

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**

№ 1'2021 (3)

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

No. 1'2021 (3)

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 — № 1(3). — 57 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.

**М.И. ГАСАНОВ**, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»;  
**А.А. ПЕРМЯКОВ**, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»  
**А.А. КЛОЧКО**, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»;  
**В.С. ФЕДОРЕНКО**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ПРИ ЗУБООБРАБОТКЕ ЗАКАЛЕННЫХ КОЛЕС**

Взаимосвязь теоретической зависимости скорости резания от различных технологических факторов, физико-механических свойств материалов инструмента и закаленного зубчатого колеса позволяет осуществлять выбор рациональных режимов резания в каждом конкретном производственном случае с учетом требуемых показателей стойкости инструмента, производительности обработки, точности и качества поверхностного слоя. Разработаны схемы резания и технологического оснащения при интенсивной и высококачественной зубообработке с использованием метода численного моделирования процесса формообразования поверхностного слоя, что позволило получить напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого зубчатого колеса, инструмента и стружки и разработаны рекомендации по выбору технологического регламента обработки. Метод численного моделирования основан на решении системы уравнений механики сплошной среды (уравнения движения, неразрывности, энергии). В качестве замыкающих систему уравнений используются определяющие соотношения теории упругости, пластичности и разрушения.

**Ключевые слова:** схемы резания, технологические факторы, качество поверхности, закаленные крупномодульные зубчатые колеса, численное моделирование

## **М.І. ГАСАНОВ, О.О. ПЕРМ'ЯКІВ, А.А. КЛОЧКО, В.С. ФЕДОРЕНКО ТЕХНОЛОГІЧНЕ УСТАТКУВАННЯ ПРИ ЗУБООБРОБЦІ загартованих коліс**

Взаємозв'язок теоретичної залежності швидкості різання від різних технологічних факторів, фізико-механічних властивостей матеріалів інструменту та загартованого зубчатого колеса дозволяє здійснювати вибір раціональних режимів різання у кожному конкретному виробничому випадку з урахуванням необхідних показників стійкості інструменту, продуктивності обробки, точності та якості поверхневого шару. Розроблено схеми різання та технологічного оснащення при інтенсивній та високоякісній зубообробці з використанням методу чисельного моделювання процесу формування поверхневого шару, що дозволило отримати напружено-деформований стан поверхневого шару оброблюваного зубчатого колеса, інструменту та стружки та розроблено рекомендації щодо вибору. Метод чисельного моделювання ґрунтується на розв'язанні системи рівнянь механіки суцільного середовища (рівняння руху, нерозривності, енергії). Як замикають систему рівнянь використовуються визначальні співвідношення теорії пружності, пластичності та руйнування.

**Ключові слова:** схеми різання, технологічні фактори, якість поверхні, загартовані зубчасті колеса, чисельне моделювання

## **M.I. GASANOV, A.A. PERMYAKOV, A.A. KLOCHKO, V.S. FEDORENKO TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR GEARWORKING OF HARDENED WHEELS**

The relationship between the theoretical dependence of the cutting speed on various technological factors, the physical and mechanical properties of the tool materials and the hardened gear allows the

© М.І. Гасанов, О.О. Пермяков, А.А. Клочко, В.С. Федоренко

choice of rational cutting conditions in each specific production case, taking into account the required indicators of tool life, processing productivity, accuracy and quality of the surface layer. Cutting schemes and technological equipment were developed for intensive and high-quality gear cutting using the method of numerical simulation of the surface layer shaping process, which made it possible to obtain the stress-strain state of the surface layer of the gear being machined, tool and chips, and recommendations were developed for choosing the technological processing schedule. The numerical simulation method is based on solving a system of continuum mechanics equations (equations of motion, continuity, energy). The constitutive relations of the theory of elasticity, plasticity, and fracture are used as closing equations for the system.

Keywords: cutting schemes, technological factors, surface quality, hardened large-module gears, numerical simulation

**Введение.** Тяжелые зубофрезерные станки мод. 5А342 по жесткости и быстроходности не предназначены для работы методом обкатки твердосплавными червячными фрезами, а также из-за сравнительно невысокой стойкости используемых твердых сплавов, производственный опыт ряда заводов показал, что точность обработки крупномодульных закаленных до  $HRC_3, 50...55$  колес модулем  $m > 12$  мм червячными твердосплавными фрезами по нормам плавности и контакта не превышает 9...10-ой степеней точности по ГОСТ1643- 81.

**Основная часть.** Для чистовой зубообработки колес крупного модуля предложен метод прерывистого обката с использованием дисковых фрез, оснащенных керамическими пластинками и специальными фрезерными суппортами. 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, с учетом радиуса округления  $\rho$  мм, обеспечивать процесс резания.

В соответствии со сложившимся представлением о процессе обработки поверхностей зубчатых колес, одним из его результатов является образование равновесной шероховатости. Несущая способность поверхности зубчатых колес, коэффициент трения и интенсивность износа при трении скольжения наряду с шероховатостью, определяются макроотклонением, волнистостью и физико-механическими свойствами (микротвердость и остаточные напряжения), видом обработки и технологическими особенностями конструкции немодульных фрез. Поэтому образующаяся шероховатость поверхностей будет зависеть от остальных параметров состояния поверхностного слоя инструмента и обрабатываемой поверхности зубчатых колес.

Для разработки схем резания и технологического оснащения при интенсивной и высококачественной зубообработке использовался метод численного моделирования процесса формообразования поверхностного

слоя, что позволило получить напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого зубчатого колеса, инструмента и стружки и рекомендовать оптимальный технологический регламент обработки. Метод численного моделирования основан на решении системы уравнений механики сплошной среды (уравнения движения, неразрывности, энергии). В качестве замыкающих систему уравнений используются определяющие соотношения теории упругости, пластичности и разрушения. Система уравнений решается при заданных начальных и граничных условиях.

На основании выполненных работ разработана математическая модель технологического процесса встречного зубофрезерования с переменным изменением формообразования поверхностного слоя. Модель предназначена для исследования пластического течения металла в зоне стружкообразования, расчета скоростей деформации, напряжений в условной плоскости сдвига и на контактных поверхностях инструмента, исследования напряжений в слоях металла, расположенных на различной удаленности от обработанной поверхности, создания базы для изучения нестационарных процессов: врезания инструмента, прерывистого резания, напряжений в условиях элементного и псевдоэлементного стружкообразования и т.п.

Численное моделирование процесса встречного зубофрезерования рассмотрено в двумерной динамической постановке с использованием лагранжева описания движения среды. Метод решения задачи аналогичен известному конечно-разностному методу *HEMP*, поэтому система уравнений Прандтля-Рейса записывается в том же виде.

Уравнения движения

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = \rho \dot{u}_x, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \rho \dot{u}_y; \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\dot{V} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\dot{E} = -P\dot{V} + (S_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + S_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + 2 \cdot S_{xy}\dot{\epsilon}_{xy}) \cdot V. \quad (3)$$

Скорости деформации

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right). \quad (4)$$

В условиях плоской деформации  $u_z = 0$ ,  $\epsilon_{zz} = \epsilon_{yz} = 0$ ,

Скорость вращения

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_{xy} = -\dot{\omega}_{yx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y} \right). \quad (5)$$

Полная деформация включает в себя упругую и пластическую части:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^{pl}. \quad (6)$$

Тензор напряжений  $\sigma$  разбивается на девиаторную  $s$ - шаровую  $P$  части. Девиатор напряжений с учетом поворота локальной системы координат

$$\dot{S}_{xx} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3} \dot{V} / V \right) + \dot{\omega}_{xx};$$

$$\dot{S}_{yy} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{yy} - \frac{1}{3} V/V \right) + \varpi_{yy}; \quad (7)$$

$$\dot{S}_{xy} = 2\mu \dot{\epsilon}_{xy} + \varpi_{xy},$$

где  $\varpi$  – поправка, учитывающая поворот элемента среды.  
Гидростатическое давление

$$\dot{P} = -K \frac{\dot{V}}{V}, \quad (8)$$

где  $V = \rho_0/\rho$  – относительный объем.

Условие пластичности Мизеса

$$2J_2 - \frac{2}{3} Y^2 \leq 0, \quad (9)$$

где  $2J_2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ ,  $Y$  – предел текучести при растяжении.

В качестве меры упрочнения принята работа пластической деформации  $W^{pl}$ :

$$Y = Y(W^{pl}) = Y_0 + \alpha (W^{pl})^\beta \text{ Мбар}, \quad (10)$$

где  $x, y$  – пространственные координаты;  $u_x, u_y, u_z$  – компоненты вектора скорости;  $s_y$  – компонента тензора деформации;  $c_y$  – компонента тензора напряжений;  $s_y$  – компонента дивергента напряжений;  $P$  – давление;  $E$  – удельная энергия;  $\rho$  – плотность;  $\rho_0$  – первоначальная плотность среды;  $V_{отн}$  – относительный объем;  $K$  – модуль объемного сжатия;  $\mu$  – модуль сдвига.  
Точка сверху означает производную по времени.

В основу разработанной программы положены научные основы стабилизационных или искусственных вязкостей.

Отделение срезаемого поверхностного слоя осуществлялось с использованием специального алгоритма разделения узлов сетки (рис. 1).

Реализация граничных условий в области контакта материала с режущим инструментом осуществлялась по схеме коррекции движения узлов расчетных ячеек.

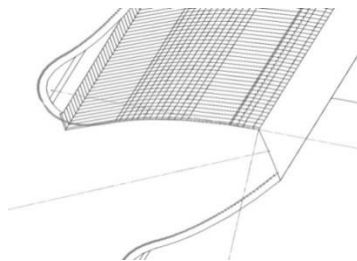


Рис.1 – Схема формообразования сетки на обрабатываемой поверхности зубчатого колеса

Процедура расчета на каждом временном интервале, включала следующую последовательность операций:

1. Расчет движения узлов сетки (рис. 2) при соответствующих граничных условиях. На всех поверхностях, где эти условия заранее не заданы, а

определяются в ходе решения задачи, используются условия свободных поверхностей;

2. Расчет контактного взаимодействия поверхностей (условие непроникновения и закон скольжения Амонтона-Кулона) и коррекция движения в соответствии с взаимодействием;

3. Расчет напряженно-деформированного состояния в ячейках сетки;

4. Проверка условия разрушения и формирование новых поверхностей (разделение узлов и задание соответствующих условий на новых поверхностях для отделения срезаемого слоя).

Решение осуществлялось с учетом технологического процесса моделирования формообразования поверхностного слоя и стружки. Поскольку характерное время процесса зубофрезерования значительно превышает время прохождения волн деформации, решение задачи производилось для различных временных интервалов.

Процесс формообразования зубчатых колес при встречном фрезеровании методами численного моделирования заключается в получении минимального значения угла скольжения  $\Psi_{ск}$ , или получения максимального значения  $\sin \nu_{\text{нелет}}$ , при котором процесс резания отсутствует с учетом варьирования переменных параметров режимов резания ( $S_{\text{мин}}$ ,  $V$ ) и геометрических параметров зуборезных фрез ( $\rho$ ,  $d_{\text{фр}}$ ,  $Z$ ) [2, 3].

Соотношение между углом скольжения  $\Psi_{ск}$  и наибольшим углом контакта зуба фрезы  $\Psi_{\text{max}}$  с обрабатываемой поверхностью позволяет установить эффективность процесса формообразования через коэффициент эффективности функционального формирования поверхностного слоя  $K_{\rho}$ .

Использовались следующие константы обрабатываемого материала:  $K = 180 \text{ ГПа}$ ,  $\mu = 80 \text{ ГПа}$ ,  $p = 7,85 \text{ г/мм}^3$ ,  $Y_0 = 0,4 \text{ ГПа}$ ,  $a = 1/150$ ,  $\beta = 0,2$ . Расчеты проводились для скорости резания  $V = 3,0 \text{ м/с}$ .

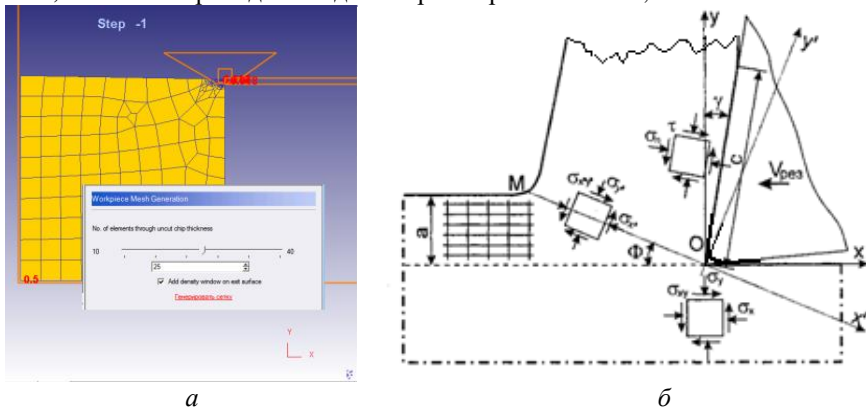


Рис. 2 – Схематическое изображение процедуры разделения узлов сетки: *a* – вдоль линии среза, *б* – схема процесса формообразования

На рис. 3 приведено полученное при исследовании модели распределение интенсивности напряжений в зоне стружкообразования при зубофрезеровании.

Пластическое течение материала сосредоточено вблизи условной плоскости сдвига и передней грани инструмента. На рис. 3 также достаточно четко просматриваются зоны упругого сжатия впереди зуба фрезы и растяжения под задней поверхностью зуба фрезы.

Известно, что поведение материала, не обладающего свойствами деформационного упрочнения (или описываемого в таких рамках), имеет тенденцию к локализации пластической деформации. В связи с этим использование данной модели может оказаться полезным для выделения наиболее активной зоны деформации.

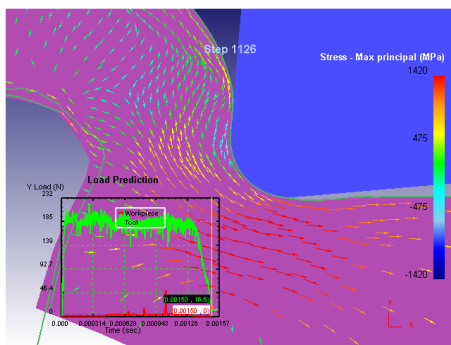


Рис. 3 – Распределение интенсивности напряжений в области формообразования поверхностного слоя

Пластическое течение материала начинается значительно раньше, чем частицы металла оказываются на условной плоскости сдвига, угол наклона которой существенно меньше (рис. 3).

Напряженное состояние не является неизменным в течение процесса. Как физически, так и численно это обусловлено неравномерностью разрушения материала перед зубом фрезы с учетом угла скольжения  $\Psi_{ск}$ . Очевидно, что дискретизация этого процесса связана с технологией численного расчета и значительно усиливает неравномерность. В момент разделения очередного узла сетки происходит разгрузка материала в прилегающей области и излучение упругих волн. Распределение напряжений вдоль условной плоскости сдвига показано на рис. 4. Понятно, что в такой ситуации уровень напряжений вблизи лезвия будет циклически меняться, а картина распределения напряжений зависит от местоположения лезвия инструмента в пределах расчетной ячейки, т.е. от момента времени. Именно с этим связана нестабильность процесса формообразования.



На рис. 4 представлены результаты расчета напряжений, действующих на условной линии сдвига, на рис. 5 – изменение интенсивности скорости деформации частиц металла на пути превращения их в стружку. Изменение интенсивности скорости деформации  $\dot{\epsilon}_T$ , вначале плавно, а затем вблизи условной линии сдвига резко возрастает, после чего падает до нуля.

Наибольшая скорость деформации имеет место в слое, прилегающем к лезвию инструмента (кривая 4, рис. 5), наименьшая – в срединных слоях.

Однако, после прохождения условной линии сдвига, скорость деформации по всему сечению остается близкой к ее величине в срединных слоях при прохождении условной плоскости сдвига. При этом отрезок времени активной деформации существенно превышает период наиболее высокоскоростной пластической деформации.

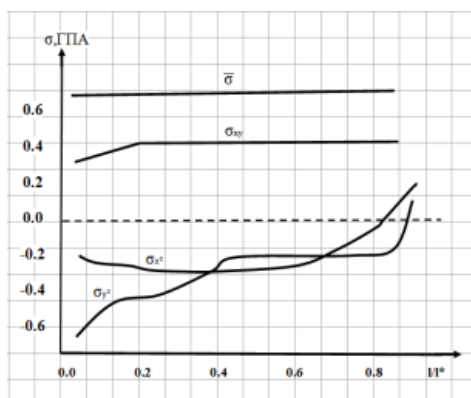


Рис.4 – Распределение напряжений вдоль условной плоскости сдвига

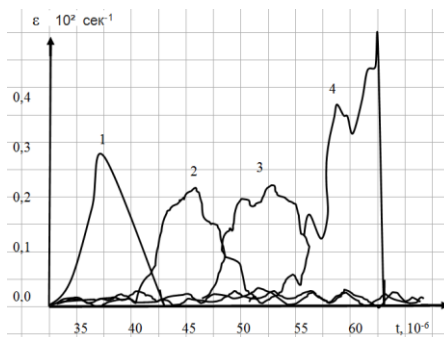


Рис.5 – Изменение интенсивности скорости деформации с течением времени

Сжатие материала, которое наблюдается в области, лежащей впереди

зуба фрезы, сменяется интенсивным растяжением при приближении лезвия инструмента; это хорошо видно на рис. 6. Если вертикальная компонента напряжений (в силу граничных условий) после прохождения реза обращается в ноль (рис. 6, б), то для горизонтальной составляющей ситуация значительно отличается. Верхние слои уже обработанной детали вновь оказываются в состоянии сжатия (рис. 6, а).

В разработанной численной модели в качестве установочных параметров были использованы исходная геометрия инструмента, коэффициент трения и свойства материала заготовки. К числу модельных идеализаций относится переменная толщина срезаемого слоя, радиус округления режущего лезвия и соответствующая схема отделения срезаемого слоя; модель упругопластического поведения материала.

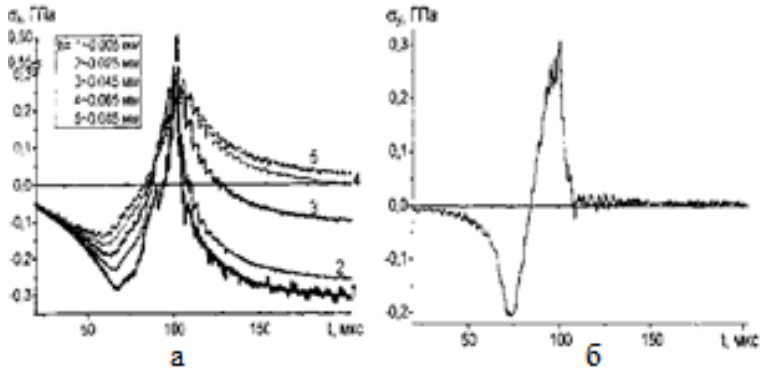


Рис. 6 – Изменение напряжений: а - по глубине поверхностного слоя, б - с течением времени по мере перемещения зуба фрезы

Разработанная на основании проведенных исследований численная модель достаточно хорошо описывает многие явления процесса зубофрезерования. Возможно и дальнейшее уточнение расчетов путем учета влияния температуры, задания переменного закона трения на передней грани и т.п.

Наиболее перспективным представляется использование разработанной методики и численной модели для анализа переходных процессов и разрушения, когда учет динамических явлений становится принципиальным.

Разработанная модель технологического процесса формообразования адекватно описывает условия обеспечения параметров поверхностного слоя зубчатых колес с учетом требуемых эксплуатационных характеристик для скоростного зубофрезерования инструментами дискового типа.

При реализации технологии лезвийной обработки закаленных колес инструментами дискового типа предложены схемы резания I и II (рис. 7, а, б).

Для обработки зубчатых колес различного модуля необходимо регулировать установочное расстояние  $l_y$  между фрезами, которое ориентировочно можно определить по зависимости:

$$l_y = 3,98 \cdot m. \quad (11)$$

Возможна разновидность схемы IV, которую назовем схемой V, когда обработка правой и левой поверхностями зубьев производится отдельно путем установки на оправке вначале одной, например, левой фрезы, а затем правой. Обработка колеса производится в два прохода.

Достоинство схем резания III, IV, V по сравнению со схемами I, II заключается в возможности использования инструментов, размеры режущих кромок которых не зависят от размеров (модуля) обрабатываемых зубьев колеса и значительно, в 3...7 раз меньше, чем размеры кромок инструментов, рассмотренных в работе.

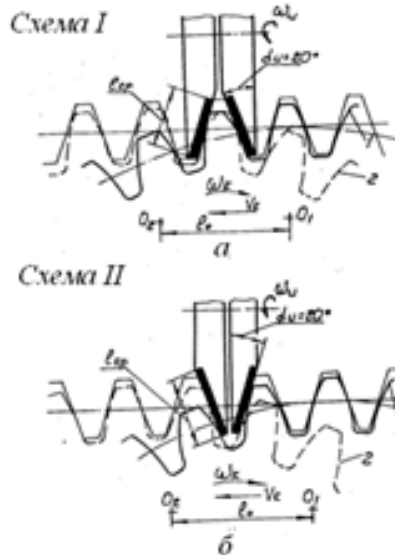


Рис. 7 – Технологические схемы резания дисковыми немодульными фрезами:  
 а – схема одновременной обработки двух профилей одного зуба, б – схема  
 одновременной обработки двух профилей соседних зубьев

Общим недостатком схем I и II является то, что в обоих случаях размеры режущих кромок зубьев  $l_{кр}$  инструмента зависят от размеров (модуля) обрабатываемых зубьев колеса. При крупном модуле зубьев  $m = 18...36$  мм размеры кромок составляют  $l_{кр} = 45...90$  мм. Это усложняет процесс припоя твердосплавных зубьев и последующее затачивание инструмента или оснащение его керамикой и сверхтвёрдыми материалами. Инструмент такой конструкции имеет сравнительно большие периметры резания, что повышает

силы резания и способствует возникновению вибраций.

Достоинство схем I и II в том, что оба инструмента расположены на одной и той же оправке, т.е. имеется возможность осуществить привод вращения от одного электродвигателя.

При схеме III (рис. 8,а) в качестве станочной линии зацепления пары инструмент – деталь используется нормаль к эвольвентам  $PK$ , 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 расстоянии  $l_0$ , определяемом по следующей зависимости:

$$l_0 = r_b \cdot \operatorname{tg} \alpha_a, \quad (12)$$

где  $r_b$  – радиус основной окружности зубьев;  $\alpha_a$  – угол профиля эвольвенты на вершине зуба.

Обработка правой и левой боковых поверхностей зубьев колеса осуществляется раздельно, обработка ведется за два прохода.

Схема резания IV (рис. 8,б) предполагает одновременную обработку обеих боковых поверхностей зубьев колеса с использованием двух дисковых фрез, расположенных с наклоном на угол  $\alpha_\phi = 20^\circ$ . Профильный угол зубьев фрезы равен  $\alpha_\rho = 0^\circ$ .

Инструменты располагают с охватом одного или нескольких зубьев колеса. Однако с ростом числа зубьев в охвате увеличивается и путь обката, что снижает производительность обработки.

При схемах I и II режущие кромки инструментов полностью задействованы в обработке, точка контакта лезвия и зуба колеса перемещается по всей длине кромки. В этих условиях оснащение всего периметра режущей кромки керамическими пластинками из-за разности их размеров не позволит получить профиль зуба достаточно высокой степени точности.

Применение схем резания III, IV, V позволяет оснастить дисковые фрезы 4<sup>x</sup>-гранными керамическими пластинками марки ВОК-71 с размерами 12,7 x 12,7 мм. Инструмент при этом не требует затачивания и перетачивания, удобен в эксплуатации и ремонте. Так как обработка эвольвентных поверхностей зубьев производится практически одними и теми же участками пластин, то это повышает точность обработки профиля зубьев.

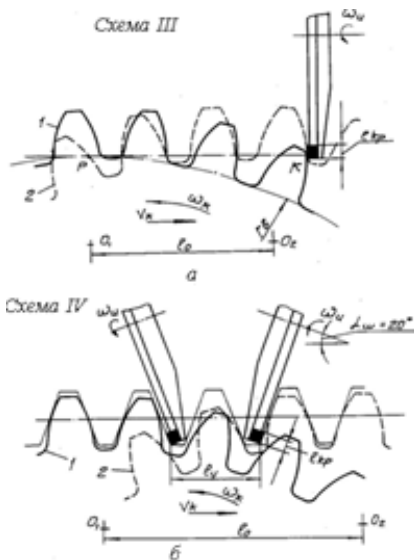


Рис.8 – Перспективные технологические схемы скоростного зубофрезерования: а - схема резания III; б - схема резания IV

В табл1 представлены расчетные значения длины пути обката, полученные для случаев обработки прямозубых зубчатых колес в диапазоне чисел зубьев  $z_k = 25 \dots 100$  при модуле  $m = 28$  мм.

Таблица 1 – Расчетные значения длины пути обката

Схема резания	Путь обката $l_0$ , мм			
	Число зубьев колеса $Z_k$			
	25	50	75	100
I	218,1	218,1	218,1	218,1
II	213,9	229,0	233,7	239,4
III	296,4	308,2	313,2	316,2
IV	301,8	316,9	321,4	327,3
V	278,4	289,6	294,3	297,1

В табл. 2 представлены изменения параметров точности и шероховатости при различных схемах формообразования, полученные для случаев обработки прямозубых зубчатых колес в диапазоне чисел зубьев  $z_k = 25 \dots 100$  при модуле  $m = 28$  мм.

Таблица 2 – Изменение параметров точности и шероховатости при различных схемах формообразования

Схема резания	Параметры точности зубчатых колес, мкм				
	ГОСТ 1643-81				
	Нормы кинамитеской точности $F_r$	Нормы плавности $\pm f_{pt}$	Нормы бокового зазора $F_\beta$	Шероховатость поверхность и $R_a$	Параметр плавности $\pm f_{pt}$ после года эксплуатации
I	45	36	30	1,6	96
II	42	38	35	1,6	84
III	34	30	25	1,2	58
IV	36	28	26	1,1	50
V	32	30	25	1,4	56

Как видно из представленных в таблице данных, наименьший путь обката, а следовательно, и наибольшую производительность обработки, обеспечивает схема резания I. Для этой схемы путь обката не зависит от числа зубьев обрабатываемых колес. Второй по производительности процесса является схема II. Однако эти схемы не позволяют использовать инструмент с уменьшенными размерами режущих кромок.

Из схем резания для дисковых фрез, оснащенных минералокерамикой (III, IV) наиболее эффективной является схема IV. Здесь путь обката наименьший, но необходимо учитывать величину вспомогательного времени, связанного с переустановкой инструмента и подналадкой заготовки колеса.

Схема III является второй по эффективности. Недостаток ее в том, что из-за большого исходного смещения инструмента относительно оси колеса на существующих тяжелых зубофрезерных станках возможна обработка косозубых колес только с наружным диаметром до 800 мм. Схема IV удобна в эксплуатации, т.к. не требует переустановки фрез.

В работе были приняты два направления. Первое заключалось в разработке несложных по конструкции специальных фрезерных суппортов, устанавливаемых на зубострогальных станках фирмы “MAAG” и реализующих схему резания III (рис. 8, а) [2, 78]. Второе учитывало разработку, изготовление и внедрение на заводах машиностроения специальных фрезерных суппортов к широко распространенным вертикально-зубофрезерным станкам. При этом реализовывались технологические схемы резания III и IV [1, 3, 5, 6, 8].

**Выводы.** Для обеспечения оптимальной долговечности и технологической надежности процесса формообразования зубчатых закаленных колес дисковыми фрезами разработаны схемы резания и рекомендации по выбору оптимальных технологических параметров

обработки. Наиболее перспективным представляется использование разработанной методики и численной модели для анализа переходных процессов и разрушения, когда учет динамических явлений становится принципиальным. Разработанная модель технологического процесса формообразования адекватно описывает условия обеспечения параметров поверхностного слоя зубчатых колес с учетом требуемых эксплуатационных характеристик для скоростного зубофрезерования инструментами дискового типа.

#### 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. Тимофеев Ю. В. Оптимизация технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Восточно-европейский журнал передовых технологий: Прикладная механ. ика. Издательство: Технологический центр (Харьков). Том 4, – № 7 (64) (2013). – С. 49–55.
3. Шелковой А. Н. Исследование динамики зубофрезерования крупномодульных закаленных зубчатых колес с помощью WAVLET-анализа [Текст] / А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств: сборник научных трудов. – Волгоград: ВолГТУ, Тольятти: Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2013. – 208 с.: ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Ю. М. Соломенцева). (с. 106 - 115).
4. 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.
5. Технология обработки крупномодульных зубчатых колес однокорпусными фрезами двухстороннего резания с чередующимися коническими зубчатыми рейками / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. пр. Тематичний випуск : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 49. – С. 111–116.
6. Кане М. М. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Сулов, О. А. Горленко под общ. ред. д.т.н. М. М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с.
7. 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.
8. 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.
9. Шелковой А. Н. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 274–280. 10.

#### 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. -C. 139-144. 2. Timofeev U.V., A.A. Klochko and A.N. Kravtsov. *Optimization of technological support of operational properties of surfaces hardened gears coarse-grained [Text]*. East European Journal of advanced technologies: Applied clockworks Ica . Publisher: Technology Centre (Kharkiv). Volume 4, - No 7 (64) '(2013). - P. 49-55. 3. Shelkovoy A.N., A. N. Kravtsov and A.A. Klochko. *Investigation of the dynamics of coarse-grained hobbing of hardened gears using WAVLET-analysis [Text]*. Problems of design and automation engineering industries: a collection of research laborP. - Volgograd: VolgGTU, Togliatti: Irbit: ZAO "ONYX", 2013. - 208 p. : ill., Table. ; - (Series: Quality Management processes in engineering / under total. Ed. YM Solomentseva). (p. 106 - 115). 4. 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 gearP*. News SevNTU: ST. ScienceP. pr. Series "Mashinopriladobuvannya that transport." - Sevastopol, 2013. - Vip. 140. - P. 203-210. 5. Timofeev U.V., et al. *Processing Technology coarse-grained cogwheels Monohull cutters cutting with alternating double conical toothed rackP*. News Natsionalnogo tehchnogo universitetu "Harkivsky politehnychny institut ": ST. ScienceP. pr. temachnost vipusk: Tehnologii in mashinobuduvanni. - Kharkiv: NTU KhPI, 2010. - No 49. - pp 111-116. 6. Kane M.M. et al. *Quality Management Engineering*. - Moscow: Mechanical Engineering, 2010. - 416 p. 7. Timofeev U.V., et al. *Technological bases ensure productivity, accuracy and quality gear treatment quenched coarse-grained gearP*. News of Donetsk Natsionalnogo tehchnogo universitetu: ST. ScienceP. pr. Seriya: Mashinobuduvannya i mashinoznavstvo. - Donetsk: DNTU, 2013. - No 1 (10) '(2013). - P. 131-140. 8. 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 gearP*. Reliable tools and optimization of technological systems: Sat. scientific. tr. - Kramators'k: DSEA, 2012. - Vol. 32. - P. 332-343. 9. Shelkovoy A.N., U.V Timofeev and A.A. Klochko. *AN Technological obpespechenie given system parameters of the surface layer of cylindrical gears hardened coarse-grained*. Reliable tools and optimization of technological systems: Sat. scientific. tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Vol. 32. - P. 274-280.

*Послынула (received) 05.02.2021*



**М.С. СТЕПАНОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;

**М.С. ІВАНОВА**, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПІ»

## **СИЛОВІ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ОТВОРІВ КОМБІНОВАНИМ ОСЬОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ**

Досліджена осьова складова сили різання і крутний момент при послідовно-паралельній схемі різання комбінованим осьовим інструментом. Досліджений вплив кількості ступенів комбінованого осьового інструмента на сумарні силові навантаження та характер їх зміни при збільшенні кількості одночасно працюючих ступенів інструмента. Зроблено висновок про доцільну кількість одночасно працюючих ступенів комбінованого осьового інструмента.

**Ключові слова:** комбінований осьовий інструмент, режими різання, осьова сила різання, крутний момент, відведення стружки.

**М.С. СТЕПАНОВ, М.С. ІВАНОВА**

## **СИЛОВЫЕ НАГРУЗКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВОРОВ КОМБИНИРОВАННЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

Исследована осевая составляющая силы резания и крутящий момент при последовательно-параллельной схеме резки комбинированным осевым инструментом. Исследовано влияние количества ступеней комбинированного осевого инструмента на суммарные силовые нагрузки и характер их изменения при увеличении количества одновременно работающих ступеней инструмента. Сделан вывод о целесообразном количестве одновременно работающих ступеней комбинированного осевого инструмента.

**Ключевые слова:** комбинированный осевой инструмент, режимы резки, осевая сила резания, крутящий момент, отвод стружки.

**M.S. STEPANOV, MS IVANOV**

## **POWER LOADS WHEN PROCESSING HOLES WITH COMBINED AXIAL INSTRUMENT**

The axial component of cutting force and torque at the series-parallel scheme of cutting by the combined axial tool are investigated. The influence of the number of stages of the combined axial tool on the total power loads and the nature of their change with increasing number of simultaneously working stages of the tool is studied. The conclusion about the expedient quantity of simultaneously working stages of the combined axial tool is made.

**Key words:** combined axial tool, cutting modes, axial cutting force, torque, chip removal.

**Вступ.** Одним з показників, що підвищують собівартість виробу, є витрати на енергію, яка витрачається при роботі верстата. Величина енергетичних витрат при обробці отворів на металорізальних верстатах прямо пропорційно залежить від величин сил різання, які виникають внаслідок дії різальних кромки на оброблюваний матеріал. Більш того, величини сили різання та крутильного моменту є важливими характеристиками процесу обробки, від яких залежить умови роботи устаткування та інструменту, точність обробки деталі тощо.

© М.С. Степанов, М.С. Іванова, 2021

**Аналіз останніх досліджень та літератури.** При обробці ступінчастих отворів автор роботи [1] пропонує отвори діаметром більше 30 мм свердлити за два та більше переходи, спочатку свердлом меншого діаметру, далі – потрібного. В роботі [2], навпаки, для скорочення часу обробки при свердлінні ступінчастих отворів рекомендують починати свердління з отворів більших діаметрів. В роботі [3] також запропоновано при обробці лезовими інструментами виконувати видалення припусків за один або декілька переходів. Крім того, з метою зменшення величини поведення осі отвору перед свердлінням роблять попереднє засвердлювання (зацентрування) коротким жорстким свердлом.

Для підвищення продуктивності обробки ступінчастих отворів за рахунок концентрації технологічних переходів використовують комбіновані осьові інструменти (КОІ). Найбільший ступінь концентрації технологічних переходів досягається при послідовно-паралельній та паралельній схемі роботи ступенів такого інструмента. Це зменшує тривалість часу обробки, але призводить до концентрації сил різання.

**Метою статті** є дослідження осьової складової сили різання та крутного моменту при обробці отворів КОІ.

**Постановка проблеми.** Раніше [4] на базі використання енергетичного критерію була розроблена математична модель стійкості КОІ від дії всіх складових сил різання, на основі яких отримані значення критичних подач. Проте вплив конструктивних параметрів такого інструмента, а саме кількості одночасно працюючих ступенів, на силові характеристики процесу різання матеріалів недостатньо досліджено.

В умовах обробки КОІ по паралельній або послідовно-паралельній схемі різання можуть бути характерні особливості у формуванні сумарних силових параметрів (осьової сили та крутного моменту).

**Матеріали досліджень.** Процес обробки КОІ має свої особливості. Внаслідок великої кількості одночасно працюючих різальних кромки, видалення стружки відбувається у більш складних умовах, ніж при обробці стандартним осьовим інструментом, що ускладнює її виведення із зони різання та утруднює підведення ЗОР.

Різниця між діаметрами ступенів також може призвести до погіршення умов транспортування стружки і, навіть, її пакетування, що в свою чергу спричиняє утворення несприятливих умов різання із-за зростання сил тертя.

В зв'язку з вищевказаним, величина сили різання та крутний момент, що виникають при обробці КОІ, є важливими характеристиками процесу обробки отворів. При послідовно-паралельній роботі ступенів КОІ осьову складову сили різання та крутний момент можна визначити:

$$P_o = \sum_{i=1}^n P_{oi} = P_{o1} + P_{o2} + P_{o3} + \dots + P_{on};$$

$$M_{kp} = \sum_{i=1}^n M_{kpi} = M_{kp1} + M_{kp2} + M_{kp3} + \dots + M_{kpn},$$

де  $P_{o1}, P_{o2}, P_{o3}, P_{on}, M_{kp1}, M_{kp2}, M_{kp3}, M_{kpn}$  – осьова складова сили різання та крутний момент на першому, другому, третьому та  $n$ -ому ступені КОІ відповідно.

З урахуванням формул [5] для визначення осьової сили та крутого моменту при свердлінні та розсвердлюванні можемо записати:

$$\begin{aligned} P_{o\Sigma} &= 10 \cdot C_p \cdot d_1^q \cdot S^y \cdot K_p + 10 \cdot C_p \cdot \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p + \\ &+ 10 \cdot C_p \cdot \left(\frac{d_3 - d_2}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p + \dots + 10 \cdot C_p \cdot \left(\frac{d_n - d_{n-1}}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p = \\ &10 \cdot C_p \cdot S^y \cdot K_p \cdot \left[ d_1^q + \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q + \left(\frac{d_3 - d_2}{2}\right)^q + \dots + \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q \right]; \\ M_{kp} &= 10 \cdot C_M \cdot d_1^q \cdot S^y \cdot K_p + 10 \cdot C_M \cdot d_1^q \cdot \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p + \\ &+ 10 \cdot C_M \cdot d_2^q \cdot \left(\frac{d_3 - d_2}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p + \dots + 10 \cdot C_M \cdot d_{n-1}^q \cdot \left(\frac{d_n - d_{n-1}}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p = \\ &10 \cdot C_M \cdot S^y \cdot K_p \cdot \left[ d_1^q + d_1^q \cdot \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q + d_2^q \cdot \left(\frac{d_3 - d_2}{2}\right)^q + \dots + d_{n-1}^q \cdot \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q \right], \end{aligned}$$

де  $C_p, C_M, K_p, q, y$  – емпіричні коефіцієнти та показники ступеню, які залежать від умов обробки (матеріалу деталі, матеріалу інструмента, наявності ЗОР, форми заточки інструмента тощо);  $d_1, d_2, d_3, d_{n-1}, d_n$  – діаметр першого, другого, третього,  $n-1$ -го та  $n$ -го ступенів КОІ.

**Результати досліджень.** Для визначення впливу кількості одночасно працюючих ступенів КОІ типа «ступінчасте свердло» на сумарну осьову складову сили різання та сумарний крутний момент нами були проведені експерименти. Режими обробки призначалися у відповідності до даних з довідника [5] та технічних нормативів [6] для свердлення стандартними свердлами.

Результати сумарної осьової сили різання, отримані при обробці ступінчастими свердлами за послідовно-паралельною схемою різання, порівнювали з результатами осьової складової сили різання, отриманими при

свердлінні стандартними свердлами з діаметрами  $d_{св}$  рівним діаметру останнього ступеня ступінчастого свердла  $d_n$ , тобто максимальному діаметру різального ступеня (рис. 1, 2).

Аналіз графіків (див. рис. 1, 2) показує, що при послідовно-паралельній обробці отворів КОІ зі збільшенням кількості ступенів такого інструмента сумарні значення осьової складової сили різання та крутильного моменту знижуються, причому максимальний градієнт зниження спостерігається при свердлінні отворів двоступінчастим інструментом. Це явище дозволяє зробити висновок, що найбільш доцільно використовувати двоступінчасті та триступінчасті КОІ не лише з точки зору забезпечення точності (зменшення поведіння осі отвору), але і з точки зору покращення силових характеристик.

Для зниження силових навантажень з метою зменшення витрат енергії КОІ типу «ступінчасте свердло» можна також використовувати для обробки гладких наскрізних отворів. В цьому випадку загальна глибина різання розподіляється між ступенями інструменту. Нами було досліджено вплив величина діаметра першого ступеня двоступінчастих свердел з діаметром другого ступеня  $d_2 = 30$  мм на сумарні силові характеристики (рис. 3, 4).

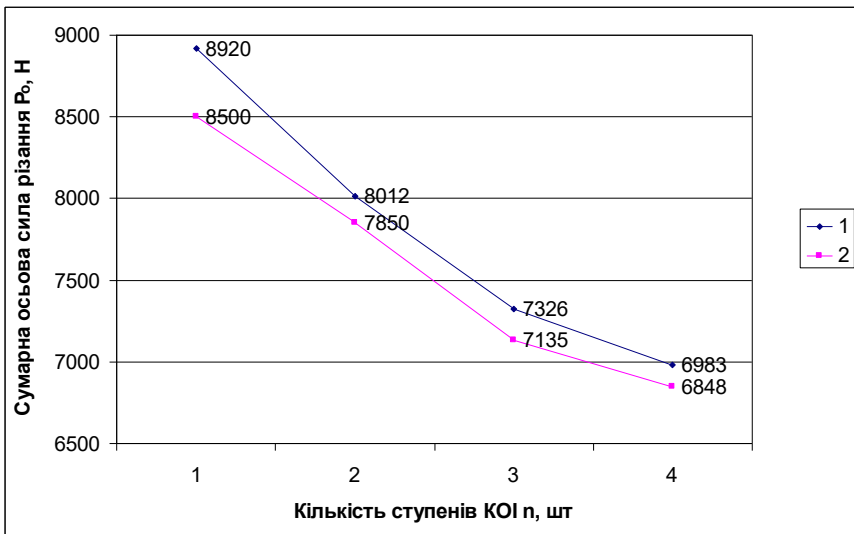


Рис. 1 – Вплив кількості ступенів КОІ на сумарну осьову складову сили різання при послідовно-паралельній обробці: 1 – матеріал заготовки сталь 45, матеріал інструмента P9K5,  $v=20$  м/хв.,  $S=0,4$  мм/об; 2 – матеріал заготовки сталь 30ХГСА, матеріал інструмента P6M5,  $v=30$  м/хв.,  $S=0,2$  мм/об

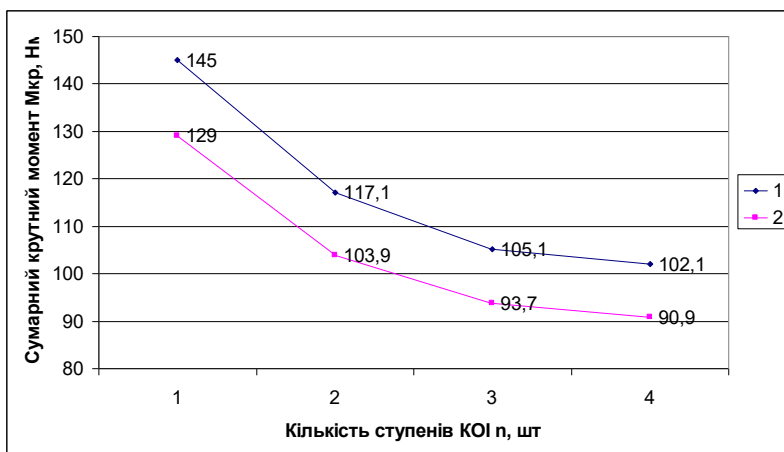


Рис. 2 – Вплив кількості ступенів КОІ на сумарний крутильний момент при послідовно-паралельній обробці: 1 – матеріал заготовки сталь 45, матеріал інструмента Р9К5,  $v=20$  м/хв.,  $S=0,4$  мм/об; 2 – матеріал заготовки сталь 30ХГСА, матеріал інструмента Р6М5,  $v=30$  м/хв.,  $S=0,2$  мм/об

Аналіз графіків (див. рис. 3, 4) показує, що діаметр першого ступеня КОІ також впливає на величину осьової складової сили різання та крутильний момент, причому зі збільшенням діаметру першого ступеня ці параметри на досліджуваних режимах різання зменшувались.

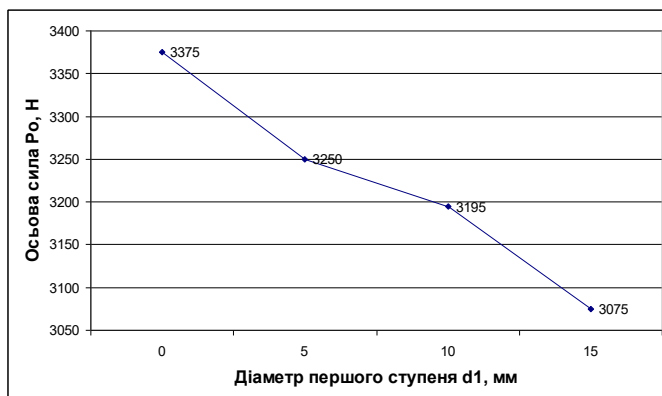


Рис. 3 – Вплив величини діаметра першого ступеня двоступінчастого свердла на сумарну осьову складову сили різання

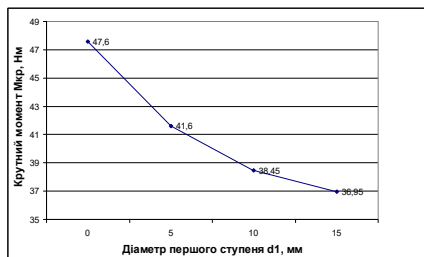


Рис. 4 – Вплив величини діаметра першого ступеня двоступінчастого свердла на сумарний крутящий момент

**Висновки.** Для зменшення силових навантажень та енергетичних витрат при обробці отворів доцільно застосовувати комбінований осьовий інструмента з кількістю ступенів не більше трьох. Причому, у разі використання, наприклад, двоступінчастого свердла, ефективне зменшення силових навантажень досягається при співвідношенні діаметрів ступені  $d_2 / d_1 \approx 2$ .

#### Список літератури

1. Новиков, Ф.В. Теоретические основы технологии машиностроения: Учеб. / Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков, Н.И. Решетов. – Одесса. : ОНПУ, 2002. – 492 с. 2. Справочник метал листа : в 5-ти т. Т. 5 / Под ред. А.Н. Малова. – М. : Машгиз, 1960. – 1184 с. 3. Новиков Ф.В. Разработка математической модели обработки отверстий в высокоточных деталях / Ф.В. Новиков, В.И. Полянский // Тези доповідей XXI міжнародн. наук.-практич. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Х. : НТУ «ХП», 2013. – С. 135. 4. Мальшко И.А. Осевые комбинированные инструменты (рекомендации по проектированию и эксплуатации) / И. А. Мальшко. – Донецк: ПКТИ, 1996. – 135 с. 5. Справочник технолога машиностроителя : в 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мецгерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение. 1985, – 496 с. 6. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ. В 2-х ч. – М. : Экономика, 1990. – 208 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Novikov, F. V, A. A. Jakimov, G. V. Novikov and N. I. Reshetov. *Teoreticheskie osnovy tehnologii mashinostroenija*. Odessa: ONPU, 2002. Print. 2. Malov, A. N. *Spravochnik metallista*. Moscow: Mashgiz, 1960. Print. 3. Novikov, F. V. and V. I. Poljanskij. "Razrabotka matematicheskoj modeli obrabotki otverstij v vysokotochnyh detaljah." *Tezi dopovidej XXI mizhnarodn. nauk.-praktich. konf. "Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja"*. Kharkov: NTU "KhPI", 2013. Print. 4. Malyshko, I. A. *Osevyje kombinirovannye instrumenty (rekommendacii po proektirovaniju i jekspluatacii)*. Doneck: PKTI, 1996. 135. Print. 5. Kosilova, A. G. and R. K. Meshherjakov. *Spravochnik tehnologa mashinostroitelja*. Moscow: Mashinostroenie. 1985. Print. 6. *Obshhemashinostroitel'nye normativy vremeni i rezhimov rezanija dlja normirovanija rabot, vypolnjaemyh na universal'nyh i mnogocelevyh stankah s ChPU*. Moscow: Ekonomika, 1990. Print.

Надійшла (received) 10.02.2021

**С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**Е.В. БАСОВА**, канд. техн. наук, науч. сотр. НТУ «ХПИ»;  
**Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;

## **РОЛЬ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

Рассмотрен алгоритм реализации технологии изготовления качественной и точной машиностроительной продукции из труднообрабатываемых материалов на базе современных CAD/CAE/CAM/CAPP-систем. Приведены особенности обработки закаленных сталей. Обоснованы перспективы энергетического подхода для определения области существования технологических режимов высокоскоростной обработки материалов. Приведены зависимости изменений физических параметров от увеличения скорости резания.

**Ключевые слова:** технология обработки, высокоскоростная обработка, CAD/CAE/CAM/CAPP-системы, труднообрабатываемые материалы, энергетический подход, режимы обработки.

**С.С. ДОБРОТВОРСЬКИЙ, Є.В. БАСОВА, Л.Г. ДОБРОВІЛЬСЬКА,**  
**РОЛЬ ВІТЧИЗНЕВОГО МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА У СУЧАСНИХ  
УМОВАХ**

Розглянуто алгоритм реалізації технології виготовлення якісної та точної машинобудівної продукції із важкооброблюваних матеріалів на базі сучасних CAD/CAE/CAM/CAPP-систем. Наведено особливості обробки загартованих сталей. Обґрунтовано перспективи енергетичного підходу для визначення сфери існування технологічних режимів високошвидкісної обробки матеріалів. Наведено залежність змін фізичних параметрів від збільшення швидкості різання.

**Ключові слова:** технологія обробки, високошвидкісна обробка, CAD/CAE/CAM/CAPP-системи, важкооброблювані матеріали, енергетичний підхід, режими обробки.

**S.S. DOBROVORSKIY, E.V. BASOVA, L.G. DOBROVOLSKAYA,**  
**THE ROLE OF DOMESTIC ENGINEERING PRODUCTION IN MODERN  
CONDITIONS**

An algorithm for implementing the technology for manufacturing high-quality and accurate engineering products from hard-to-cut materials based on modern CAD/CAE/CAM/CAPP systems is considered. The features of processing hardened steels are given. The prospects of the energy approach for determining the area of existence of technological modes of high-speed processing of materials are substantiated. The dependences of changes in physical parameters on the increase in cutting speed are given.

**Key words:** processing technology, high-speed processing, CAD/CAE/CAM/CAPP systems, hard-to-cut materials, energy approach, processing modes.

**Введение.** Качество и точность обработки сложнопровильных поверхностей деталей зависят как от кинематических характеристик оборудования, так и от динамической, термической и статической устойчивости технологической системы. В условиях современного состояния отечественного машиностроительного производства чистовая обработка поверхностей деталей из

сложнообрабатываемых материалов, в том числе и из закаленных сталей, обеспечивается в основном абразивной обработкой. До последнего времени это объяснялось разным уровнем оборудования для шлифования и лезвийной обработки. Станки токарной и фрезерной групп не могли обеспечить точность и качество обработки, которые достигались при абразивных операциях. Кроме того технологический процесс изготовления сложнопрофильной продукции требовал применения большого количества инструмента, схем закрепления и базирования, и соответственно большого количества вспомогательных приспособлений, что негативно сказывалось на качестве и точности обработки. Однако с появлением нового поколения оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), которое имеет достаточную точность перемещений и жесткость технологической системы, перспектива высококачественной и высокоточной токарной и фрезерной обработки сложнообрабатываемых материалов с минимальным количеством переустановок.

**Анализ работ и источников информации.** Анализ современных источников информации показывает [1], что при реализации технологии высокоскоростной обработки (ВСО) на обрабатывающих центрах (ОЦ) повышенная локальная устойчивость процесса резания возникает тогда, когда частота импульсов врезания инструмента в материал больше собственной частоты колебаний самого нежесткого элемента технологической системы СПИЗ, как правило – инструмента. Для обеспечения жесткости инструмента при ВСО на ОЦ рекомендуется использовать современные термопатроны.

ВСО закаленных сталей – отдельная задача, которая требует глубокого изучения.

Анализа современных источников информации подчеркивает, что на сегодняшний день существует много исследований по лезвийной механообработке, однако мало практических работ, которые направлены на изучение физических и механических особенностей обработки закаленных сталей. Отсутствие понимания физико-механических процессов в зоне обработки привело к разрозненности в рекомендациях производителей режущего инструмента. В работах [2-6] сформулированы и аргументированы принципиальные отличия обработки закаленной стали:

- при обработке закаленной стали формирование суставчатой (пилообразной) стружки происходит за счет надлома обрабатываемого материала. То есть формирование разрыва материала происходит на открытой поверхности в тот момент, когда обрабатываемый материал достигает предельного напряжения сдвига. Следовательно, именно надлом отвечает за процесс стружкообразования;

- не смотря на то, что стружка надлома, полученная посредством адиабатического сдвига при резании труднообрабатываемых материалов, подобна суставчатой стружке, полученной при механообработке закаленной стали, - это два разных вида стружки, так как они имеют разные механизмы формирования;



- процесс стружкообразования характеризуется малым углом сдвига материала в плоскости обработки. Угол сдвига уменьшается с увеличением твердости обрабатываемого материала и слабо зависит от переднего угла режущей кромки инструмента;

- при обработке закаленной стали радиальная составляющая силы резания больше касательной, и эта разница увеличивается с развитием износа инструмента по задней поверхности режущей кромки. Это объясняется свойствами упругости обрабатываемого материала. Большое значение радиальной составляющей силы резания является первопричиной возникновения погрешности обеспечения точности при обработке деталей из закаленных сталей;

- тангенциальная и радиальная составляющие силы резания зависят от величины переднего угла режущей кромки инструмента. Отмечается, что при значении переднего угла режущей кромки в  $0^\circ$  твердость обрабатываемого материала не влияет на составляющие силы резания, однако при величине угла  $-20^\circ$  и неизменной твердости материала значения компонент силы резания уменьшается;

- тангенциальная и радиальная составляющие силы резания зависят от износа инструмента по задней поверхности режущей кромки неодинаково. При увеличении износа по задней поверхности в диапазоне  $(0 \div 0,2)$  мм, радиальная составляющая силы резания увеличилась в 4 раза.

Учитывая сложность разработки конкурентоспособной технологии обработки закаленной стали необходимо учесть ряд вопросов, которые требуют глубокого понимания и изучения: во-первых, наличие угла режущей кромки при обработке хрупкого материала и его корреляция с направлением распространения разрушения с точки зрения технологии машиностроения может обеспечить целостность и износостойкость деталей машин в процессе эксплуатации; во-вторых, для обеспечения качества рабочих поверхностей необходимо понимание природы источников высокой температуры в зоне обработки закаленной стали, ее влияние на процесс резания, и как результат на формирование физико-механических характеристик обработанного материала и др.

**Цель исследования.** Целью работы является рассмотрение основных этапов создания конкурентоспособной технологии качественной и точной обработки сложнопрофильных деталей из труднообрабатываемых материалов в условиях развития отечественного машиностроения.

**Постановка задачи.** В результате оптимизации цен на ОЦ, расширение номенклатуры сложнопрофильных деталей, более эффективного программирования, а также целого ряда преимуществ многокоординатной обработки по сравнению с другими видами изготовления промышленной продукции появилась необходимость в поиске новых технологических решений обработки сложнопрофильных деталей с учетом всех этапов от проектирования до изготовления продукта в условиях автоматизированного производства с применением современных CAD/CAE/CAM/CAPP-систем.

Создание новой технологии должно учитывать необходимость определения области существования технологических режимов высокоскоростной обработки на этапе планирования техпроцесса изготовления детали, что позволит минимизировать или даже исключить дорогостоящие испытания и отработку режимов.

**Выбор и обоснование рациональной структуры процесса изготовления деталей из закаленных сталей.** Разработка конкурентоспособной технологии изготовления сложнопрофильных деталей из закаленных сталей с применением технологии ВСО требует рассмотрения комплекса технологических решений от проектированию высокоточных CAD-моделей, до их изготовления на современных ОЦ.

I ЭТАП: CAD (3D) объемное моделирование – основа создания конкурентоспособной технологии. Задача этого этапа создание CAD моделей деталей, точность которых раз в 10 выше, чем допуск чистовой обработки.

Наши исследования показывают, что достичь точности моделей возможно посредством описания сложнопрофильных поверхностей nurbs-кривыми и spline-кривыми 5-го порядка, так как 4-ый порядок является не достаточным для обеспечения точности описания поверхности, а 6-й – характеризуется наличием большого количества ошибок при сшивке сегментов сплайна.

Разработка высокоточных 3D CAD-моделей позволяет получить высокоточную конструкторскую документацию на изделие.

II ЭТАП: CAE-анализ на базе методов конечных элементов. Целью данного этапа является определение области существования рациональных режимов обработки закаленной стали. Для достижения цели необходимо изучение процесса резания, т.е. рассмотрение физико-механических особенностей процесса обработки закаленной стали. Для обеспечения точности обработки детали необходим прочностной расчет процесса обработки детали в условиях закрепления на ОЦ. Во избежание брака при изготовлении дорогостоящей продукции, необходима проверка точности работы механизма в сборке.

В процессе выполнение этого этапа нам удалось установить, что чем меньше энергии потребляется на начальный процесс резания, и чем быстрее достигается энергетический пик процесса механообработки, тем стабильнее дальнейшее течение и разрушение материала [7]. Такой результат дал нам основание для разработки подхода к определению области существования технологических режимов высокоскоростной обработки металлов, в том числе и закаленных сталей, на базе МКЭ.

Мы провели ряд экспериментов с применением имитационного моделирования процесса ВСО закаленной стали 38Х2МЮА в среде 3D CAE-модуля [8], моделирование велось с изменением глубины резания от 0,1 до 0,3 мм (рис. 1).

Из результатов моделирования установили, что диапазон существования режимов ВСО находится в ограниченной области глубин резания (для

закаленной хромомолибденовой стали  $h=(0.1\div 0,2)$ ). С превышением глубины резания, выше критической, тепловые потоки в зоне обработки растут и превышают предельно допустимые значения, что, в свою очередь, может привести к появлению прижогов и неблагоприятных напряжений растяжения в нарушено-деформированном слое материала. Кроме того, результатом превышения глубины резания является нарушение условия пластического течения материала, при котором реализовываются условия разрушения материала при ВСО (рис. 1) [9].

III ЭТАП: САРР-автоматизированная система технологической подготовки производства. На этом этапе разработки технологии с ВСО необходимо выполнить выбор и обоснование рационального маршрута обработки сложнопрофильной детали, на основании заданной модели изделия, выполненной в САД-системе и с учетом возможностей ОЦ, режущего инструмента и результатов исследований, полученных из САЕ-анализа.

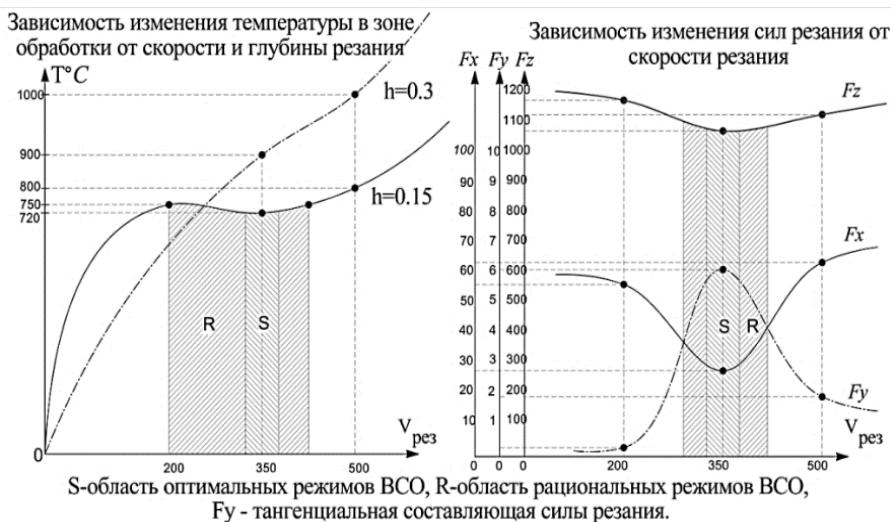


Рис. 1 – Зависимость изменений физических параметров от скорости резания

Выбор рационального маршрута технологического процесса изготовления сложнопрофильных деталей из труднообрабатываемых сталей зависит от требуемых качественных характеристик, выдвигаемых к рабочим поверхностям готового изделия. От выбора ТП зависит стоимость изготовления продукции.

IV ЭТАП: разработка САМ-программы. Этот этап требует разработки высокоточных и высококачественных траекторий перемещения инструмента на современных ОЦ. Возможности универсальных станков и устаревшего оборудования с ЧПУ крайне ограничены для реализации ВСО. При

разработке высокоточных алгоритмов и управляющих программ, пригодных для современных систем с ЧПУ необходимо учитывать перемещение инструмента, таким образом, чтоб исключить зарезание прилежащих поверхностей. Разработка высокоточных траекторий возможна при реализации описания траектории перемещения инструмента посредством *nurbs*-интерполирования, либо кривыми 5-го порядка по высокоточным САД-моделям детали. Разработка высокоточных управляющих программ (УП) позволяет получить точность при 5<sup>м</sup>-координатной обработке равной 10-11 мкм, при позиционной обработке (3+2) – достигаемая точность равна 4-5 мкм.

V ЭТАП: изготовление сложнопрофильных деталей на современном оборудовании. На этом этапе выполняют обработку сложнопрофильной детали на основании полученных результатов предварительных этапов из CAD/CAE/CAPP/CAM-систем.

VI ЭТАП: измерение готового изделия с помощью автоматизированной системы измерения станка.

Реализация такой технологии перспективна в условиях единичного и мелкосерийного производства.

**Выводы.** Учет всех равнозначно важных этапов от проектирования до изготовления детали на современных обрабатывающих центрах с применением современных CAD/CAE/CAM/CAPP-систем, является единственным направлением разработки высококачественной технологии, которая позволит получить конкурентоспособную продукцию и, одновременно, оптимизировать затраты на ее изготовление.

#### Список литературы

1. *Schmitz T.L. High-Speed Machining Frequency Response Prediction for Process Optimization / T.L. Schmitz, M. Davies, M. Kennedy // In Proceedings of the 2nd International Seminar on Improving Machine Tool Performance, July 2000. North Carolina, – 2000. – 25 p.*
2. *Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. / В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 590 с.*
3. *Внуков Ю. Н. Особенности расчета составляющих силы резания при торцевом фрезеровании сферическими фрезами / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць НТУ «ХП». – Вып.5.- X., 2010. – С. 12-17.*
4. *Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Язочкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.*
5. *Яцерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Яцерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Минск: Высшая школа, 1990. – 512 с.*
6. *Аришинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент / В.А. Аришинов, Г.А. Алексеев. – М.: Машиностроение, 1976. – 440 с.*
7. *Добротворский С.С. Моделирование процесса высокоскоростного фрезерования закалённых сталей методом конечных элементов / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, С.А. Щучев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2012. – Вып.55. – С. 20-27.*
8. *Добротворский С.С. Исследование влияния технологических параметров процесса высокоскоростного фрезерования на качество обработки закалённых сталей / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Р.И. Соломатин / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2012. – Вып.60. – С. 54-62.*
9. *Басова Е.В. Технологическое обеспечение качества и точности поверхностей деталей из закалённых хромомолибденовых сталей методом*

### Bibliography (transliterated)

1. Schmitz T.L., Davie M., Kennedy M. High-Speed Machining Frequency Response Prediction for Process Optimization. In Proceedings of the 2nd International Seminar on Improving Machine Tool Performance, July 2000. North Carolina, – 2000. – P.25
2. Poduraev V.N. Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov. – Moscow: Vysshaja shkola, 1974. – 590 p.
3. Vnukov Ju.N., Sarzhinskaja A.G. Osobennosti rascheta sostavljajushhijh sily rezanija pri torcevom frezerovanii sfericheskimi frezami. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac' NTU «HPI». – Vol.5. - Kharkov, 2010. – 12-17.
4. Sulima A.M., Shulov V.A., Jagodkin Ju.D. Poverhnostnyj sloj i jekspluacionnyje svojstva detalej mashin. – Moscow: Mashinostroenie, 1988. – 240 p.
5. Jashhericyn P.I., Eremenk M.L., Fel'dshtejn E.Je. Teorija rezanija. Fizicheskie i teplovye processy v tehnologicheskijh sistemah. – Minsk: Vysshaja shkola, 1990. – 512 p.
6. Arshinov V.A., Alekseev G.A. Rezanie metallov i rezhushhij instrument. – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 440 p.
7. Dobrotvorskij S.S., Basova E.V., Shhuchev P.A. Modelirovanie processa vysokoskorostnogo frezerovanija zakaljonnyh stalej metodom konechnykh jelementov. Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr. – Kharkov: Nac. ajerokosm. un-t «HAI», 2012. – Vol.55. – P. 20-27.
8. Dobrotvorskij S.S., Basova E.V., Solomatin R.I. Issledovanie vlijanija tehnologicheskijh parametrov processa vysokoskorostnogo frezerovanija na kachestvo obrabotki zakalennyh stalej. Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr. – Kharkov.: Nac. ajerokosm. un-t «HAI», 2012. – Vol.60. – P. 54-62.
9. Basova E.V. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva i tochnosti poverhnostej detalej iz zakalennyh hromomolibdenovyh stalej metodom vysokoskorostnogo frezerovanija: dis.... канд. техн. наук : 05.02.08 / Басова Евгения Владимировна. – Харьков, 2014. – 236 с. – Библиогр. : с. 214–226.

*Посмунна (received) 30.01.2021*

**Н.Р. ВЕСЕЛОВСЬКА**, д.т.н., проф. ВНАУ, Вінниця;  
**О.А. ПЕРМЯКОВ**, д.т.н., проф. НТУ «ХПІ»

## МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Основна ідея роботи полягає в розробці принципово нового підходу до моніторингу верстатного комплексу механічної обробки, сутність якого полягає в організації методики керування процесом механічної обробки на основі єдиного інтегрованого інформаційного середовища адаптованого до універсального комплексу комп'ютерного моделювання Matlab/Stateflow та Matlab/Simulink, при структурному поданні всіх складових процесу механічної обробки та моделювання як інструменту розв'язання задачі, що розширює функціональні можливості верстатних комплексів.

**Ключові слова:** верстатний комплекс, функціональні можливості, моніторинг, калібрування обладнання, процес механічної обробки, інформаційний, матеріальний та енергетичний потоки, багатоцільові та багатокоординатні верстати, верстати з паралельною кінематикою.

### **Н.Р. ВЕСЕЛОВСКАЯ, О.А. ПЕРМЯКОВ** **МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Основная идея работы заключается в разработке принципиально нового подхода к мониторингу станочного комплекса механической обработки, сущность которого заключается в организации методики управления процессом механической обработки на основе единой интегрированной информационной среды, адаптированной к универсальному комплексу компьютерного моделирования Matlab/Stateflow и Matlab/Simulink, при структурном представлении всех составляющих процесса механической обработки и моделирования как инструмента решения задачи, расширяющей функциональные возможности станочных комплексов.

**Ключевые слова:** станочный комплекс, функциональные возможности, мониторинг, калибровка оборудования, процесс механической обработки, информационный, материальный и энергетический потоки, многоцелевые и многокоординатные станки, станки с параллельной кинематикой.

### **N.R. VESELOVSKAYA, O.A. PERMYAKOV** **MONITORING THE MACHINING PROCESS**

The main idea of the work is to develop a fundamentally new approach to monitoring the machine tool complex of machining, the essence of which is to organize a method for controlling the machining process based on a single integrated information environment adapted to the universal computer simulation complex Matlab/Stateflow and Matlab/Simulink, with a structural representation all components of the process of machining and modeling as a tool for solving a problem that expands the functionality of machine tools.

**Key words:** machine complex, functionality, monitoring, equipment calibration, machining process, information, material and energy flows, multi-purpose and multi-coordinate machines, machines with parallel kinematics.

**Постановка проблеми.** Проблема забезпечення необхідної якості та експлуатації властивостей деталей машин набуває в машинобудуванні все більш важливого значення.

© Н.Р. Веселовська, О.А. Пермяков, 2021

Проте до теперішнього часу не розроблені узагальнені теоретичні залежності між параметрами якості поверхні, точністю обробки, експлуатаційними властивостями деталей і параметрами процесів механічної обробки, що дозволяють вирішувати задачу технологічного забезпечення заданих експлуатаційних властивостей деталей. Керування процесом формування поверхні з необхідними властивостями здійснюється переважно шляхом використання часткових експериментальних залежностей і таблиць режимів обробки. Складність проблеми полягає в тому, що при обробці деталей необхідно встановити такі умови обробки, які б забезпечували комплекс вимог щодо зносу інструменту, точності обробки, характеристикам якості поверхні, продуктивності тощо. Області найбільш ефективного використання виробничих систем перш за все визначаються технологічним обладнанням, яке є складовою частиною системи, номенклатурою оброблюваних деталей та автоматизованою системою керування.

**Основна частина.** Розробку системи моніторингу режиму механічної обробки слід починати з визначення критерію оптимізації на основі техніко-економічного аналізу [3, 4, 6, 7]. На практиці найчастіше застосовуються критерії продуктивності та собівартості, які включають залежність стійкості інструменту від параметрів різання. В результаті оптимізації за цими критеріями знаходяться умови, які забезпечують максимальні (у першому випадку) і мінімальні (у другому випадку) значення даних критеріїв в певних ситуаціях. Такими умовами в багатьох ситуаціях виступають певні значення стійкості інструменту. Проте на виробництві часто ставиться задача знаходження максимально можливої продуктивності або мінімально можливої собівартості механічної обробки при заданих значеннях стійкості.

Останніми роками були зроблені спроби розробити інші залежності зносу або стійкості інструменту від параметрів різання. Проте розрахунки оптимальних режимів різання зручніше виконувати за цільовою функцією оптимізації, що є основою нормативів, за якими визначаються режими механічної обробки майже в усіх галузях машинобудування. Тому подальші обчислення будуть проводитися з використанням формули

$$P_v = \frac{bhs}{1 + \tau_{cm} (h^{x_v} \frac{318c_v k_v D^{q_v-1}}{z^{u_v-y_v} b^{r_v}} s^{y_v} n^{1-y_v})^{1/m}}, \quad (1)$$

де  $\frac{318c_v k_v D^{q_v-1}}{z^{u_v-y_v} b^{r_v}} = A_1$ ,  $c_v$  – постійна величина для певної групи оброблюваних матеріалів;  $k_v$  – коефіцієнт, залежний від властивостей оброблюваного матеріалу, ріжучою частини інструменту і від типу рідини, що змащує-охолоджує;  $D$  – діаметр фрези або заготовки;  $n$  – частота обертання, об./хв.;  $sz = s/(nz)$  – подача, мм/об., мм/зуб.;  $z$  – число зубців фрези;  $h$  і  $b$  – глибина і ширина різання, мм;  $x_v$ ,  $y_v$ ,  $r_v$ ,  $q_v$ ,  $u_v$ ;  $m$  – показники мір, залежні від

властивостей інструменту і умов різання (значення цих показників і коефіцієнтів  $c_v$  і  $k_v$  містяться у відповідних довідниках).

Для різних видів обробки значення  $c_v$ ,  $k_v$  і показників мір змінних різні. Крім того, показники  $x_v$ ,  $y_v$ ,  $r_v$ ,  $q_v$ ,  $u_v$ , використовуються не у всіх видах механічної обробки.

Вхідними даними моделі є електронний образ деталі, який включає геометричні та конструктивні параметри. Як приклад на рис. 1 наведена реалізація електронної моделі виробу (корпусу гідрозподільника) засобами САПР AutoDESK Inventor [5].

Створена система описує всі зазначені вище потоки і відображає такі дії: декомпозицію електронного образу і перетворення його в процес механічної обробки, який відображає система; отримання оптимізованого процесу механічної обробки (шляхом моделювання); вибір в залежності від поточного стану системи маршруту обробки; складання моделі виробничої системи обробки із підсистем; декомпозицію геометричного образу деталі, отриманого із системи автоматизованого проектування; декодування керівної програми для системи числового програмного управління, отриманої із системи адаптивного управління; вибір і призначення інструменту; моніторинг стану процесу обробки на верстаті тощо.

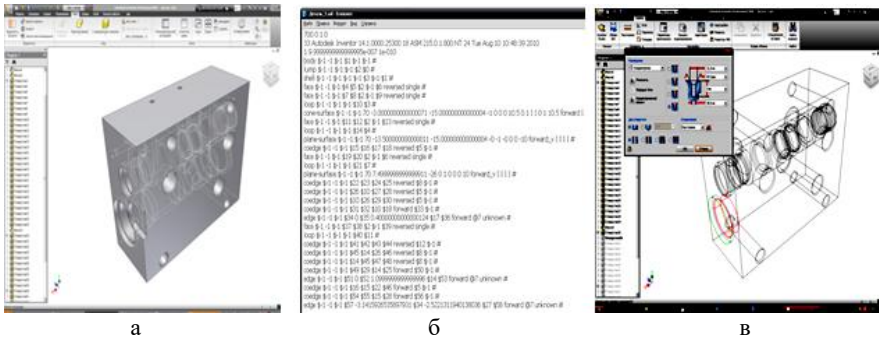


Рис. 1 – Електронний образ деталі: а - 3D модель корпусу розподільника; б - фрагмент текстового файлу, в - параметрична модель корпусу; що містить опис геометрії та елементів деталі

Оптимізація технології обробки деталі на верстаті здійснюється за класичною методикою на основі критерію максимальної продуктивності обробки. У верстатів традиційних схемних рішень задаються і вимірюються порівняно прості графічні об'єкти: лінії, площини, циліндри, які відповідають простим рухам, а верстаті паралельної кінематики мають складні елементарні рухи контроль яких є утруднений. Тому розроблено подійно-орієнтований граф станів процесу обробки, який реалізований за допомогою комплексу Stateflow [2].



Оптимізація процесу обробки деталі на верстаті здійснюється за методикою, що базується на основі критерію максимальної продуктивності обробки. Конструктивними та технологічними обмеженнями виступають найменша можлива частота обертання фрези  $n_{o\ min}$ , при якій погіршуються умови отримання стружки і з'являється нарост, найбільша можлива частота обертання фрези  $n_{o\ max}$ , що визначається конструктивно заданою верхньою межею діапазону та величиною  $n_{o\ max}$ , при перевищенні якої відбувається швидкий знос і руйнування інструменту внаслідок його нагрівання, найбільша подача на зубець  $s_{z1\ max}$ , обмежена допустимою чистотою обробки та міцністю інструменту, найбільша і найменша подачі  $s_{min} \leq s \leq s_{max}$  зміни частоти обертання приводу подачі. Допустимий момент на інструменті  $M \leq \min(M_{1\phi}, M_{2\phi})$ , що визначається міцністю інструменту і механізмів верстата (рис. 2). Особливістю оптимізації процесу механічної обробки на верстаті паралельної кінематики є те, що подача  $S_z$  здійснюється одночасними переміщеннями декількох кінематичних ланок. Тому оптимізацію процесу обробки доводиться здійснювати в два етапи. На першому визначати необхідні технологічні показники процесу обробки ( $s_z$ ,  $h$  і  $b$ ,  $n_d$ ). На другому етапі за визначеним значенням  $s_z$  визначати оптимальний розподіл переміщень кожного кінематичного ланцюга, необхідних для реалізації визначеного  $s_z$ . За цільову функцію обрано мінімум суми робіт, виконаних на кожному переміщенні:

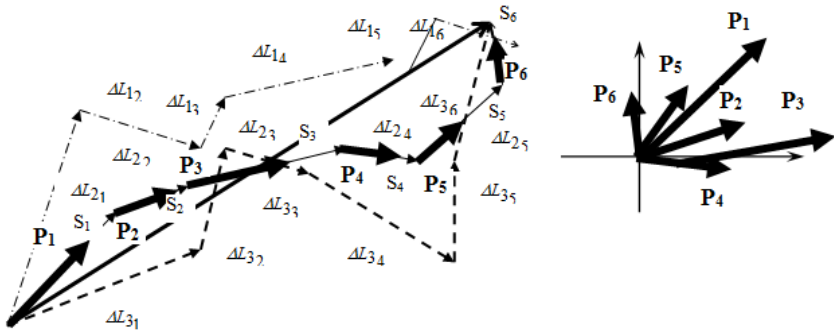


Рис. 2 – Варіанти траєкторій координатних рухів приводів верстата паралельної кінематики

За конструктивні обмеження на цьому етапі приймаються геометричні характеристики робочого простору верстата (здатність приводу забезпечити необхідне значення переміщення під заданим кутом), похибка апроксимації траєкторії переміщення (що визначається мінімальною дискретністю переміщень приводів) та максимально допустимі зусилля, що розвиваються приводами переміщення [1, 3, 5]. Просторова система верстата паралельної кінематики є статично невизначеною системою. Для визначення навантажень, що виникають в приводах подач верстата, необхідно створювати та

реалізувати його математичну модель. Моделювання руху платформи верстата паралельної кінематики здійснюється за допомогою пакета Simulink математичної системи Matlab. Розрахунок здійснюється за допомогою блоків розширення пакета SimMechanicsP. Пакет розширення SimMechanics системи Simulink призначений для фізичного моделювання. Його мета - технічне проектування та моделювання механічних систем (в межах законів теоретичної механіки). Модель механізму створюється на основі задання інерційних параметрів його рухомих частин.

Найпростіший спосіб визначення цих параметрів - використання твердотільної моделі механізму (рис 3), створеної за допомогою CAD системи. SimMechanics дозволяє моделювати поступальний та обертовий рух в трьох площинах. SimMechanics містить набір інструментів для задання параметрів ланок (маса, моменти інерції, геометричні параметри), кінематичних обмежень, локальних систем координат, способів задання і вимірів параметрів руху. SimMechanics дозволяє створювати моделі механічних систем подібно іншим Simulink-моделям у вигляді блок-схем.

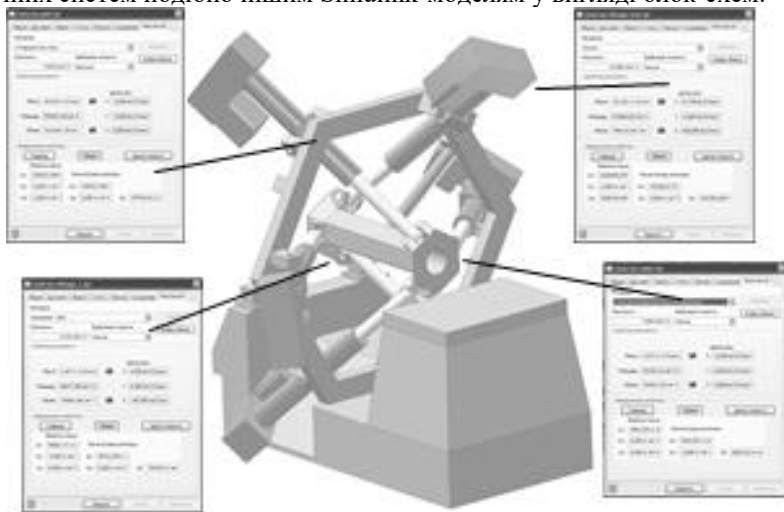


Рис.3 – Твердотільна модель механізму, створеної за допомогою CAD системи

На рис. 4 наведено процедури розрахунку кінематичних і силових параметрів верстата паралельної кінематики та геометрична модель механізму. В моделі передбачено задання двох основних видів навантаження – обробка осьовими інструментами (свердла, зенкери, розвертки) та фрезами (кінцевими, канавковими, грибокними). Моделювання руху платформи здійснюється за принципом зворотної динаміки. Геометричні характеристики руху визначаються на основі точної геометричної моделі. А далі в розраховані координати вноситься

поправка, яка враховує динамічні явища, що виникають при русі внаслідок інерційних властивостей самої платформи і ланок приводів.

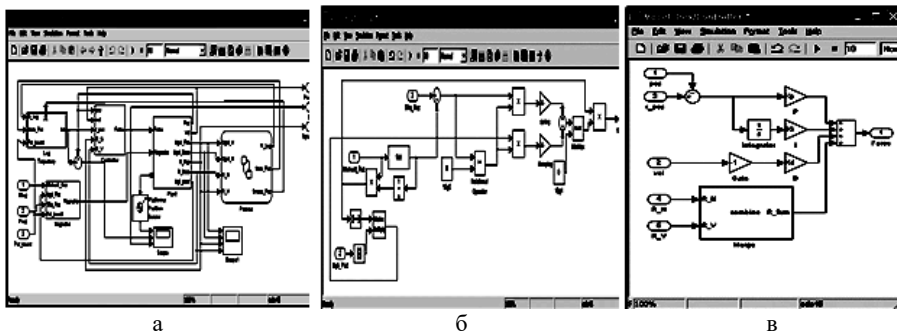


Рис. 4 – Математична модель розрахунку параметрів верстата: а - головний модуль процедури; б - модуль задання навантаження платформи; в - модуль визначення навантаження в приводі лінійного переміщення штанги

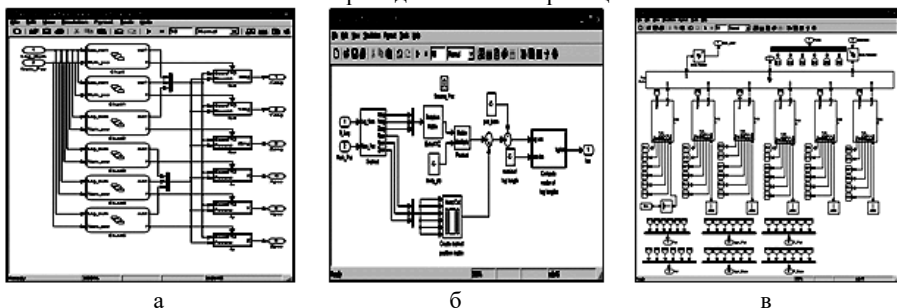


Рис. 5 – Математичні моделі розрахунку координат траєкторії руху платформи: а - модуль задання; б - модуль розрахунку; в - модуль моделювання

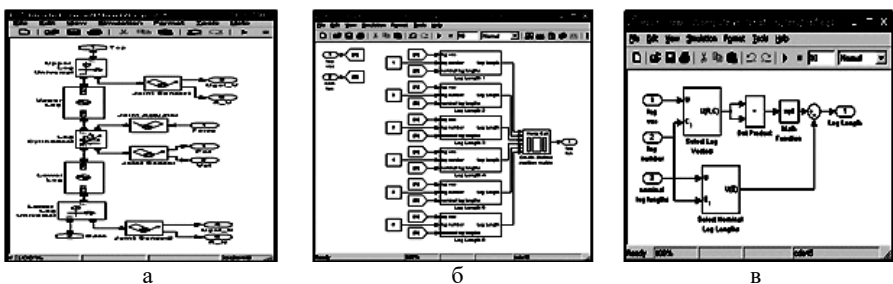
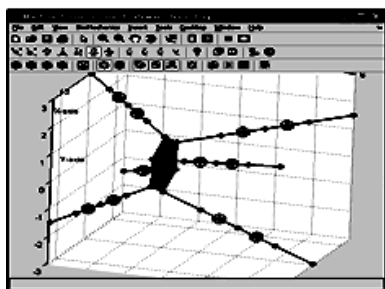
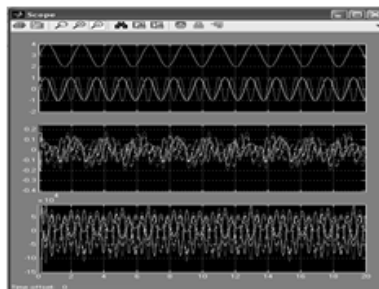


Рис.6 – Математичні моделі визначення переміщень штанги: а - модуль моделювання руху штанги; б - модуль визначення поточної довжини штанг механізму; в - модуль розрахунку поточної довжини і-ої штанги



а



б

Рис. 7 – Результати моделювання: а - візуалізація результатів моделювання; б - результати моделювання руху платформи

На основі розрахунку параметрів руху приводної штанги платформи визначаються кути нахилу штанги, реакції в шарнірах та приводах переміщення штанг механізму. Моделі, що використовують блоки функцій пакета SimMechanics, є універсальними і дозволяють створювати моделі нових механізмів просто заміною деяких модулів.

**Висновки** Використання даного інструменту дозволяє автоматизувати процес програмування і модифікації та налаштувань системи ЧПК з метою зниження трудомісткості проведення контрольних робіт. Використання результатів роботи суттєво підвищить показники ефективності та надійності виробничих систем механообробки і дозволить ввести корекцію в план-графіки роботи автоматизованої лінії, що забезпечує більш ефективне її використання і зниження енергозатрат. Встановлені умови обробки забезпечують вимогу до зносу інструменту, точності обробки, характеристик якості поверхні, продуктивності.

### Список літератури

1. *Веселовська Н.Р.* Подійно-орієнтований графо-аналітичний опис елементів гнучких інтегрованих виробничих систем/ *Н. Р. Веселовська* // Всеукраїнський НТЖ «Вібрації в техніці та технологіях». - 2010. - №1(57). - С.43-53. 2. *Метьюз Д. Г.* Численные методы. Использование MATLAB / *Метьюз Д. Г., Финк К. Д.* - 3-е изд. - М.: Изд. Дом "Вильямс", 2001. - 720 с. 3. *Митрофанов В.Г.* САПР в технологии машиностроения / *В.Г. Митрофанов, О.Н. Калачев., А.Г. Схиртладзе* и др. - Ярославль. Изд. ЯрГТУ.1995. -298 с. 4. *Струтинський В.Б.* Загальні методи діагностування та принципи підвищення надійності технологічних систем та процесів/ *В. Б. Струтинський, Н. Р. Веселовська* // Всеукраїнський НТЖ «Вібрації в техніці та технологіях». - 2007. - №4(49). - С.81-85. 5. *Петраков Ю.В.* Пути развития интегрированных CAD/CAM систем в машиностроении / *Ю.В. Петраков* // Сучасні технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ «ХП». - 2009. - №3. - С.160-167. 6. *Пермяков А.А.* Компонетика многопозиционных агрегатированных технологических систем механообработки / *А.А. Пермяков* // Східно-Європейський журнал передових технологій. - Харків. - 2005. - Вып.3/1(15). - С.9-17. 7. *Пермяков А.А.* Об экономии электроэнергии и ее нормировании в механообработке / *А.А. Пермяков, А.С. Забара* // Вісник Національного технічного університету «ХП». - Харків: НТУ «ХП». - 2009. - №1. - С.43-51.

### Bibliography (transliterated)

- 1.** *Veselov's'ka N.R.* Podijno-oriyentovany`j grafo-anality`chny`j opy`s elementiv gnuchky`x integrovany`x vy`robn`chy`x sy`stem. Vseukrayins`ky`j NTZh «Vibraciyi v texnici ta tehnologiyax».- 2010.- No1(57).-P.43-53. **2.** *Met`juz D.G., Fink K.D.* Chislennye metody. Ispol'zovanie MATLAB - 3-e izd. - Moscow: Izd. Dom "Vil'jame", 2001. - 720 P. **3.** *Mitrofanov V.G., Kalache O.N., Shirladze A.G. i dr.* SAPR v tehnologii mashinostroenija. - Jaroslavl'. Izd. JarGTU.1995. -298 P. **4.** *Struty`ns`ky`j V.B., Veselov's'ka N. R.* Zagal`ni metody` diagnostuvannya ta pry`ncy`py` pidvy`shhennya nadijnosti tehnologichny`x sy`stem ta procesiv. Vseukrayins`ky`j NTZh «Vibraciyi v texnici ta tehnologiyax».- 2007. - No4(49). - P.81-85. **5.** *Petrakov Yu.V.* Puty` razvy`ty`ya y`ntegry`rovany`x CAD/CAM sy`stem v mashy`nostroeny`y`. Suchasni tehnologiyi v mashy`nobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2009. – No3. – P.160-167. **6.** *Permyakov A.A.* Komponenty`ka mnogopozu`cy`onny`x agregaty`rovanny`x tehnology`chesky`x sy`stem mexanoobrabotky`. Sxidno-Yevropejs`ky`j zhurnal peredovy`x tehnologij. – Kharkiv. – 2005. – Vol.3/1(15). – P.9-17. **7.** *Permjakov A.A., Zabara A.S.* Ob jekonomii jelektroenergii i ee normirovanii v mehanoobrabotke. Visnik Nacional'nogo tehničnogo universiteta «KhPI». - Kharkiv: NTU "KhPI". - 2009. - No1. - P.43-51.

*Надійшла (received) 15.012021*

**Ю. А. СИЗЫЙ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**Д. В. СТАЛИНСКИЙ**, д-р техн. наук, ген. д-р, Укр ДНТЦ  
«Енергосталь», Харьков;

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБИНЫ ОБДИРОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ

В статье представлена модель динамической системы обдирочного шлифования (ДСОШ) с воздействием на нее кривизной проката и прерывистой поверхностью шлифовального круга. Анализ модели динамической системы обдирочного шлифования выполнен прямым моделированием на компьютере и посредством амплитудно-частотной характеристики системы. Этот анализ позволяет назначать условия обдирочного шлифования для достижения требований к качеству проката после обдирочного шлифования.

**Ключевые слова:** обдирочное шлифование, динамика, моделирование, шлифовальный круг, прокат.

### Ю. А. СИЗИЙ, Д. В. СТАЛИНСЬКИЙ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЛУБИНИ ОБДИРОВОГО ШЛІФУВАННЯ

У статті представлена модель динамічної системи обдирного шліфування (ДСОШ) із впливом на неї кривизною прокату та переривчастою поверхнею шліфувального кола. Аналіз моделі динамічної системи обдирного шліфування виконаний прямим моделюванням на комп'ютері та за допомогою амплітудно-частотної характеристики системи. Цей аналіз дозволяє призначати умови обдирного шліфування для досягнення вимог до якості прокату після обдирного шліфування.

**Ключові слова:** обдирне шліфування, динаміка, моделювання, шліфувальне коло, прокат.

### Yu. A. SIZY, D. V. STALINSKY RESEARCH OF THE DEPTH OF GRINDING

The article presents a model of a dynamic rough grinding system (DSOS) with the impact on it of the curvature of the rolled product and the discontinuous surface of the grinding wheel. The analysis of the model of a dynamic system for rough grinding is carried out by direct simulation on a computer and by means of the amplitude-frequency characteristic of the system. This analysis allows you to assign rough grinding conditions to achieve the quality requirements for rolled products after rough grinding.

**Key words:** rough grinding, dynamics, modeling, grinding wheel, rolling.

**Введение.** Обдирочное шлифование – шлифование проката для удаления дефектного поверхностного слоя производится по упругой схеме, то есть при постоянном усилии прижима круга к прокату, которая должна обеспечить постоянную, необходимую глубину шлифования.

**Обзор проблемы.** Если шлифуется сортовой прокат прямоугольного или шестигранного сечения, который имеет кривизну, то усилие прижима круга  $P_y$  к прокату будет колебаться в связи с инерционностью деталей и узлов обдирочно-шлифовального станка (ОШС) в нормальном направлении к зачищаемой поверхности.

©Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский, 2021

Колебания  $P_y$  ведут к колебанию глубины шлифования, которая ограничивается требованиями на операцию зачистки.

Если для зачистки проката применяют круг с прерывистой режущей поверхностью для снижения температуры нагрева проката, то будет также иметь место колебание глубины шлифования.

Колебания глубины шлифования, возбуждаемые кривизной проката исследованы в [1], а возбуждаемые прерывистой поверхностью круга в [2]. Однако, в обоих случаях модель ОШС двумерная. В первом случае это прокат и шлифовальная бабка, а во втором прокат и круг на шпинделе станка.

**Цель работы.** В настоящей статье дискретность представления ОШС увеличивается до трехмассовой «прокат-круг-шпиндельная бабка», что позволяет более точно оценить и сравнить колебания глубины шлифования от обоих источников и разработать практические рекомендации по управлению этими колебаниями.

**Трехмассовая модель.** Графически трехмассовая модель ОШС представлена

---

©Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский, Е. М. Помазан, 2021

на рис. 1. На этом рисунке  $m_1, m_2, m_3$  – массы шлифовальной бабки, круга и проката соответственно;  $C_1, C_2, C_3$  – жесткости связи круга с бабкой, круга с прокатом и проката со станиной станка соответственно. Шлифовальная бабка массой  $m_1$  присоединена к станине только через демпфер  $b_1$ , что моделирует упругую схему шлифования. Бабка прижимается к прокату усилием  $P_{np}$ . Демпферы  $b_1, b_2, b_3$  моделируют силы сопротивления в связях бабки со станиной, круга с бабкой и проката со станиной.

На рис. 1 представлено статическое равновесие системы обдирочного шлифования, когда круг прижат к прокату с постоянной силой  $P_{np}$  и шлифуется абсолютно ровный прокат кругом с правильной цилиндрической поверхностью. Таким образом  $P_{np}$  равна вертикальной составляющей силы шлифования  $P_y$  и шлифование осуществляется с постоянной  $h_{cm}$ .

Принимаем, что

$$P_y = C_2 \cdot h, \quad (1)$$

где  $C_2$  – «жесткость» пружины моделирующей сопротивление обрабатываемой поверхности внедрению шлифовального круга, что в дальнейшем называется «жесткостью» процесса шлифования.

В рассматриваемом случае  $h = h_{cm}$  и все силы, действующие на элементы станка в вертикальном направлении находятся в статическом равновесии:

$$C_3 \cdot x_{3cm} = C_2 \cdot h_{cm} = P_y. \quad (2)$$

Функцией  $h(t)$  можно описать кривизну проката и тем самым учесть возмущающее воздействие на динамическую систему обдирочного шлифования (ДСОШ) кривизной проката.

Рассматривая динамическое равновесие всех трех масс, то есть с учетом сил инерции при движении этих масс, сил демпфирования и жесткости связки между массами получена система дифференциальных уравнений в системе координат:  $x$  – перемещение круга,  $x_1$  – перемещение шлифовальной бабки,  $x_2$  – перемещение проката; описывающих динамическую систему обдирочного шлифования.

$$\left. \begin{aligned} m_2 \cdot \ddot{x} + b_2 \cdot \dot{x} + C_1 \cdot x_1 &= C_2 \cdot x_2; \\ m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{x}_1 - C_1 \cdot x - b_2 \cdot \dot{x} &= 0; \\ m_3 \cdot \ddot{x}_3 + b_3 \cdot \dot{x}_3 + C_3 \cdot x_3 &= C_2 \cdot x_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Перемещение круга  $x$  в вертикальном направлении будет меньше высоты  $h$  набегающего выступа проката на  $x_2$  – увеличение глубины шлифования и опускания  $x_3$  проката за счет возросшей силы резания, т.е.  $x = h - x_2 - x_3$ . Подставив это значение  $x$  в уравнение (3), получим:

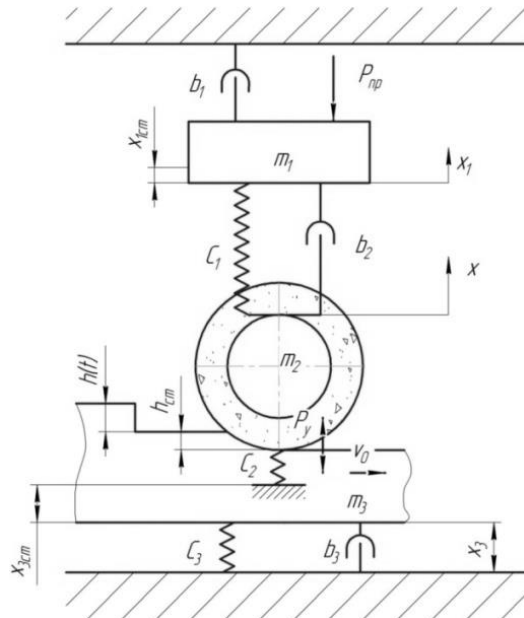




Рис. 1 – Модель обдирочно-шлифовального станка  
в статическом состоянии

$$\left. \begin{aligned} m_2 \cdot (\ddot{x}_2 + \ddot{x}_3) + b_2 \cdot (\dot{x}_2 + \dot{x}_3) + C_1 \cdot (x_2 + x_3) + C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 &= \\ = m_2 \cdot \ddot{h} + b_2 \cdot \dot{h} + C_1 \cdot h; \\ m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{x}_1 + b_2 \cdot (\dot{x}_2 + \dot{x}_3) + C_1 \cdot (x_1 + x_2 + x_3) &= b_2 \cdot \dot{h} + C_1 \cdot h; \\ m_3 \cdot \ddot{x}_3 + b_3 \cdot \dot{x}_3 + C_3 \cdot x_3 - C_2 \cdot x_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Процесс обдирочного шлифования моделируется уравнением (1) и его важнейший параметр  $C_2$  находится экспериментально. В [3] приведены результаты исследования шлифования шестигранного проката из стали 40Х на станке СВД-60 кругом ПП300х30х75 38А100СТ2Б при скорости шлифования  $V = 40$  м/с, скорости продольной (осевой) подачи  $V_{oc} = 7$  м/мин и усилия прижима  $P_y = (10...40)$  Н/мм (Ньютон на миллиметр высоты круга) в виде полинома второй степени в зависимости  $h(P_y)$ .

Линеаризация этой зависимости методом наименьших квадратов в диапазоне  $P_y = (10...30)$  Н/мм позволила получить линейную модель (1) с  $C_2 = 26,3$  Н/мм и погрешностью не более 5% от нелинейной. Следовательно,  $h(P_y) = 1/C_2 = 0,038$  мм/Н.

В рассматриваемых исследованиях ставится цель моделирования прерывистого шлифования, экспериментальных исследований, которого нет для упругой схемы шлифования. Однако, в [2] показано, что «упругое» шлифование кругом формы ПП с прерывистой режущей поверхностью аналогично сплошному шлифованию кругами в меньшей высоте.

Количественная связь между глубиной шлифования сплошным  $h_{cn}$  и прерывистым  $h_{cn}$  кругами получена из условия, что глубина шлифования прямо пропорционально зависит от удельной нормальной силы, прижимающей круг к прокату.

В результате получено, что для кругов одинаковой высоты:

$$h_{np} = h_{cn} \cdot \frac{(l_1 + l_2)^2}{l_1}, \quad (5)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – размеры выступа и впадины на наружной прерывистой поверхности круга формы ПП.

Для рассматриваемого примера прерывистого шлифования с  $l_1 = 29$  мм;  $l_2 = 17$  мм и с учетом выражения (5) получена «жесткость» прерывистого шлифования  $C_{2np} = 10,46$  Н/мм. Можно сказать, что пружина моделирующая

процесс прерывистого шлифования в  $(l_1 + l_2)/l_1$  раза менее жесткая, в сравнении с шлифовальным кругом со сплошной режущей поверхностью.

При прерывистом шлифовании длину дуги контакта  $l(t)$  занятой абразивом можно описать функцией:

$$l(t) = l_{cp} \cdot (1 + \sin(\omega_{np} \cdot t)), \quad (6)$$

где  $l_{cp} = (L \cdot l_1) / (l_1 + l_2)$  – среднее значение длины дуги контакта занятой абразивом,

$L$  – длина дуги контакта ( $L < l_2 < l_1$ );

$\omega_{np} = \frac{2\pi \cdot v}{l_1 + l_2}$  рад/с – круговая частота прерывистого шлифования.

Необходимо отметить, что полученное  $C_{2np} = 10,46$  Н/мм – это значение «жесткости» процесса при среднем значении дуги контакта  $l_{cp}$ . поэтому с учетом выражения (6):

$$C_2(t) = C_{2np} \cdot (1 + \sin(\omega_{np} \cdot t)) = C_{2np} \cdot dC(t), \quad (7)$$

где  $dC = 1 + \sin(\omega_{np} \cdot t)$ .

Как отмечено выше воздействие на ДСОШ кривизной проката можно описать функцией  $h(t)$  – высотой набегающего выступа проката в результате его кривизны. Последняя нормируется в технических условиях значением  $K$  на длине  $L$ . Эту кривизну удобно моделировать волнистостью проката в виде синусоиды:

$$h(t) = \frac{K}{2} \cdot \sin(\omega_p \cdot t), \quad (8)$$

где  $\omega_p = \frac{\pi \cdot V_0}{L \cdot 60}$  рад/с – круговая частота кривизны проката.

Анализ полученного описания ДСОШ уравнениями (3) с внешними воздействиями согласно (6) и (7) полезно произвести при помощи частотных характеристик и прямым моделированием.

Структурная схема ДСОШ показана на рисунке 2.

Согласно схемы рис. 2 моделирование деформаций  $d$  упругой системы станка может выполняться при сплошном шлифовании, когда сила  $P_y$  моделируется произведением  $C_2 \cdot x_2$ , и при прерывистом шлифовании, когда  $P_y = C_{2np} \cdot dC \cdot x_2$ .

Передаточную функцию динамической системы сплошного шлифования получим пользуясь правилами преобразования структурных схем в следующем виде:

$$W_{CT}(S) = \frac{d(S)}{h(S)} = \frac{W_{III}(S) \cdot W_{CT}(S)}{1 + W_{III}(S) \cdot W_{CT}(S)}, \quad (9)$$

где  $W_{III}(S) = \frac{P_y(S)}{x_2(S)} = C_2$  – передаточная функция процесса шлифования;

$$W_{CT}(S) = \frac{x(S)}{P_y(S)} = W_{KB} + W_{ПО} \text{ – передаточная функция станка;}$$

$$W_{KB}(S) = \frac{x(S)}{P_y(S)} \text{ – передаточная функция системы «круг-бабка»;$$

$$W_{ПО} = \frac{x_3(S)}{P_y(S)} \text{ – передаточная функция системы «прокат-опоры»}.$$

Преобразовав по Лапласу уравнения (3) при нулевых начальных условиях, получено:

$$W_{KB}(S) = \frac{m_1 S^2 + b_1 S + C_1}{(m_2 S^2 + b_2 S + C_1) \cdot (m_1 S^2 + b_1 S + C_1) - C_1 \cdot (b_2 S + C_1)}; \quad (10)$$

$$W_{ПО}(S) = \frac{1}{m_3 S^2 + b_3 S + C_3}. \quad (11)$$

Для сплошного шлифования в рассматриваемом примере  $W_{III} = 26,3$  м/мин для круга высотой 1 мм. Так как круг ПП300х30х75 высотой  $B=30$  мм, то  $W_{III} = 26,3 \cdot 30 \cdot 1000 = 789000$  Н/мм. Кроме  $W_{CT}(S)$  представляет интерес определение передаточной функции отклонения глубины шлифования от настройки при воздействии кривизной проката:

$$W_{om.2}(S) = \frac{x_2(S)}{h(S)}. \quad (12)$$

Согласно рис. 2:

$$x_2(S) = h(S) - d(S). \quad (13)$$

В свою очередь из (9) получаем:

$$d(S) = h(S) \cdot \frac{W_{III}(S) \cdot W_{CT}(S)}{1 + W_{III}(S) \cdot W_{CT}(S)}.$$

Подставив  $d(S)$  в (13) и выполнив преобразования получим:

$$\begin{aligned} W_{om.2}(S) &= \frac{x_2(S)}{h(S)} = \frac{1}{1 + W_{III}(S) \cdot W_{CT}(S)} = \\ &= \frac{1}{1 + W_{III}(S) \cdot (W_{KB}(S) + W_{ПО}(S))} \end{aligned} \quad (14)$$

**Анализ характеристик.** Анализ частотных характеристик для  $W_{cn}(S)$  и  $W_{om.2}(S)$  выполнен в пакете «СС» применительно к «станку-стенду» УкрНИИМет для исследования процесса обдирочного шлифования с полученными экспериментально и расчетом [1] параметрами этого станка:  $m_1=300\text{кг}$ ,  $b_1=5057(\text{Н}\cdot\text{с})/\text{м}$ ,  $C_1=3,36\cdot 10^7\text{ Н/м}$ ;  $m_2=10\text{кг}$ ,  $b_2=3000(\text{Н}\cdot\text{с})/\text{м}$ ;  $m_3=10\text{кг}$ ,  $b_3=71(\text{Н}\cdot\text{с})/\text{м}$ ,  $C_3=3,3\cdot 10^6\text{ Н/м}$ .

Передаточные функции  $W_{cn}(S)$  и  $W_{om.2}$ , обозначенные соответственно как  $g7$  и  $g8$  в пакете «СС», приведены на распечатке их определения на рис. 3.

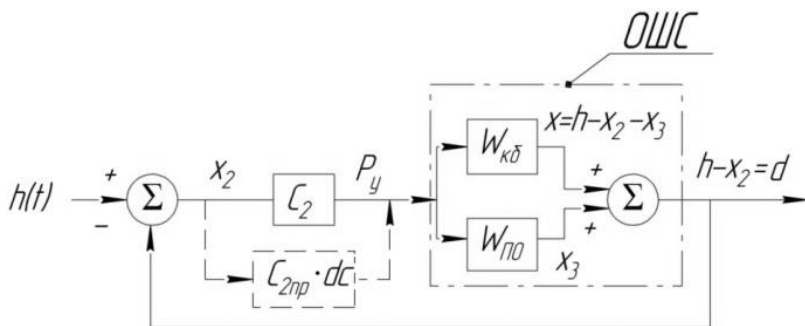


Рис. 2 – Структурная схема ДСОШ

Type help, winhelp, or demos to get started.  
Type CTRL+ALT+I to interrupt execution.

CC>g1=789000

CC>g2=1/(10\*s^2+71\*s+3.6e+06)

CC>g3=(3000\*s+3.36e+07)/(300\*s^2+5057\*s+3.36e+07)

CC>g4=1/(10\*s^2+3000\*s+3.36e+07-3.36e+07\*g3)

CC>g5=g2+g4

CC>g6=g1\*g5

CC>g7=g1\*g5/(1+g1\*g5)

CC>g8=1/(1+g1\*g5)

CC>g7

$$g7(s) = \frac{7,98e+05(6000s^4 + 1,022e+06s^3 + 1,185e+10s^2 + 1,905e+11s + 1,21e+14)}{3e+04s^6 + 9,719e+06s^5 + 1,2e+11s^4 + 6,678e+12s^3 + 4,702e+16s^2 + 7,637e+17s + 9,653e+19}$$

CC>g8

$$g8(s) = \frac{s(10s^2 + 71s + 3,6e+06)(3000s^3 + 9,506e+05s^2 + 1,043e+10s + 1,699e+11)}{3e+04s^6 + 9,719e+06s^5 + 1,2e+11s^4 + 6,678e+12s^3 + 4,702e+16s^2 + 7,637e+17s + 9,653e+19}$$

CC>bode(g7)

CC>figure

CC>bode(g8)

CC>figure

CC>bode(g8)

Рис. 3 – Распечатка расчета  $W_{cn}(S) = g7(S)$  и  $W_{om.2} = g8(S)$ .

На рис. 4 приведены амплитудная (сплошная линия) и фазовая (пунктирная линия) характеристики для  $W_{cn}(S)$ . Из амплитудной характеристики видно, что система сплошного шлифования имеет три резонанса на частотах воздействия 42,32 рад/с, 647 рад/с 1875 рад/с.

Частота воздействия кривизной проката  $\omega_k$  при  $V_0 = 7$  м/мин и  $L = 1$  м согласно (8) равна 0,366 рад/с, то есть значительно меньше наименьшей частоты собственных колебаний станка 42,32 рад/с. Частота воздействия прерывистой поверхностью круга  $\omega_{np} = (2\pi \cdot V) / (l_1 \cdot l_2) = 2666,7$  рад/с больше наибольшей собственной частоты колебания станка 1875 рад/с. Таким образом, резонанс при воздействии кривизной проката и прерывистой поверхностью круга невозможен. Такой вывод справедлив для конкретных условий шлифования и параметров прерывистой поверхности круга.

На рис. 5 а представлены частотные характеристики, полученные в пакете «CC» для  $W_{om.2}(S) = x_2(S) / h(S)$ . Обращает на себя внимание участок амплитудной характеристики до резонансного пика на низшей собственной частоте. Этот участок имеет монотонный подъем с ростом частоты воздействия  $h(t)$  – неровностью проката. Таким образом, с ростом частоты

воздействия неровностью проката растет амплитуда отклонения глубины шлифования  $x_2(t)$  от заданной настройкой станка.

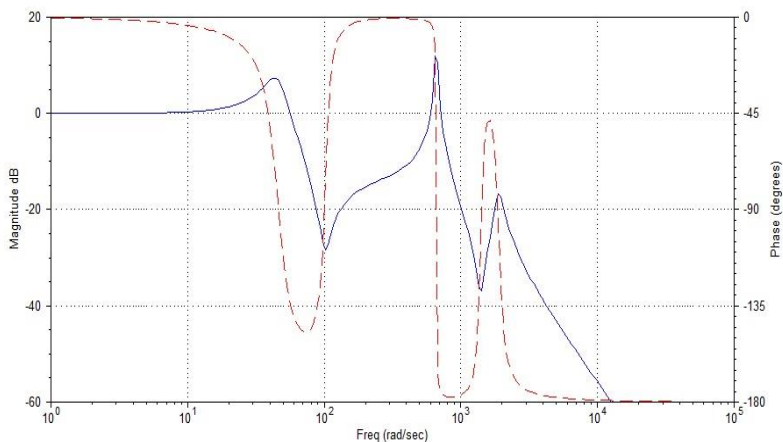
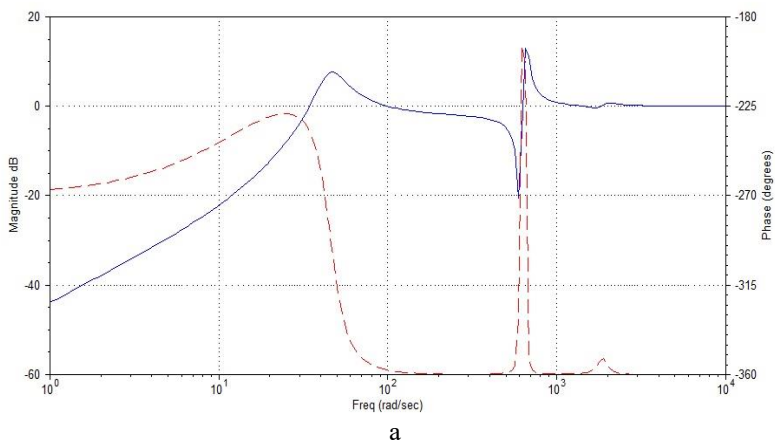
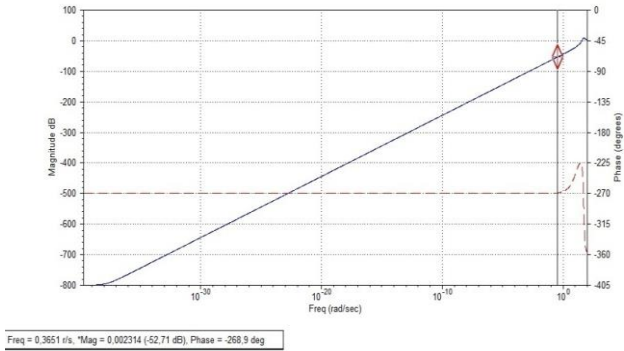


Рис. 4 – Амплитудная (сплошная линия) и фазовая (пунктирная линия) характеристики  $W_{cn}(S) = h_f(S)/h(S)$

Реальные значения частот неровностей проката обычно не превышают  $1 \text{ rad/s}$ . Поэтому, для практики интересен именно этот диапазон частот, для которого приведены частотные характеристики на рис. 5, а, б.



а



б

Рис. 5 – Амплитудная и фазовая характеристики из  $W_{om.2} = x_2(S) / h(S)$ .

Диапазоны частот:  $a - (1 \dots 10000)$  рад/с;  $б - (0 \dots 50)$  рад/с.

Зная частоту кривизны проката  $\omega_k$  можно найти амплитудную характеристику  $A(\omega) = \frac{x_2}{k/2}$  и отсюда  $x_2 = A(\omega) \cdot k/2$ . В рассматриваемом примере  $k=0,005$  м, для  $\omega_k=0,366$  рад/с считываем амплитудную характеристику  $Mag=0,0023$  м (см. рис. 5, б). Таким образом, амплитуду колебаний глубины шлифования  $x_2$  вследствие кривизны проката получим следующей:  $x_2=0,023 \cdot (0,005 / 2)=5,76 \cdot 10^{-6}=5,78$  мкм.

Прямое моделирование системы ДСОШ было выполнено в пакете «VisSim». Результаты моделирования, то есть  $x_2$  – отклонение глубины шлифования от заданной настройкой станка, приведены на графиках рис. 6.

На рисунке 6, а показана величина  $x_2$  как результат воздействия кривизной проката и прерывистой поверхностью круга. Из этого рисунка видно, что  $x_2$  за счет кривизны проката  $k=5$  мм на длине  $L=1$  м представляет собой синусоиду с амплитудой  $1,5 \cdot 10^{-5}$  м = 15 мкм. Выделив в графике рис. 6, а участок в пределах времени 15 – 19 с и увеличив его получим рис. 6, б. Из него видно, что на низкочастотную синусоиду накладывается высокочастотная с амплитудой  $0,0355 \cdot 10^{-5}$  м = 0,3 мкм. Это колебания глубины шлифования  $x_2$  от воздействия прерывистой поверхностью круга, что показано на рис. 6, в. Таким образом, из этого рисунка видно, что колебания глубины шлифования, возбуждаемые прерывистой поверхностью круга, очень малы и могут оказать влияние только на шероховатость зачищаемого проката и не могут быть ограничением на применение прерывистого шлифования при зачистке.

Колебания глубины шлифования, возбуждаемые кривизной проката значительно больше. Однако, как установлено моделированием, колебание глубины шлифования кругом со сплошной режущей поверхностью в диапазоне применяемых режимов шлифования не превышает допустимых ее значений составляющих обычно 10% от нормируемой толщины снимаемого дефектного слоя с поверхности проката.

В связи с меньшей «жесткостью» процесса прерывистого шлифования (в рассматриваемом примере  $C_{np} = 10,46 \text{ Н/мм}$ ) по сравнению с «жесткостью» сплошного шлифования ( $C_2 = 26,3 \text{ Н/мм}$ ), колебания глубины шлифования возбуждаемые кривизной проката будут в  $(C_2 / C_{2np}) = 2,514$  раза больше. Такой результат подтверждается прямым моделированием шлифования проката с прерывистой поверхностью ( $x_2 = 15 \text{ мкм}$ ) и анализом частотной характеристики из  $W_{om,2}(S)$  приведенной на рис. 5, б ( $x_2 = 5,78 \text{ мкм}$ ). Отношение  $15 / 5,78 = 2,59$  практически совпадает с отношением  $C_2 / C_{2np} = 2,514$ .

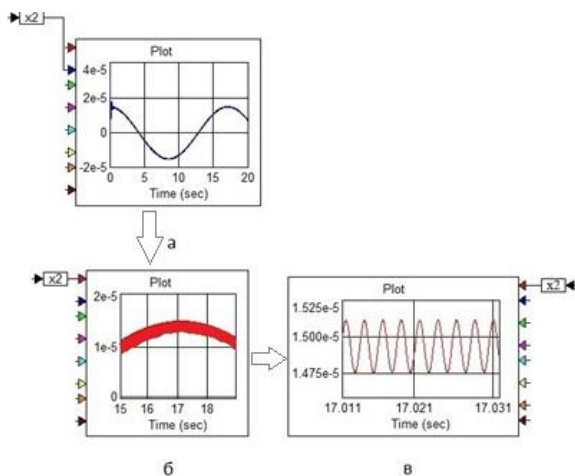


Рис. 6 – Колебание глубины шлифования  $x_2$ : а - результат воздействия кривизной проката и прерывистой поверхностью круга; б – аштабированный участок синусоиды в пределах времени 15-19 с; в – колебания глубины шлифования

Следовательно, прерывистое обдирочное шлифование по упругой схеме ведет к большему колебанию глубины шлифования по сравнению с шлифованием кругом со сплошной режущей поверхностью. Поэтому, если для шлифования сплошным кругом колебания глубины шлифования возбуждаемые кривизной проката не превышают обычно допустимое в 10%



отклонение от нормируемой толщины снимаемого слоя, то при применении прерывистого шлифования требуется проверка выполнения требований к отклонению глубины шлифования от нормируемой техническими условиями.

Эта проверка может быть проведена теоретически, так как это выполнено в настоящей статье на основе анализа амплитудно-частотной характеристики по передаточной функции  $W_{om,2}(S)$ .

**Выводы.** На основании прямого моделирования и анализа амплитудно-частотных характеристик системы обдирочного шлифования установлено:

1. Колебания глубины обдирочного шлифования кругом со сплошной режущей поверхностью возбуждаемые кривизной проката обычно на превышают 10% от нормируемой глубины зачистки проката.

2. Колебания глубины обдирочного шлифования возбуждаемые прерывистой поверхностью круга находятся в пределах шероховатости поверхности и, следовательно, не являются ограничением на применение прерывистого шлифования при зачистке проката.

3. Поскольку круги для прерывистого шлифования можно изготавливать из сегментов, расход абразивного материала будет значительно меньше чем при шлифовании цельными кругами. Кроме этого известное свойство прерывистого шлифования значительно снижает нагрев шлифуемой поверхности вместе с уменьшением расхода абразива в сборных кругах и создает предпосылки эффективного его применения при зачистке проката.

4. Колебания глубины прерывистого шлифования возбуждаемые кривизной проката значительно больше этих колебаний при шлифовании кругом со сплошной режущей поверхностью и возможность применения прерывистого шлифования требует проверки экспериментально или теоретически как это приведено в настоящей статье.

#### Список литературы

1. *Сталинский Д. В.* Оптимальное проектирование динамических систем обдирочно-шлифовальных станков / *Д. В. Сталинский, Ю. А. Сизый.* – Х. : ХГПУ, 2000. – 113 с.
2. *Сизый Ю. А.* Динамика упругой схемы обдирочного шлифования кругом с прерывистой режущей поверхностью / *Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский, А. Ю. Пирогов* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 28. – С. 14–20.
3. *Сталинский Д. В.* Теория и методы проектирования технологии обдирочного шлифования / *Д. В. Сталинский.* – Х. : Рубикон, 2001. – 230 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. *Stalinskij D. V., Sizyj Ju. A.* Optimal'noe proektirovanie dinamicheskikh sistem obdirochno-shlifoval'nyh stankov. – Kharkov : HGPU, 2000. – 113 P.
2. *Sizyj Ju.A., Stalinskij D. V., Pirogov A. Ju.* Dinamika uprugoj shemy obdirochnogo shlifovanija krugom s preryvistoj rezhushhej poverhnost'ju. Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2007. – No 28. – P. 14–20.
3. *Stalinskij D. V.* Teorija i metody proektirovanija tehnologii obdirochnogo shlifovanija. – Kharkov. : Rubikon, 2001. – 230 P.

*Поступила (received) 12.01.2021*

**Е. В. НАБОКА**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;  
**М.Э.КОЛЕСНИК**, канд. техн. наук, ст. викладач НТУ «ХПИ»

## **ИНТЕГРАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

В работе проведен анализ стандартов ISO и даны рекомендации по их применению при любых видах производства, во всех организациях независимо от вида деятельности, размера организации и поставляемой продукции (услуг). Выявлена взаимосвязь между основными стандартами качества продукции. Предложены требования, которые могут применяться для разработки системы качества изготовления продукции.

**Ключевые слова:** стандарт, сертификация, качество, управление, производство.

### **Е. В. НАБОКА, М.Э.КОЛЕСНИК ИНТЕГРАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

В работе проведен анализ состава iso и даны рекомендации по их применению при любых видах производства, во всех организациях независимо от вида деятельности, размера организации и производимой продукции (услуг). выявлена стандартная взаимосвязь между ограничениями качества продукции. предварительные требования, которые составляют для разработки системы качества производства продукции.

**Ключевые слова:** стандарт, сертификация, качество, управление, производство.

### **E V. NABOKA, M.E. KOLESNIK INTEGRATION OF INTERNATIONAL STANDARDS IN THE PROCEDURE PREPARATION PROCESS**

The paper analyzes ISO standards and gives recommendations for their application in all types of production, in all organizations, regardless of the type of activity, size of the organization and the products (services) supplied. The relationship between the main product quality standards is revealed. The requirements which can be applied to development of system of quality of production are offered.

**Keywords:** standard, certification, quality, management, production.

**Введение.** Общеизвестно на мировом уровне, что XXI век будет веком качества, так как в условиях глобального рынка уровень качества товаров, услуг и менеджмента становится главным, определяющим фактором конкурентоспособности, а значит, и благополучия любых предприятий, организаций, регионов, стран. В условиях жесткой конкурентной борьбы на рынке отечественных и зарубежных организаций, выжить могут лишь компании, обладающие главным конкурентным преимуществом – высоким качеством менеджмента. Мировая практика показала, что применение международных стандартов ISO серии 9000 на сегодняшний день является надежным инструментом для построения эффективной системы управления, повышения конкурентоспособности и создания благоприятных условий для роста инвестиций. Международные стандарты распространяются сегодня на все сферы деятельности: промышленность и инновации, финансовые и иные

услуги, социальную сферу, сферу управления, включая государственное и муниципальное управление. Т.е. стандартизация является важнейшим инструментом конкурентоспособности продукции.

**Цель статьи.** Внедрение международных стандартов в машиностроительное производство.

**Постановка задачи.** Стандартизация – это научно-техническая деятельность, направленная на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области посредством установления требований для всеобщего и многократного применения в отношении реально существующих или потенциальных задач.

Стандартизация решает поставленные перед ней задачи путем разработки, внедрения стандартов и других нормативных документов по стандартизации и проведения государственного надзора за ними.

Главной целевой установкой международных стандартов является: построение систем качества, обеспечивающих изготовление продукции, соответствующей требованиям заказчиков и соответственно ориентированных на предоставление доказательств заказчику способности предприятия стабильно выпускать продукцию определенного уровня качества.

Стандарты серии ISO 9000 определяют задачи систем качества, которые необходимо выполнить, однако они не описывают способа их достижения и предоставляют такой выбор руководству предприятия. В стандартах дается различие между требованиями к системе качества и требованиями к продукции. На основе этого стандарты ISO применяются к организациям, обеспечивающим продукцией, относящейся ко всем общим категориям продукции (оборудование, программное обеспечение, перерабатываемые материалы, услуги), и ко всем характеристикам качества продукции

Проблема роста безопасности и качества продукции предприятий и услуг может быть решена на основе всеобщей стандартизации и сертификации в соответствии с требованиями стандарта ISO 9001:2008. Как показала практика стран, входящих во Всемирную торговую организацию (ВТО), чем больше предприятий сертифицировано по ISO 9001:2008, тем выше конкурентоспособность и качество товаров и услуг в стране, тем меньше нужно применять меры для защиты рынков товаров и услуг. Сегодня в Украине сотни, а в Европе уже сотни тысяч предприятий внедрили и сертифицировали Систему менеджмента качества (СМК) на базе ISO 9001, и с каждым годом их число неуклонно растет.

**Материалы исследований.** Стандарты серии ISO 9000 – это пакет документов по обеспечению качества подготовленный членами международной делегации, известной как " ISO /Технический Комитет 176" (ISO/TC 176). В настоящее время серия ISO 9000 включает (см. рис. 1):

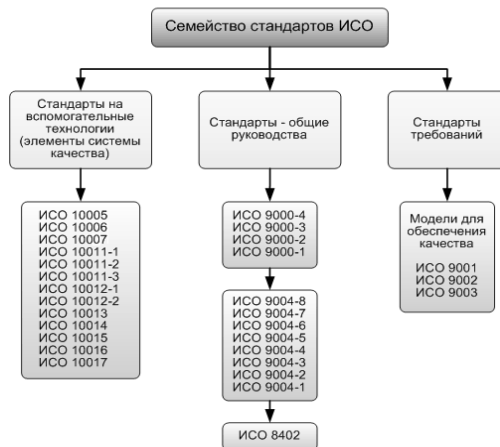


Рис.1 – Схема семейства стандартов качества ISO

Из стандартов серии ИСО 9000 три стандарта ISO 9001, ISO 9002 и ISO 9003 являются основополагающими документами системы качества, описывающими модели обеспечения качества: ISO 9001 "Система Качества: Модель обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании"; ISO 9002 "Система Качества: Модель обеспечения качества при производстве, монтаже и обслуживании"; ISO 9003 "Система Качества: Модель обеспечения качества при окончательном контроле и испытаниях".

Анализ области применения и содержания стандартов этих стандартов позволяет выявить их взаимосвязь (рис. 2).

Систему качества изготовления продукции необходимо разрабатывать с учетом выполнения требований стандарта ISO 9001, т.к. они универсальны и подходят для любого вида производства, в то время как, требования стандартов ISO 9002, 9003 не в полной мере соответствуют нашему производству.

Стандарт ISO 9001:2008 состоит из следующих разделов:

Раздел 1. Область применения – описывает общие положения стандарта и его применение в организациях. Также определяет те случаи, когда предприятие, разрабатывающее и внедряющее систему качества, может сделать исключение из реализации требований стандарта.

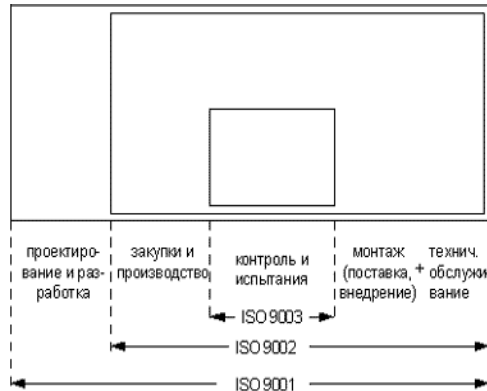


Рис.2 – Взаимосвязь между ISO 9001, 9002, 9003

Раздел 2. Нормативные ссылки – даются ссылки на стандарты серии ISO 9000.

Раздел 3. Термины и определения – приводятся термины и определения, используемые в стандарте.

Раздел 4. Система менеджмента качества – определяет общие требования к системе менеджмента качества, управлению документацией и записями по качеству.

Раздел 5. Ответственность руководства – определяет требования к административному управлению построением, внедрением и функционированием системы менеджмента качества. Требования данного раздела предъявляются к высшему руководству организации и к системе административного управления.

Раздел 6. Менеджмент ресурсов – определяет требования к ресурсам, необходимым для разработки, внедрения и функционирования системы качества. К таким ресурсам стандарт относит человеческие ресурсы, материальные ресурсы, инфраструктуру и производственную среду.

Раздел 7. Процессы жизненного цикла – определяет требования к основным и обеспечивающим процессам предприятия. В этом разделе представлены, наиболее объемные требования, которые предъявляются к основной деятельности предприятия по управлению процессами производства продукции или предоставления услуг.

Раздел 8. Измерение, анализ и улучшение – определяет требования к проведению и организации анализа, измерений и улучшений системы менеджмента качества, процессов и выпускаемой продукции (оказываемым услугам).

Приложение А – приводится соответствие между разделами стандарта ISO 9001:2008 и ISO 14001:2004 (Системы управления окружающей средой. Требования и руководство по применению). Взаимосвязь этих стандартов

приводится для того, чтобы организации могли строить интегрированные системы менеджмента качества и экологического менеджмента.

Приложение В – приводятся изменения в тексте стандарта ISO 9001:2008 по сравнению с текстом предыдущей редакции данного стандарта ISO 9001:2000.

Приложение С – Библиография. Список стандартов, использованных при разработке стандарта ISO 9001:2008.

**Результаты исследований.** Стандарт ISO 9001:2008 (в Украине ДСТУ ISO 9001:2009) предназначен для разработки и внедрения систем менеджмента качества предприятий с целью последующей сертификации или для заключения контрактов с другими предприятиями, которые предъявляют требования к стабильности и надежности выполнения контрактных обязательств.

Требования, содержащиеся в стандарте ISO 9001:2008 являются общими и предназначены для применения ко всем организациям независимо от вида деятельности, размера организации и поставляемой продукции (услуг). Стандарт определяет, что необходимо делать для внедрения системы качества, но не определяет, как это делать. Именно за счет такого подхода требования стандарта являются универсальными и применимыми к любой организации. Методы, как реализовать то или иное требование стандарта предприятие выбирает само, исходя из своих потребностей и возможностей.

**Выводы.** Анализ содержания и применения международных стандартов позволяет выявить взаимосвязи между тремя стандартами: ISO 9001, ISO 9002, ISO 9003. В результате чего было установлено, что требования стандарта ISO 9001 универсальны, подходят для любого типа производства и могут применяться для разработки системы качества изготовления продукции.

#### Список литературы

1. Ребрин Ю.И. Управление качеством: учебное пособие / Ю.И. Ребрин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 174с. 2. Васильев А.С. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец, П. И. Ящерицын. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с. 3. Управление качеством: учебник по специальности «Менеджмент организации» / Т. А. Салимова. – М.: Издательство «Омега-Л», 2007. – 414 с. 4. Управление качеством: учебник / Д.А. Шевчук. – М.: ГроссМедиа, РОСБУХ, 2008. – 216с. 5. ДСТУ ISO 9001:2009 (официальный перевод ISO 9001:2008).

#### Bibliography (transliterated)

1. Rebrin Ju.I. Upravlenie kachestvom: uchebnoe posobie. – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004. – 174P. 2. Vasil'ev A.P., Dal'skij A.M., Klivenko P.A., Polonskij L.G., Hejfec M.L., Jashhericyn P. I. Tehnologicheskie osnovy upravlenija kachestvom mashin. – Moscow: Mashinostroenie, 2003. – 256 P. 3. Salimova T. A. Upravlenie kachestvom: uchebnik po special'nosti «Menedzhment organizacii» . – Moscow: Izdatel'stvo «Omega-L», 2007. – 414 P. 4. Shevchuk D.A. Upravlenie kachestvom: uchebnik. – Moscow: GrossMedia, ROSBUH, 2008. – 216P. 5. DSTU ISO 9001:2009 (oficial'nyj perevod ISO 9001:2008).

*Поступила (received) 01.02.2021*

## ЗМІСТ

<i>Гасанов М.И., Пермяков А.А., Клочко А.А., Федоренко В.С.</i> Технологическое оснащение при зубообработке закаленных колес.....	3
<i>Степанов М.С., Иванова М.С.</i> Силів навантаження при обробці отворів комбінованим осьовим інструментом.....	17
<i>Добровольский С.С., Басова Е.В., Добровольская Л.Г.</i> Роль отечественного машиностроительного производства в современных условиях .....	23
<i>Веселовська Н.Р., Пермяков О.А.</i> Моніторинг процесу механічної обробки .....	30
<i>Сизый Ю.А., Сталинский Д.В.</i> Исследование глубины обдирочного шлифования.....	38
<i>Набока Е.В., Колесник М.Э.</i> Интеграция международных стандартов в процессе подготовки производства.....	50

## CONTENTS

<i>Gasanov M.I., Permyakov A.A., Klochko A.A., Fedorenko V.S.</i> Technological equipment for gear processing of hardened wheels.....	3
<i>Stepanov M.S., Ivanova M.S.</i> Forcefulness when working with a combination of axis tool.....	17
<i>Dobrovorsky S.S., Basova E.V., Dobrovolskaya L.G.</i> The role of domestic engineering production in modern conditions .....	23
<i>Veselovska N.R., Permyakov O.A.</i> Monitoring the process of mechanical processing .....	30
<i>Siziy Yu.A., Stalinsky D.V.</i> Study of the depth of rough grinding.....	38
<i>Naboka E.V., Kolesnik M.E.</i> Integration of international standards in the preproduction process.....	50

## ДЛЯ ПОДАТКІВ



НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

*№ 1 '2021 (3)*

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](mailto:oleksandr.klochko@khpri.edu.ua)

Підп. до друку 22.11.2021 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. № 39.  
Ціна договірна.

---

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