocznik tehnologa-mashinostroitelja*. - Moscow: Izd-vo standartov, 1992. - 464 P. 4. Balakshin B.P. *Teoriija i praktika tehnologii mashinostroenija*. Moscow: Mashinostroenie, 1982. - 367 P. 5. Vartanov M.V. *Obespechenie tehnologichnosti konstrukcii izdelij pri ih mnogourovnevom preobrazovanii v strukturu processa avtomatizirovannoj sborki*. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk po specistjam: 05.02.08 – tehnologija mashinostroenija, 05.13.06 – avtomatizacija i upravlenie tehnologicheskimi processami i proizvodstvami (po otrasljam). Moscow, - 2005. – 419P.

Поступила (received) 04.08.2021

А. А. КЛОЧКО, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»

МНОГОШПИНДЕЛЬНАЯ СХЕМА СКОРОСТНОЙ ЗУБООБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННЫХ КОЛЕС

Для чистовой зубообработки колес крупного модуля предложен метод прерывистого обката с использованием дисковых немодульных фрез (размеры фрезы не зависят от модуля), оснащенных керамическими пластинками и специальных фрезерных суппортов с одношпиндельной и двухшпиндельной схемой резания с учетом обеспечения всех основных установочных движений скоростных немодульных дисковых фрез. Метод прерывистого обката используется на зубострогальных и зубошлифовальных станках и обладает тем преимуществом, что в момент рабочего хода инструмента заготовка колеса неподвижна или совершает незначительный поворот, т.е. обработка протекает, по сравнению с методом обкатки с обеспечением наибольшей контактной жесткости инструмента и определяет способность поверхностных слоев зубчатых колес, находящихся в контакте с режущей кромкой инструмента, обеспечивать процесс резания.

Ключевые слова: зубообработка, схемы резания, закаленные крупномодульные зубчатые колеса, одношпиндельные и двухшпиндельные супорта

О. О. КЛОЧКО

БАГАТОШПИНДЕЛЬНА СХЕМА швидкісної зубобробки загартованих коліс

Для чистової зубообробки коліс великого модуля запропонований метод переривчастого обкату з використанням дискових немодульних фрез (розміри фрези не залежать від модуля), оснащених керамічними пластинками і спеціальних фрезерних супортів з одношпіндельною і двошпіндельною схемою різання. Метод переривчастого обкату використовується на зубострогальних і зубошліфувальних верстатах і має ту перевагу, що в момент робочого ходу інструменту заготівля колеса нерухома або незначний поворот, тобто, обробка протікає, порівняно з методом обкатки із забезпеченням найбільшої контактної жорсткості інструменту та визначає здатність поверхневих шарів зубчастих коліс, що знаходяться в контакті з ріжучою кромкою інструменту, забезпечувати процес різання.

Ключові слова: зубообробка, схеми різання, загартовані крупномодульні зубчасті колеса, одношпіндельні та двошпіндельні супорти

A. A. KLOCHKO

MULTI-SPINDLE SCHEME FOR HIGH-SPEED GEARWORKING OF HARDENED WHEELS

For finishing gear cutting of wheels of a large module, a method of intermittent rolling is proposed using non-modular disk cutters (the dimensions of the cutter do not depend on the module), equipped with ceramic plates and special milling calipers with a single-spindle and two-spindle cutting scheme, taking into account the provision of all basic installation movements of high-speed non-modular disk cutters. The intermittent rolling method is used on gear cutting and gear grinding machines and has the advantage that during the working stroke of the tool, the wheel blank is stationary or makes a slight turn, i.e. processing proceeds, in comparison with the running-in method, providing the highest contact rigidity of the tool and determines the ability of the

surface layers of the gears that are in contact with the cutting edge of the tool to provide the cutting process.

Key words: gear cutting, cutting schemes, hardened large-module gears, single-spindle and double-spindle calipers

Введение. Для чистовой обработки закаленных колес на станках мод. 5A342,
© А.А. Клочко, 2021

5343, фирмы “МААГ” разработаны две конструкции специальных фрезерных суппортов: одношпиндельная, где в качестве станочной линии зацепления пары инструмент – деталь используется нормаль к эвольвентам, расположенная горизонтально, профильный угол зубьев инструмента- дисковой фрезы близок к $\alpha_u = 0^\circ$. Фреза в первоначальный момент обработки расположена со смещением относительно оси колеса на расчетное расстоянии [1, 3, 5]. Обработка правой и левой боковых поверхностей зубьев колеса осуществляется отдельно, обработка ведется за два прохода; двухшпиндельная, реализующая схему резания при одновременной обработке обеих боковых поверхностей зубьев колеса с использованием двух дисковых фрез, расположенных с наклоном на угол $\alpha_\phi = 20^\circ$. Профильный угол зубьев фрезы равен $\alpha_\phi = 0^\circ$.

Основная часть. Одношпиндельный суппорт рис. 1 и рис. 2 состоит из опорной плиты 1, шпинделя 2, оправки 3, шпонки торцевой 4, крепежных винтов 5, электродвигателя 7, клиноременной передачи 8. Дисковая фреза 6 закрепляется консольно на того, какую сторону зубьев необходимо обработать, на суппорте у станавливают фрезу леворезущую или праворезущую.

В процессе обработки дисковая фреза совершает возвратно-поступательное движение вверх-вниз, аналогично движению зубострогальной гребенки. После обработки одной боковой поверхности всех зубьев колеса на суппорте меняется, например, леворезущая фреза на праворезущую, изменяется направление вращения и ход колеса на обратные и производится обработка другой боковой поверхности зубьев.

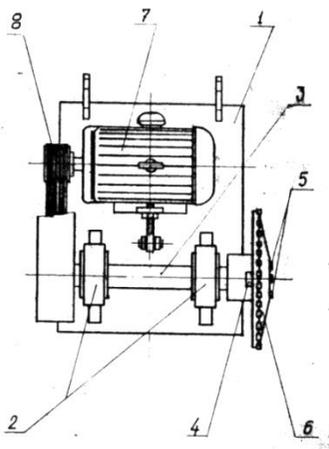


Рис. 1 – Принципиальная схема одношпиндельного спецсуппорта к зубострогальному станку фирмы «МАОГ»

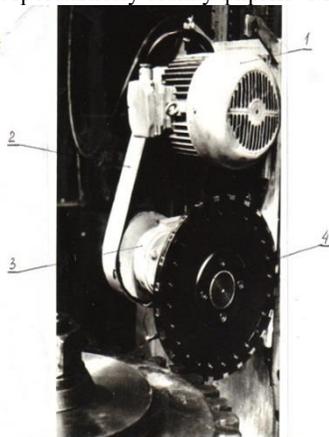


Рис. 2 - Рабочая конструкция одношпиндельного спецсуппорта к зубострогальному станку фирмы «МАОГ»: 1 - электродвигатель; 2 - клиноременная передача; 3 - шпиндель; 4 - дисковая фреза, оснащенная керамикой

Двухшпиндельный суппорт состоит из двух шпиндельных головок (рис. 3), каждая из которых имеет независимый привод и наклонена на угол $\alpha_0 = 20^\circ$. Левая головка неподвижно закреплена на установочной плите. Правая головка перемещается в направляющих при помощи ходового винта в направлении, параллельном движению заготовки.

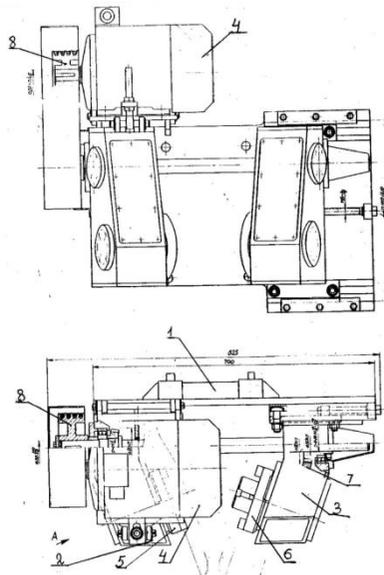


Рис. 3 – Принципиальная конструкция двухшпиндельного спецуппорта к зубостругальному станку

Дисковые фрезы $\phi 400$ мм приводятся во вращение электродвигателями мощностью $P = 1,5$ кВт посредством червячных пар с передаточным отношением $u = 4,75$. Частота вращения дисковых фрез составляет 300 об/мин. Расстояние между дисковыми фрезам выбирается в зависимости от модуля обрабатываемого зубчатого колеса и изменяется в пределах от 75 мм до 150 мм. В качестве смазки червячной пары применяется нелегированное масло цилиндрическое марки 52 по ГОСТ 6411-76 [2, 4].

На рис. 4 показана принципиальная конструкция одношпиндельного спецуппорта к станку мод. 5А342. Суппорт состоит из основания 1, присоединяемого к колонне станка, поперечной траверсы 2, на которой размещена инструментальная каретка 3 с индивидуальным приводом 4 и дисковой фрезой 5. Тангенциальное перемещение V_m траверсы 2 осуществляется с помощью ходового винта 6, а возвратно-поступательные перемещения вверх-вниз каретки 3 с инструментом осуществляются с помощью высокомоментного электродвигателя и шариковой винтовой пары (ШВП) 8.

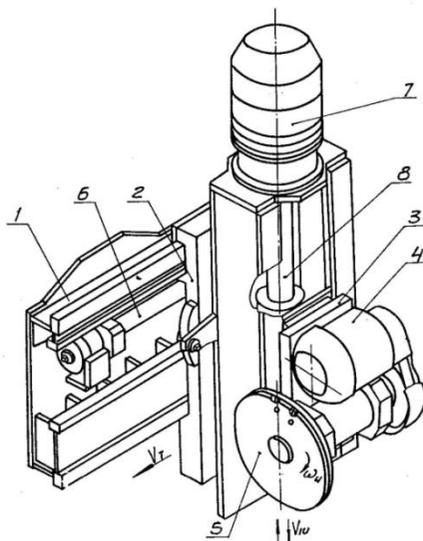


Рис. 4 – Принципиальная конструкция одношпиндельного спецсуппорта к вертикально-зубофрезерному станку мод. 5А342

Отличительными особенностями спецсуппорта к станку мод. 5343 являются (рис. 5) наличие двух шпинделей 1 и 2, расположенных по отношению к основанию 3 под углом $\alpha_0 = 20^\circ$, и увеличенная длина направляющих траверсы 4, позволяющая обработать зубчатые колеса с длиной зуба $b = 1500$ мм.

Каждая из двух дисковых фрез 5 и 6 имеет индивидуальные приводы 7 и 8, а расстояние между ними регулируется с помощью установочных винтов 9 и 10. Суппорт позволяет обрабатывать улучшенные и закаленные зубчатые колеса с модулем зубьев до $m = 50$ мм, углом наклона зубьев до $\beta = 15^\circ$ и наружным диаметром до $D_a = 3000$ мм.

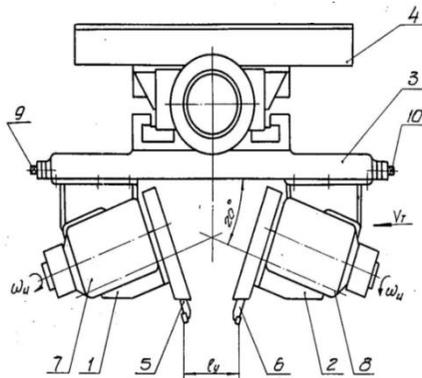


Рис. 5 – Принципиальная конструкция двухшпиндельного спецсуппорта к зубофрезерному станку мод. 5343

Оба суппорта предназначены для чистовой обработки закаленных колес и приводных шестерен рудо- и углеразмольных мельниц взамен зубошлифования и с целью исключения кооперации производства или приобретения импортного дорогостоящего зубошлифовального оборудования.

Выводы. Для обеспечения высокопроизводительной обработки закаленных крупномодульных колес на зубофрезерных станках мод. 5А342, 5343, зубострогальных станков «МААГ» необходимо применение специальных одно и двухшпиндельных суппортов, обеспечивающих качество и точность зубообработки.

Список литературы

1. Тимофеев Ю. В. Новая технология скоростной обработки закаленных крупномодульных зубчатых колес специальными дисковыми фрезами / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2011. – Вип. 118. – С. 139–144.
2. Шелковой А. Н. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203–210.
3. Пат. 2082567 Российской Федерации, МКИ В23 F 5/00. Зубообрабатывающий станок / В. Ф. Шаповалов, В. И. Печеный, А. А. Клочко, Г. Н. Руин, С. П. Налетов, Н. И. Аристархов, В. Д. Коротков, Н. А. Лобанов, А. В. Кузнецов. – № 92009350 ; заявл. 01.12.92 ; опубл. 27.06.97, Бюл. № 18. – 6 с. : ил.
4. Технологические основы обеспечения производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, Е. В. Мироненко // Вісник Донецького Національного технічного університету: зб. наук. пр. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк : ДНТУ, 2013. – № 1 (10) (2013). – С. 131–140.
5. Клочко А. А. Области оптимального. управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. А. Клочко, Ю. В. Тимофеев., А. Н. Шелковой // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 332–343.

Bibliography (transliterated)

1. Timofeev, U.V., A.A. Klochko and V. F. Shapovalov. *New technology high-speed machining of hardened gears coarse-grained special disc cutter*. News SevNTU: ST. ScienceP. pr. Series "Mashinopriladobuvannya that transport." -Sevastopol, 2011. - VIP. 118. -P. 139-144. 2. Shelkovoy A.N., E.V. Mironenko and A.A. Klochko. *General principles of modeling the optimal control parameters of precision, quality and performance gear treatment quenched coarse-grained gear*. News SevNTU: ST. ScienceP. pr. Series "Mashinopriladobuvannya that transport." - Sevastopol, 2013. - Vip. 140. - P. 203-210. 3. V.F. Shapovalov, et al. Pat. 2082567 Russian Federation, B23 MKI F 5/00. *Gear Machine* / - No 92009350; appl. 01/12/92; publ. 27.06.97, Bul. No 18. -6 P. : yl. 4 Timofeev U.V., et al. *Technological bases ensure productivity, accuracy and quality gear treatment quenched coarse-grained gear*. News of Donetsk Natsionalnogo tehnicnogo universitetu: ST. ScienceP. pr. Seriya: Mashinobuduvannya i mashinoznavstvo. - Donetsk: DNTU, 2013. - No 1 (10) '(2013). - P. 131-140. 5. Klochko A.A., U.V Timofeev and A. N., Shelkovoy. *Fields optimal. control the parameters of precision, quality and performance gear treatment quenched coarse-grained gear*. Reliable tools and optimization of technological systems: Sat. scientific. tr. - Kramators'k: DGMA, 2012. - Vol. 32. - P. 332-343.

Поступила (received) 02.10.2021

ЗМІСТ

<i>Пермяков А.А., Слипченко С.Е.</i> Применение управляющих сетей Петри для обработки корпусных деталей.....	3
<i>Андилахай А.А.</i> Пути повышения эффективности струйно-абразивной обработки мелких деталей.....	9

<i>Новиков Ф.В., Кленов О.С.</i> Условия повышения эффективности высокопроизводительной обработки.....	17
<i>Stupnyskey V.V.</i> Feature-Oriented Process Optimizations.....	25
<i>Кондратюк О.Л., Скоркін А.О.</i> Організаційно-технологічні засоби складання машинобудівних виробів.....	40
<i>Клочко А.А.</i> Многошпиндельная схема скоростной зубообработки закаленных колес.....	45

CONTENTS

<i>Permyakov A.A., Slipchenko S.E.</i> The use of control Petri nets for processing body parts.....	3
<i>Andilakhai A.A.</i> Ways to improve the efficiency of jet-abrasive processing of small parts.....	8
<i>Novikov F.V., Klenov O.S.</i> Conditions for increasing the efficiency of high-performance processing.....	15
<i>Stupnyskey V.V.</i> Feature-Oriented Process Optimizations.....	25
<i>Kondratyuk O.L., Skorkin A.O.</i> Organizational-technological problems of storage of machine-building materials.....	40
<i>Klochko A.A.</i> Multi-spindle scheme for high-speed gear machining of hardened wheels.....	45

ДЛЯ ПОДАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ». СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В
МАШИНОБУДУВАННІ**
Збірник наукових праць

№ 2'2021 (4)

Наукові редактори: О. О. Пермяков, д-р техн. наук, професор, НТУ
«ХПІ», Україна
О. О. Клочко, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ»,
Україна

Технічний редактор: О. В. Набока, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ»,
Україна

Відповідальний секретар: О. В. Набока, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ»,
Україна

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 6102, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра технології машинобудування та металорізальні верстати
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: oleksandr.klochko@khpri.edu.ua

Підп. до друку 23.11.2021 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний. Друк офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75. Тираж 100 пр. Зам. № 42.
Ціна договірна.

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О. 61002, м. Харків, вул. Багалія, 16 Свідоцтво №
24800000000079553, від 16.05.2007 р.