

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**

№ 1'2020

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

No. 1'2020

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2020

Kharkiv
NTU "KhPI", 2020

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», 2020 — № 1. — 73 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/>

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
Дмитрієв 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, Технический университет Кошице, Словачия
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 B.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
Fadecv V.A., professor, PAT "FED", Ukraine
Khavin G.L., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 4 від 3 липня 2020р.

ГАСАНОВ М.И., ВОЛОШИН А.И., КЛОЧКО А.А., БАБЕНКО М.В.

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОССТАНОВЛЕННЫХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИХ
СОСТОЯНИЯ**

Предложена двухступенчатая схема технологического воздействия на обеспечение эксплуатационных свойств восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес на основе разделении задач технолога и конструктора с регламентацией комплексных параметров на каждой из этих стадий и последующим решением задачи выбора оптимального значения эксплуатационных свойств. Предложена структура модели, на базе которой осуществляется выбор метода и режимов обработки поверхности восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес при обеспечении нескольких эксплуатационных свойств, с сохранением традиционных подходов к регламентации поверхности и включает в себя основные этапы определения структуры эксплуатационных свойств, которые предъявляются к восстановленным закаленным крупномодульным зубчатым колесам и установления численных и граничных значений, выбора комплексных параметров рабочих эвольвентных поверхностей, их теоретическое обоснование, расчет режимов и выбор оптимальной технологии восстановления зубчатых колес.

Ключевые слова: эксплуатационные свойства, восстановление, закаленные крупномодульные зубчатые колеса, двухступенчатая схема, технологическое воздействие

ГАСАНОВ М.І., ВОЛОШИН О.І., КЛОЧКО О.О., БАБЕНКО М.В.

**ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ВІДНОВЛЕНИХ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛЕС НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ
ПАРАМЕТРІВ ЇХ СТАНУ**

Запропоновано двоступенева схема технологічного впливу на забезпечення експлуатаційних властивостей відновлених загартованих крупномодульних зубчастих коліс на основі поділі завдань технолога і конструктора з регламентацією комплексних параметрів на кожній з цих стадій і подальшим вирішенням завдання вибору оптимального значення експлуатаційних властивостей. Запропоновано структуру моделі, на базі якої здійснюється вибір методу і режимів обробки поверхні відновлених загартованих крупномодульних зубчастих коліс при забезпеченні декількох експлуатаційних властивостей, зі збереженням традиційних підходів до регламентації поверхні і включає в себе основні етапи визначення структури експлуатаційних властивостей, які пред'являються до відновлених загартованих крупномодульних зубчастими колесам і встановлення чисельних і граничних значень, вибору комплексних параметрів робочих вольвентних поверхонь, їх теоретичне обґрунтування, розрахунок режимів і вибір оптимальної технології відновлення зубчастих коліс.

Ключові слова: експлуатаційні властивості, відновлення, загартовані крупномодульні зубчасті колеса, двоступенева схема, технологічний вплив

HASANOV M.I., VOLOSHIN A.I., KLOCHKO A.A., BABENKO M.V.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL IMPACT ON ENSURING OPERATIONAL PROPERTIES OF RESTORED LARGE-MODULAR GEAR WHEELS ON THE BASIS OF APPLICATION OF INTEGRATED PARAMETERS OF THEIR CONDITION

A two-stage scheme of technological impact on ensuring the operational properties of restored quenched large-modular gears is proposed based on the separation of the tasks of the technologist and designer with the regulation of complex parameters at each of these stages and the subsequent solution of the problem of choosing the optimal value of operational properties. The structure of the model is proposed, on the basis of which the method and surface treatment modes of restored hardened large-modular gears are selected while providing several operational properties, while maintaining traditional approaches to surface regulation and includes the main stages of determining the structure of operational properties that are presented to restored hardened large-modular gears wheels and the establishment of numerical and boundary values, the choice of complex working parameters volventnyh surfaces, their theoretical basis, the calculation mode and selection of the optimal recovery technology gears.

Keywords: operational properties, reconditioned, hardened large-modular gears, two-stage scheme, technological impact

1.Введение. Рассмотрен один из методов решения задачи многокритериальной оптимизации технологического воздействия на обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей в машиностроении. Приведена система комплексных параметров, обоснование их выбора, элементы функционально-стоимостного анализа при обеспечении эксплуатационных свойств поверхности восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес и вероятностной оценки методов ее зубообработки.

2.Основная часть. В настоящее время качество поверхности регламентируется параметрами в соответствии с ГОСТ 2.308-79 и 2789-73. В тоже время, как показывают научные исследования [1, 6, 8,11], технологическое обеспечение наиболее

эффективно осуществлять с помощью комплексных параметров состояния поверхности. Их выбор, обеспечение при изготовлении, раскрывает новые резервы снижения себестоимости и повышения качества зубчатых колес.

Двухступенчатая схема технологического воздействия на обеспечение эксплуатационных свойств (эксплуатационных свойств) основывается на разделении задач технолога и конструктора с регламентацией комплексных параметров на каждой из этих стадий. А затем с последующим решением задачи выбора оптимального значения эксплуатационных свойств.

Предложена структура модели, на базе которой осуществляется выбор метода и режимов обработки поверхности восстановленных закаленных

крупномодульных зубчатых колес при обеспечении нескольких эксплуатационных свойств, с сохранением традиционных подходов к регламентации поверхности. Она включает в себя следующие этапы:

1. Определение структуры эксплуатационных свойств, которые предъявляются к закаленным крупномодульным зубчатым колесам и установления формальных численных и граничных значений;
2. Выбор комплексных параметров рабочих эвольвентных поверхностей, их теоретическое обоснование, расчет их численных значений на стадии конструкторской или технологической разработки и их регламентация;
3. Назначение возможных методов обеспечения комплексных параметров на стадии выбора технологического метода зубообработки;
4. Функционально-стоимостной анализ (ФСА) методов обработки с позиции совместного обеспечения необходимых значений эксплуатационных свойств;
5. Расчет режимов и выбор оптимальной технологии зубообработки.
6. Прогнозирование гарантии качества

характеристик поверхностей и как следствие восстановленных восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес при выборе данного технологического обеспечения.

При конструировании важной задачей является установление эксплуатационных свойств предъявляемых к закаленным крупномодульным зубчатым колесам. В работе [1, 2, 3] отмечено, что нужно установить лимитирующие эксплуатационных свойств, которые определяют надежность и точность зубчатых колес. Эти и другие вопросы рассматриваются при решении задачи в блоках 1 – 4 (рис. 1), при этом следует обратить внимание на их численные значения и рациональность назначения.

На этапе конструкторской подготовки производства выбор комплексных параметров, характеризующих эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес можно производить, используя табл. 1.

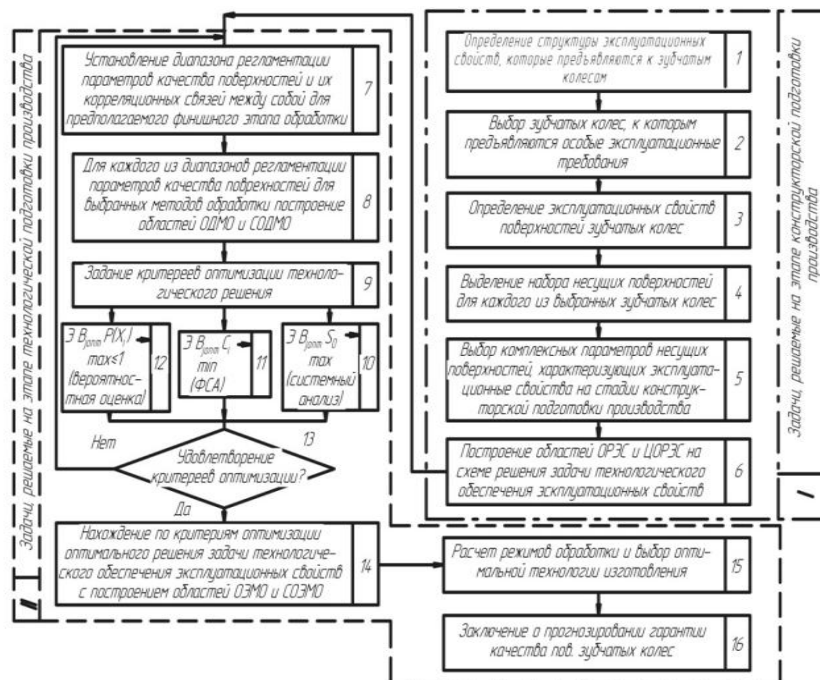


Рис. 1 – Структура моделирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес

В табл. 1, H_p – высота сглаживания макроотклонения; W_p – высота сглаживания профиля волнистости; R_p – расстояние от линии выступов до средней линии; S_m – средний шаг неровностей; K^1 – коэффициент упрочнения поверхностного слоя; H_{max} – максимальная высота макроотклонения; t_m – относительная опорная площадь неровностей на уровне средней линии; σ_T – предел текучести; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; $J_{пл}$ – деформационная составляющая; λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных

напряжений на число циклов нагружения; χ – коэффициент; P – удельное давление на поверхность; γ – безразмерный коэффициент, зависящий от соотношения σ_T/σ_B ; $\sigma_{1д}$ – предел выносливости детали; σ_{-1} – предел выносливости не упрочненного образца; C – коэффициент жесткости; f – коэффициент трения; M , d и l – параметры соединения: крутящий момент, приложенный к сопряжению, диаметр и длина сопряжения соответственно.

Таблица 1 – Комплексные параметры (КП), применяемые при технологическом обеспечении эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес в период нормального износа

Наименование поверхности	КП	Технологическое значение параметров	Расчетно-конструкторское значение параметров
Работающие в условиях выкрашивания активных поверхностей	C_x	$\frac{H_p \cdot W_p \cdot (R_p)^4}{(S_m)^6 \cdot (K^1)^{12}}$	$3375 \cdot \left[\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left(\frac{10 \cdot J_{II} \cdot \lambda}{\chi \cdot P} \right)^6$
Работающие в условиях отслаивания поверхностных слоев зубьев	Π	$\left[\frac{R_p \cdot W_p \cdot H_p}{(K^1)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}}$	$\left[\frac{\sigma_T \cdot J_{III}^6}{1.7 \cdot P} \right]^{\frac{1}{6}}$
Работающие в условиях поломки зубьев	H	$\frac{R_a^2 \cdot K^1}{W_z \cdot H_{\max}}$	$\frac{P}{A \cdot \sigma_T}$
Работающие в условиях абразивного износа зубьев	Π	$\frac{R_a}{S_m \cdot K^1}$	$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E}$
Работающие в условиях пластических деформаций зубьев	$\mathcal{D}$	$\frac{K^1 \cdot S_{mw}^{0.4} \cdot R_a}{W_a^{0.2} \cdot S_m \cdot t_m}$	$\frac{\gamma^{0.2}}{13.5} \cdot \left[\frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}} - 1 \right]$
Работающие в условиях заедание	C_M	$R_p + W_p + H_p$	$\Delta - 2 \cdot 10^3 \cdot \frac{M}{\pi d l f} \cdot \frac{C}{E}$

На этом этапе комплексный параметр принимается равным значению параметра в период нормального износа. Данная задача решается в блоке 5 (рис. 1).

Построение области регламентируемых значений эксплуатационных свойств можно проводить с использованием прикладной математики [2, 4, 5, 16]. При обеспечении нескольких эксплуатационных свойств нужно построить для каждого из них свою область эксплуатационных свойств и пересечением этих областей друг с другом определить целесообразную область регламентируемых значений эксплуатационных свойств. Эта область будет включать все эксплуатационных свойств, достижение которых, поставил конструктор перед технологом. По сути дела, это выходная информация конструктора, необходимая технологу, как исходные данные для технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес (блок 6, рис. 1).

Для решения задачи оптимизации технологического обеспечения эксплуатационных свойств необходимо определить параметры области эксплуатационных свойств:

$$S_{P\Sigma ij} = (X_{iP\Sigma ij \max} - X_{iP\Sigma ij \min}) \cdot (Y_{jP\Sigma ij \max} - Y_{jP\Sigma ij \min}) \quad (1)$$

$$S_{Pij} = (X_{iPij \max} - X_{iPij \min}) \cdot (Y_{jPij \max} - Y_{jPij \min}) \quad (2)$$

где, $X_{iP\Sigma ij \max}$, $X_{iP\Sigma ij \min}$ - минимальные и максимальные значения параметров качества поверхности, являющихся ограничительными функциями области $P_{\Sigma ij}$; $Y_{jP\Sigma ij \max}$, $Y_{jP\Sigma ij \min}$ - минимальные и максимальные значения комплексных параметров состояния поверхности, отражающих ее эксплуатационные свойства;

Задачей технолога, на первом этапе, является предварительное установление финишного этапа

зубообработки поверхностей при помощи графовой модели технологического процесса, с использованием вместо среднего арифметического отклонения профиля R_a и качества точности IT , комплексного параметра и качества точности IT .

Также, его задачей является установление диапазона регламентации качества поверхностей на окончательном этапе зубообработки и выявление корреляционных связей между этими параметрами. Все эти задачи решаются в блоке 7 (рис. 1).

$$R_a = f(R_z); R_{\max} = \varphi(R_z); t_m = \psi(S_m); \\ t_{mw} = \xi(S_{mw}); W_p = \chi(W_z); \quad (3)$$

$$W_z = F(S_{mw}); W_z = \zeta(W_{\max}); \\ H_p = r(H_{\max}); \sigma = g(h_\sigma) \quad (4)$$

где, $f, \varphi, \psi, \xi, \chi, F, \zeta, r, g$ - функции корреляции параметров поверхностного слоя, σ - величина остаточных напряжений на поверхности, h_σ - глубина залегания остаточных напряжений поверхности, остальные параметры (табл. 1).

Далее следует построить схему системной оптимизации (блок 8, рис. 1) технологического обеспечения эксплуатационных свойств (рис. 2) с определением площадей областей эксплуатационных свойств, области достижимых значений эксплуатационных свойств метода обработки (ОДМО), совместной области ОДМО (СОДМО), области эффективных значений метода обработки (ОЭМО), совместной области ОЭМО (СОЭМО). На рис. 3 показана схема задачи функционально-стоимостного анализа (ФСА) и методов обработки с позиции совместного обеспечения необходимых значений эксплуатационных свойств

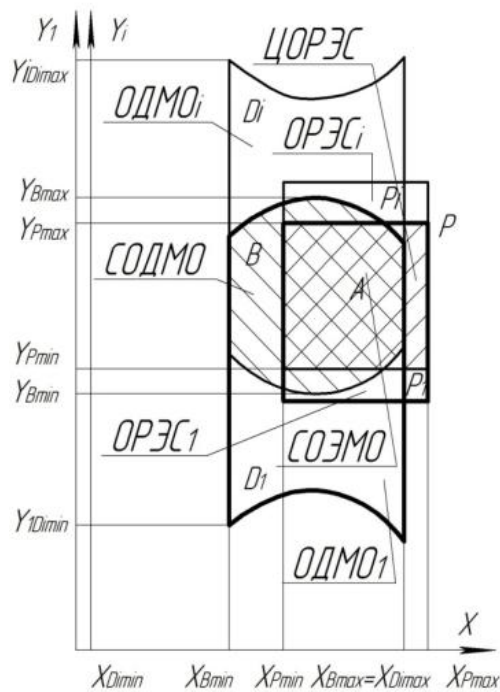


Рис. 2 – Схема системной оптимизации обеспечения нескольких эксплуатационных свойств

где, ψ - количество пересеченных множеств; X_i - значения i -го параметра, значения которого регламентируются и откладываются на оси абсцисс (параметр качества поверхности); K_{ij} - коэффициент, отражающий влияние не рассматриваемых j комплексных параметров при i регламентируемом параметре качества поверхности [2, 7, 9, 10]. $f_{HD\Sigma ij}(X_i)$, $f_{BD\Sigma ij}(X_i)$ - приведенная к j показателю функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область $D_{\Sigma ij}$; $f_{HA\Sigma ij}(X_i)$, $f_{BA\Sigma ij}(X_i)$ - приведенная функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область $A_{\Sigma ij}$ по регламентируемому параметру; $K_{BD\Sigma ij}$, $K_{HD\Sigma ij}$ - приведенные значения коэффициентов отражающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область $D_{\Sigma ij}$; $K_{BA\Sigma ij}$, $K_{HA\Sigma ij}$ - приведенные значения коэффициентов, учитывающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область $A_{\Sigma ij}$; e - количество образованных множеств $СОДМО$; t - количество образованных множеств $СОЭМО$.

Для оптимизации технологического обеспечения эксплуатационных свойств, при регламентации одновременно двух параметров качества поверхности, учитываются корреляционные связи между ними (3) и (4). Эту задачу стоит решать не в двумерной системе координат, а используя пространственное моделирование. В качестве примера выбрано обеспечение эксплуатационных свойств с использованием комплексного параметра для поверхностей, работающих в условиях линейного износа (табл. 1). Графически область $ОДМО$ можно построить при помощи математического пакета MathCAD (рис. 4 и рис. 5) [1, 2, 8, 9, 11].

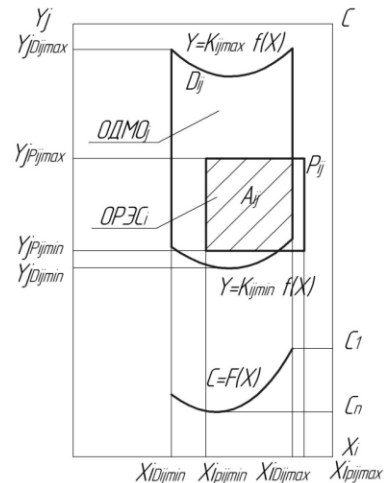


Рис. 3 – Схема задачи ФСА

$$S_{Dij} = (K_{ij \max} - K_{ij \min}) \cdot \int_{X_{ij \min}}^{X_{ij \max}} f(X_i) dX_i \quad (5)$$

$$S_{D\Sigma ij} = \sum_{\psi=1}^e [K_{BD\Sigma ij} \cdot f_{BD\Sigma ij}(X_i) - K_{HD\Sigma ij} \cdot f_{HD\Sigma ij}(X_i)] \quad (6)$$

$$S_{A\Sigma ij} = \sum_{\psi=1}^t [K_{BA\Sigma ij} \cdot f_{BA\Sigma ij}(X_i) - K_{HA\Sigma ij} \cdot f_{HA\Sigma ij}(X_i)] \quad (7)$$

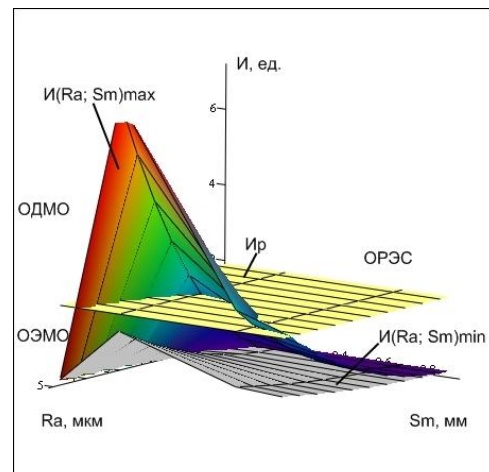


Рис. 4 – Область $ОДМО$ для зубообработки червячной модульной фрезой при регламентации S_m и R_a

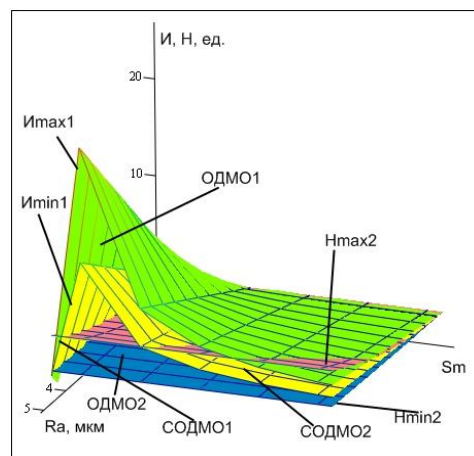


Рис. 5 – Область $СОДМО$ при регламентации параметров S_m и R_a

Объем области ОДМО:

$$V_{ОДМО} = \iint_{D_1} \frac{R_a}{S_m \cdot K_{\max}^{\downarrow}} dR_a dS_m - \iint_{D_1} \frac{R_a}{S_m \cdot K_{\min}^{\downarrow}} dR_a dS_m = \quad (8)$$

$$= \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \left[\frac{R_a}{K_{\max}^{\downarrow}} \cdot \left(\ln \frac{K_{f2} \cdot \sqrt[m]{R_a}}{K_{f1} \cdot \sqrt[n]{R_a}} \right) \right] dR_a - \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \left[\frac{R_a}{K_{\min}^{\downarrow}} \cdot \left(\ln \frac{K_{f2} \cdot \sqrt[m]{R_a}}{K_{f1} \cdot \sqrt[n]{R_a}} \right) \right] dR_a$$

где, $V_{ОДМО}$ - объем области ОДМО; K_{fi} - коэффициент корреляции; n, m - показатели степени;

С помощью критериев оптимизации технологического обеспечения эксплуатационных свойств (рис. 1) нужно определить удовлетворяет ли данный метод обработки на финишном этапе максимальности значения площади области СОЭМО из всех выбранных методов, минимальности затрат (ФСА) и максимального значения вероятности $P(A)$ для данного метода обработки (блоки 9 – 14, рис. 1). Если нет, то следует вернуться к определению финишного этапа обработки или методу обработки на финишном этапе, а также смене регламентируемого параметра качества поверхности (блок 7, рис. 1) [1, 2, 12, 14].

Область эксплуатационных свойств обозначим как A , ОДМО – D , ОЭМО – B (Рис. 3). Используя теорию множеств, авторами сформулированы высказывания, отражающие критерии оптимизации технологического обеспечения нескольких эксплуатационных свойств поверхностей деталей:

1. Для каждого метода зубообработки (МЗ) на финишном этапе существует ограниченный набор (множество) областей D , для каждого из которых существует функция затрат C_i ;

2. Из множества областей B найдется такая область ОЭМО (одна), которая будет удовлетворять трем критериям:

2.1. Будет иметь максимальное значение площади пересечения ОДМО и эксплуатационных свойств (S_D);

2.2. Будет иметь минимальное значение функции затрат C_i ;

2.3. Будет иметь максимальную вероятность

$$P(A)_T = \frac{0,63-0,1}{0,8-0,1} - \frac{1}{0,8-0,1} \cdot \int_{0,385}^{0,63} \int_{0,016}^{0,416} f(K) dK = \frac{1}{0,7} \cdot \left[0,53-0,01 \int_{0,385}^{0,63} \left(\frac{x}{0,016} - \frac{1}{0,416} \right) dx \right] = 0,66 \quad (11)$$

Двумерное нормальное распределение параметров качества поверхности R_a и W_a , для случая независимости (некоррелированности) этих параметров имеет вид [2], приведенной на рис. 7 [1, 13, 14, 15].

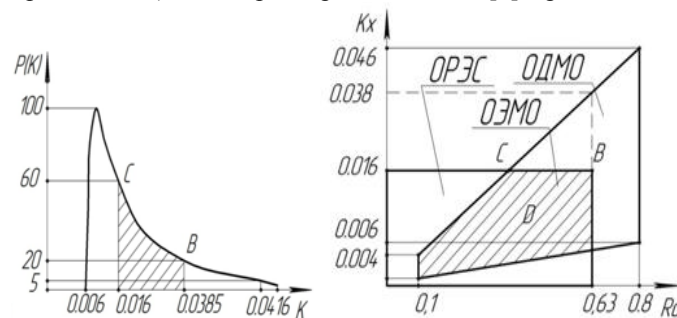


Рис. 6 – Функция плотности вероятности $F(K)$ для зубообработк

обеспечения эксплуатационных свойств для данного МЗ;

3. Эта область ОЭМО, удовлетворяемая критериям 2.1, 2.2 и 2.3, будет оптимальной с точки зрения технологического обеспечения эксплуатационных свойств.

Математически это может быть выражено так:

1. $\forall MO \exists D \ni C$;

2.1. $\exists_B B_{jonn} S_D \rightarrow \max$

$D = \{D_1, D_2, D_3, D_4\}$;

2.2. $\exists_B B_{jonn} C_i \rightarrow \min (10)$;

$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_i\}$;

2.3. $\exists_B B_{jonn} P_i(A) \rightarrow \max (11)$;

$C_i = F(x_i)$;

$A \cap D = B$; $B = \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_j\}$; $B_{jonn} \in B$;

Нужно помнить, что область СОЭМО является выходной информацией, необходимой для выполнения ФСА и вероятностной оценки (ВО) метода зубообработки. Не только ее площадь, но и положение в системе координат, играет существенное значение в обеспечении эксплуатационных свойств поверхности. т.к. проецирование экстремумов из этой области на функцию затрат определит величину издержек при данном методе обработки. А положение кривой распределения параметров качества поверхности по отношению к области СОЭМО определит вероятность обеспечения эксплуатационных свойств поверхности выбранным методом зубообработки.

Параметры качества поверхности R_p, S_m, R_a и др. представляют собой функцию случайной величины, эти рассуждения относятся к области достижимых значений комплексного параметра при рассматриваемом методе зубообработки D , а область P , является равновероятной.

Вероятность $P(A)$ для рассматриваемого метода обработки области ОЭМО может быть определена так (при независимости параметров качества поверхности, рис. 6)

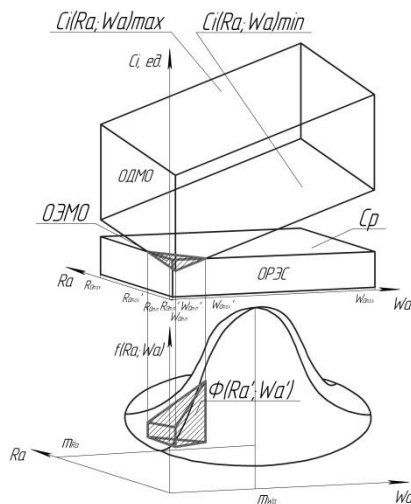


Рис. 7 – Схема задачи выбора метода обработки при регламентации двух параметров качества поверхности

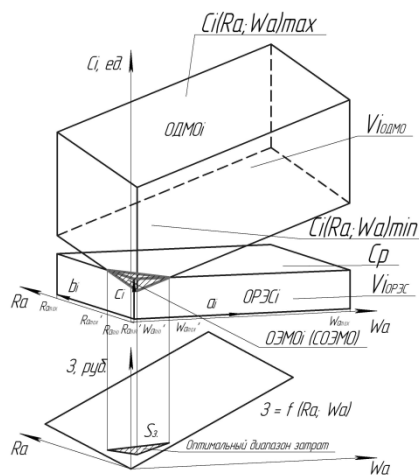


Рис. 8 – Выбор оптимального диапазона затрат при обеспечении эксплуатационных свойств поверхностей зубчатых колес

При проецировании поверхности $OЭМО_i$ на поверхность плотности распределения эта поверхность усекается и находится в интервалах $(R_{amin}^i \leq R_a \leq R_{amax}^i)$ и $(W_{amin}^i \leq W_a \leq W_{amax}^i)$. Плотность распределения (рис. 7):

$$F(R_a; W_a) = \frac{1}{\gamma \cdot \lambda} \cdot \left\{ \Phi(R_a) - \Phi(R_{amin}^i) \right\} \cdot \left\{ \Phi(W_a) - \Phi(W_{amin}^i) \right\}$$

$$\gamma = \Phi\left(\frac{R_{amax}^i - m_{R_a}}{\sigma_{R_a}}\right) - \Phi\left(\frac{R_{amin}^i - m_{R_a}}{\sigma_{R_a}}\right) = \Phi(R_{amax}^i) - \Phi(R_{amin}^i)$$

$$\lambda = \Phi\left(\frac{W_{amax}^i - m_{W_a}}{\sigma_{W_a}}\right) - \Phi\left(\frac{W_{amin}^i - m_{W_a}}{\sigma_{W_a}}\right) = \Phi(W_{amax}^i) - \Phi(W_{amin}^i)$$

где, $(1 - \gamma)$ – степень усекания интервала $(R_{amin} \leq R_a \leq R_{amax})$; $(1 - \lambda)$ – степень усекания интервала $(W_{amin} \leq W_a \leq W_{amax})$; Φ – функция Лапласа; m_{R_a} , m_{W_a} – математические ожидания соответственно случайных величин параметров R_a и W_a ; σ_{R_a} , σ_{W_a} – средние квадратические отклонения соответственно

случайных величин параметров R_a и W_a соответственно

$$P\{(R_a; W_a) \in D\} = \iint_D F(R_a; W_a) dR_a dW_a \quad (13)$$

где, P – вероятность попадания случайной величины параметров качества R_a и W_a в область D .

Для обеспечения эксплуатационных свойств при задании ограниченного набора параметров качества поверхности вероятность для выбранного метода зубообработки определится так:

$$P(R_{ij}) = \prod_{i=1}^n P(R_i) \quad (14)$$

где, $P(R_i)$ – вероятность обеспечения эксплуатационных свойств при регламентации i -го параметра состояния поверхностного слоя.

Назначение режимов зубообработки, обеспечивающей заданные эксплуатационных свойств (блок 15, рис. 1). Для определения режимов обработки используются эмпирические уравнения параметров состояния поверхностного слоя:

$$(R_a, R_p, S_m) = f(S; \mathcal{G}; r; \gamma) \quad (15)$$

где, S – подача, мм/об.; v – скорость резания, м/мин.; r и γ – параметры режущего инструмента, радиус режущей кромки и передний угол соответственно.

Для обеспечения эксплуатационных свойств используются критерии оптимизации в виде неравенства (табл. 1) : [2, 5, 9, 16]

$$[\Pi] \leq \Pi \quad (16)$$

где, Π – расчетно-конструкторское значение комплексного параметра Π ; $[\Pi]$ – значение комплексного параметра Π , достижимого зубообработкой поверхности.

Таким образом, выражение (16) будет иметь вид:

$$\left[\frac{R_p \cdot W_p \cdot H_p}{(K^i)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}} \leq \left[\frac{\sigma_T \cdot (J_{пл.})^6}{1.7 \cdot P} \right]^{\frac{1}{6}} \quad (17)$$

Выразив из (16) не регламентируемый параметр шероховатости R_p и подставив его в соотношение (17) находится оптимальная скорость резания v и число оборотов шпинделя n , которая обеспечит заданные конструктором эксплуатационных свойств:

$$n \geq \frac{60 \cdot 10^3}{\pi \cdot D} \cdot \left[K_0 \cdot W_p \cdot H_p \cdot \frac{S^{K_1}}{r^{K_2}} \cdot \left(\frac{1.7 \cdot P}{\sigma_T \cdot (J_{пл.})^6 \cdot K^i} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{K_3}} \quad (18)$$

В дополнение к трем критериям оптимизации (2.1 – 2.3), рассмотренным выше, можно добавить еще и следующие, на основании рассмотренных рассуждений:

$$PO = \{PO_1, PO_2, PO_3, \dots, PO_n\};$$

$$GI = \{ЭГН_1, ЭГН_2, \dots, ЭГН_m\};$$

$$\begin{aligned}
Z &= \{Z_1, Z_2, \dots, Z_r\}; \\
\exists_B B_{j.onm} PO_n &\rightarrow onm.; \\
\exists_B B_{j.onm} GI_m &\rightarrow onm.; \\
VZ &= \{VZ_1, VZ_2, VZ_3, \dots, VZ_k\}; \\
\exists_B B_{j.onm} Z_r &\rightarrow onm.; \\
\exists_B B_{j.onm} VZ_k &\rightarrow onm.; \\
TC &= \{TC_1, TC_2, TC_3, \dots, TC_t\}; \\
\exists_B B_{j.onm} TC_t &\rightarrow onm.;
\end{aligned}$$

2.4. Множество оптимальных режимов обработки (РО) поверхности для обеспечения эксплуатационных свойств; 2.5. Множество оптимальных параметров геометрии инструмента (ГИ) при обработке поверхности для обеспечения эксплуатационных свойств рассматриваемым МО; 2.6. Множество оптимальных параметров заготовки (З) для рассматриваемой поверхности при обеспечении эксплуатационных свойств предложенным МО; 2.7. Множество оптимальных параметров технологической системы (ТС) при обработке поверхности для обеспечения эксплуатационных свойств рассматриваемым МО; 2.8. Множество оптимальных параметров условий эксплуатации (УЭ) поверхности, которые обеспечиваются заданным МО.

Не имея информации о всем технологическом процессе изготовления зубчатых колес, за функцию стоимости можно взять приведенные затраты на выполнение перехода (рис. 8):

$$Z = \left(\frac{t_{ш.-к.} \cdot (C_{эф} + 3C_{сэ})}{60} + \frac{3_{II}}{N_T} \right) \cdot N_i \quad (19)$$

где, $C_{эф}$ - часовая тарифная ставка f -го разряда станочника, грн.; N_i - годовая программа выпуска i -го изделия; 3_{II} - затраты на эксплуатацию инструмента за период его стойкости, грн.; N_T - количество зубчатых колес, обработанных за период стойкости инструмента, шт.; $3_{сэ}$ - затраты на содержание и эксплуатацию оборудования в течении часа его работы, грн.; $t_{ш.-к.}$ - штучно-калькуляционное время, мин.

В свою очередь приведенные затраты метода механической зубообработки определяются по штучно-калькуляционному времени, которое является функцией основного времени и как следствие частоты вращения шпинделя n и подачи S : $t = f(n; S)$. Функция затрат представляет собой зависимость двух переменных параметров качества поверхности и может рассматриваться как поверхность затрат (рис. 8) (например, $Z = f(H_{max}; R_a)$). Схема решения задачи ФСА представлена на рис. 3.

По приведенным выше зависимостям можно, на основании ограничения (16), провести оптимизацию режимов резания, для выбранного метода зубообработки (рис. 9). В дополнении к ограничениям (рис. 9) подачи и чисел оборотов шпинделя по

мощности привода станка, прочности его механизмов подачи и главного движения, максимальных и минимальных возможных их значений, добавляется ограничение по возможности обеспечения эксплуатационных свойств обрабатываемой поверхности (16).

При регламентации не одного R_z параметра шероховатости поверхности необходимо использовать не плоские графические корреляционные зависимости этих параметров с режимами обработки, а объемные (рис. 10), представляющие собой поверхности в системе координат: $PR_z W_z, V_n R_z W_z, S_n R_z W_z$ и др.

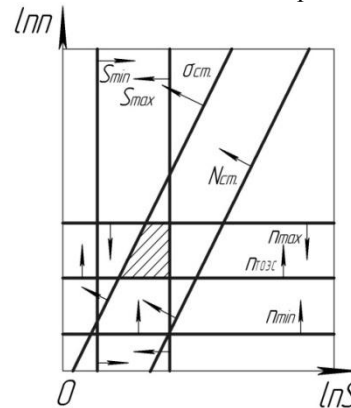


Рис. 9 – Оптимизация режимов зубообработки

Следовательно, выбор оптимальной технологии (блок 15, рис. 1) изготовления является сложной многовариантной задачей. Выбор параметров, обеспечивающих эксплуатационных свойств поверхности, можно проводить в строгом соответствии с табл. 1, а также описанной выше схемы. Критерии оптимизации, рассмотренные в этой статье, позволяют эффективно регулировать качество эксплуатационных свойств изделий с применением комплексных параметров состояния поверхностного слоя.

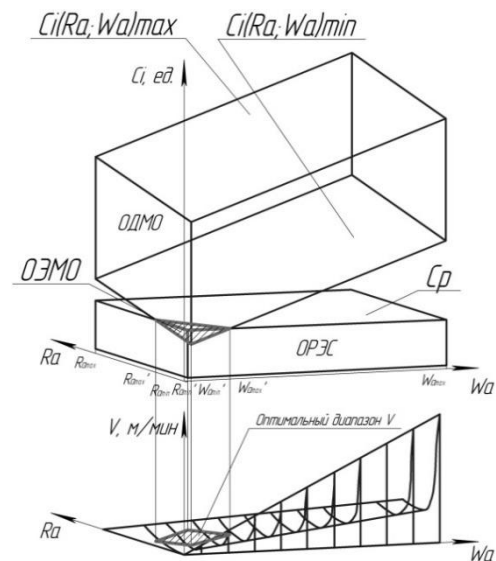


Рис. 10 – Оптимальный диапазон скорости резания при регламентации двух параметров качества поверхности W_a и R_a

Выводы. Рассмотрены вопросы обеспечения качества

восстановленных восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес при их изготовлении за счет обеспечения эксплуатационных свойств их поверхностей. Приведен алгоритм двухступенчатого обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей на основе применения комплексных параметров состояния поверхности и ее многокритериальной оптимизации.

Сформулированы критерии оптимизации технологического обеспечения нескольких эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес с использованием комплексных параметров их состояния, рассмотрены вопросы назначения оптимальных режимов их зубообработки, предложены графические схемы решения этих задач.

Обоснованы решения слабо изученных вопросов, решаемых при конструкторско-технологической подготовке зубообработки, оптимизация технологического обеспечения параметров состояния, характеризующих эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес.

Результаты работы опробованы при разработке технологических процессов механической зубообработки восстановленных восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес 6, 7 и 8 норм точности по ГОСТ1643-81.

Список литературы:

1. *Инженерия поверхностей деталей* / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: «Машиностроение», 2008. – 320 с.
2. *Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес* [Текст] / Н.В. Кравцов, Ю.В. Тимофеев, А.А.Клочко [и др.]; Науч. Ред.: А.А.Пермяков; ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с., ил., табл.; - (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю.М. Соломенцев), ISBN 978-59903090-6-7.
3. *Технология производства и методы методы обеспечения качества зубчатых колес и передач* / Под общ. ред. В. Е. Старжинского, М.М.Кане. – СПб.: Профессия, 2007. – 832 с.
4. Тимофеев, Ю. В. *Оптимизация технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей восстановленных закаленных крупномодульных зубчатых колес* [Текст] / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Восточно-европейский журнал передовых технологий: Прикладная механика. Издательство: Технологический центр (Харьков). Том 4, – № 7 (64) (2013). – С. 49–55.
5. Клочко А.А. *Новые способы высокоскоростной обработки закаленных цилиндрических зубчатых колес абразивным инструментом* / А.А. Клочко, М.И. Гасанов, О.А. Анциферова // Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – С. 54–55.
6. *Погрешности технологических процессов обработки отверстий корпусных деталей тяжелых токарных станков с ЧПУ* / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу». Випуск 3. – Херсон: ХНТУ, 2017. – С. 32–33.
7. *Трибологический метод выбора технологического регламента при скоростном лезвийном зубофрезеровании* / Н.С. Равская, А.А.

- Охрименко, А.А. Клочко, М.И. Гасанов // Труды XXVII международной конференции «Новые технологии в машиностроении» (3–8 сентября 2017 г., Коблево). – Харьков: НАКУ «ХАИ». – 2017. – С. 19–20.
8. *Технологические особенности обеспечения точности изготовления корпусов крупногабаритных редукторов* / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Е.В. Набока // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 20–22 сентября 2017 г., Харьков. – Одесса: ОНПУ, 2017. – С. 108–109.
9. *Актуальность дифференцированного и комплексного прогнозирования в условиях имитационного моделирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств крупномодульных зубчатых колес* / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, А.А. Охрименко, М.И. Гасанов // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези доповіді VII Всеукраїнської науково-технічної конференції, 5–9 лютого 2018 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – С. 127–129.
10. Гасанов М.И. *Оптимизация технологического процесса восстановления крупномодульных зубчатых колес* // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 29 – 31 травня 2018 року / Під заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 17.
11. Гасанов М.И., Шелковий О.М., Клочко О.О., Анциферова О.О. *Имитационное моделирование технологических процессов восстановления крупногабаритных зубчатых колес с учетом прогрессирующих видов износа* // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 29–31 травня 2018 року / Під заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 18.
12. Пермяков А.А., Клочко А.А., Гасанов М.И. *Математическая модель синтеза технологического регламента восстановления функциональных свойств крупномодульных зубчатых передач*. XIX Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, 29 червня - 01 липня 2018 року в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – Т. 4. – С. 348–350.
13. Гасанов М.И., Клочко А.А., Черкашина Г.И., Перминов Е.И. *Групповые маршрутные технологические процессы восстановления крупногабаритных зубчатых колес на основе имитационного моделирования с учетом прогрессирующих видов износа* // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 42. – С. 28–36.
14. *Особливості підвищення якості відновлення крупномодульних зубчастих коліс спреєрним загартуванням* / В.М. Літвінов, М.І. Гасанов, О.О. Клочко // Труды Двадцать девятой международной конференции «Новые технологии и в машиностроении» (2-8 сентября 2019 г., Коблево). – Харьков: НАКУ «ХАИ». – 2019. – С.9.
15. *Проблеми лезвийної обробки на тяжєльх токарних станках с ЧПУ* / Е.В. Мироненко, М.И. Гасанов, С.Ю. Цюанья, Фу Хун, Д.А. Дмитриев // Матеріали V-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу», випуск 5. – Херсон: ХНТУ, 2019. – С.143 – 145.
16. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V Klocho, Alexander A., Gasanov Magomedemin I. *Technology of restoration of large gear boxes*. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.

References (transliterated)

1. *Inzheneriya poverkhnostej detalej* / Koll. avt.; pod red. A.G. Suslova. M.: «Mashinostroenie», 2008. – 320 s.
2. *Tekhnologicheskie osobennosti obrabotki krupnomodul'nykh zakalennykh zubchatykh koles* [Tekst] / N.V. Kravcov, Yu.V. Timofeev, A.A.Klochko [i dr.]; Nauch. Red.: A.A.Permjakov; VolGTU – Tol'yatti: ZAO «ONIKS», 2012 – 254 s., il., tabl.; - (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii / obshh. red. Yu.M. Solomenczev), ISBN 978-59903090-6-7.
3. *Tekhnologiya proizvodstva i metody` metody` obespecheniya kachestva zubchaty`kh koles i peredach* / Pod obshh. red. V. E. Starzhinskogo, M.

- M Kane. – S-Pb. : Profesiya, 2007. – 832 s.
4. Timofeev, Yu. V. *Optimizaciya tekhnologicheskogo obespecheniya e'kspluatatsionny'kh svoystv poverkhnostej vosstanovlennyy'kh vosstanovlennyy'kh zakalenny'kh krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh koles* [Tekst] / Yu. V. Timofeev, A. A. Klochko, A. N. Kravtsov // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovy'kh tekhnologij: Prikladnaya mekhanika. Izdatel'stvo: Tekhnologicheskij tsentr (Khar'kov). Tom 4, – # 7 (64)(2013). – S. 49–55.
 5. Klochko A.A. *Novy'e sposoby' vy'sokoskorostnoj obrabotki zakalenny'kh cilindricheskikh zubchaty'kh koles abrazivny'm instrumentom* / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, O.A. Anczyferova // Informatika, upravlin'nyya ta shuchnij i'ntelet. Materi'ali IV mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhni'chnoyi konferencii'yi studentiv, magist'ri'v ta aspi'ranti'v. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – S. 54–55.
 6. *Pogreshnosti tekhnologicheskikh processov obrabotki otverstij korpusny'kh detalej tyazhely'kh tokarny'kh stankov s ChPU* / A.A. Pemyakov, A.N. Shelkovej, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Materi'ali mi'zhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferencii'yi «Suchasni' tekhnologi'yi promislivogo kompleksu». Vipusk 3. – Kherson: KhNTU, 2017. – S. 32–33.
 7. *Tribologicheskij metod vy'bora tekhnologicheskogo reglamenta pri skorostnom lezviynom zubroferovanii* / N.S. Ravskaya, A.A. Okhrimenko, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Trudy' XXVII mezhdunarodnoj konferencii «Novy'e tekhnologii v mashinostroenii» (3–8 sentyabrya 2017 g., Koblevo). – Khar'kov: NAKU «KhAI». – 2017. – S. 19–20.
 8. *Tekhnologicheskoe osobennosti obespecheniya tochnosti izgotovleniya korpusov krupnogabaritny'kh reduktorov* / A.A. Pemyakov, A.N. Shelkovej, A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Naboka // Novy'e i netradicijny'e tekhnologii v resurso- i energosberezhenii: Materialy' mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 20–22 sentyabrya 2017 g., Khar'kov. – Odessa: ONPU, 2017. – S. 108–109.
 9. *Aktual'nost' differencirovannogo i kompleksnogo prognozirovaniya v usloviyakh imitacionnogo modelirovaniya tekhnologicheskogo obespecheniya e'kspluatatsionny'kh svoystv krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh koles* / A.A. Pemyakov, A.N. Shelkovej, A.A. Klochko, A.A. Okhrimenko, M.I. Gasanov // Zbi'mik naukovikh prac'. Progresivni' tekhnologi'yi v mashinobuduvanni': Tezi dokladi'v VII Vseukrayins'koyi naukovo-tekhni'chnoyi konferencii'yi, 5–9 lyutogo 2018 r. – Naczi'onal'nij uni'versitet «L'viv's'ka poli'tekhnika». – L'viv, 2018. – S. 127–129.
 10. Gasanov M.I. *Optimizaciya tekhnologicheskogo processa vosstanovleniya krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh koles* // Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali Mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhni'chnoyi konferencii'yi 29 – 31 travnya 2018 roku / Pi'd zag. red. V.D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2018. – S. 17.
 11. Gasanov M.I., Shelkovij O.M., Klochko O.O., Anczyferova O.O. *Imitacionnoe modelirovanie tekhnologicheskikh processov vosstanovleniya krupnogabaritny'kh zubchaty'kh koles s ucheto progressivny'kh vidov iznosa* // Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali Mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhni'chnoyi konferencii'yi 29–31 travnya 2018 roku / Pi'd zag. red. V.D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2018. – S. 18.
 12. Pemyakov A.A., Klochko A.A., Gasanov M.I. *Matematicheskaya model' sinteza tekhnologicheskogo reglamenta vosstanovleniya funkcional'ny'kh svoystv krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh peredach*. XI Kh Mi'zhnarodna naukovo-tekhni'chna konferencii'ya „Progressivna tekhnika, tekhnologi'ya ta i'nzhenema osvi'ta“, 29 chervnya - 01 lipnya 2018 roku v Naczi'onal'nomu tekhnichnomu uni'versiteti' Ukrayini «Kiyiv's'kij poli'tekhnichnij i'nstitut i'meni' Gorya Si'kors'kogo». – Kiyiv: NTUU «KPI», 2018. – T. 4. – S. 348–350.
 13. Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashina G.I., Perminov E.I. *Grupovy'e marshrutny'e tekhnologicheskie processy' vosstanovleniya krupnogabaritny'kh zubchaty'kh koles na osnove imitacionnogo modelirovaniya s ucheto progressivny'kh vidov iznosa* // Nadi'jni'st' i'nstrumentu ta optimi'zacii' tekhnologicheskikh sistem: zb.nauk. pr. – Kramators'k: DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 28–36.
 14. *Osoblivosti' pi'dvishhennya yakosti' vi'dnovlennya krupnomodul'nikh zubchastikh koli's sprejernim zagartuvannjam* / V.M. Li'tvi'nov, M.I. Gasanov, O.O. Klochko // Trudy' Dvadczat' devyatoj mezhdunarodnoj konferencii «Novy'e tekhnologii v mashinostroenii» (2–8 sentyabrya 2019 g., Koblevo). – Khar'kov: NAKU «KhAI». – 2019. – S.9.
 15. *Problemy' lezviynoj obrabotki na tyazhely'kh tokarny'kh stankakh s ChPU* / E.V. Mironenko, M.I. Gasanov, Syuj Czyuan'yao, Fu Khun, D.A. Dmitriev // Materi'ali V-yoi Mi'zhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferencii'yi «Suchasni' tekhnologi'yi promislivogo kompleksu», vipusk 5. – Kherson: KhNTU, 2019. – S.143–145.
 16. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V Klochko, Alexander A., Gasanov Magomedemin I. *Technology of restoration of large gear boxes*. Dasić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vmjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – R. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.

Поступила (received) 16.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гасанов Магомедмін Ісамагомедович (Гасанов Магомедмін Ісамагомедович, Hasanov Magomedemin Isamagomedovich) – проректор по науково-педагогічній роботі, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (096)-590-8850; e-mail: kh.kajvika@gmail.com;

Волошин Олексій Іванович (Волошин Алексей Иванович, Voloshin Alexey Ivanovich) – головний інженер приватного акціонерного товариства «Новокраматорський машинобудівний завод», м. Краматорськ; тел.: +380626-478801; e-mail: voloshyn@nkmz.donetsk.ua ;

Клочко Олександр Олександрович (Клочко Александр Александрович, Klochko Alexander Alexandrovich) – доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455;

Бабенко Максим Віталійович (Бабенко Максим Витальевич, Babenko Maxim Vitalievich) – магістр, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (066)762-41-70; e-mail: babenko29052000@gmail.com.

НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСКИЙ В. И.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Предложен теоретический подход к определению параметров теплового процесса при механической обработке с позиции закона сохранения энергии с учетом аналитического представления энергоёмкости обработки. Теоретически обоснован характер распределения тепла, возникающего при механической обработке (точении), уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали и образующуюся стружку. На этой основе аналитически определена температура резания, которая увязана с толщиной нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности. Показано, что с увеличением скорости резания температура резания непрерывно увеличивается до определенного значения, а затем остается постоянной при одновременном увеличении производительности обработки. При этом толщина нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности детали с увеличением скорости резания непрерывно уменьшается, что снижает вероятность возникновения в поверхностном слое обрабатываемой детали температурных дефектов (прижогов, микротрещин). Причем, данная закономерность, исходя из выполненных расчетов, имеет место как при равномерном, так и неравномерном распределении тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали. Следовательно, с увеличением скорости резания образующееся тепло фактически полностью уходит на нагревание стружки, что согласуется с экспериментальными данными. Этим показано, что характер изменения температуры резания аналогичен характеру изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку: чем она больше, тем больше температура резания. Поэтому исследования закономерностей изменения температуры резания сводится, по сути, к установлению характера изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку, что является основой выбора оптимальных параметров механической обработки по температурному критерию.

Ключевые слова: точение, резец, температура резания, энергоёмкость обработки, обрабатываемая деталь, температурный критерий, производительность обработки.

НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСКИЙ В. И.

ЗАКОНОМІРНОСТІ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМИ ПРОЦЕСАМИ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ

Запропоновано теоретичний підхід до визначення параметрів теплового процесу при механічній обробці з позиції закону збереження енергії з урахуванням аналітичного уявлення енергоємності обробки. Теоретично обґрунтований характер розподілу тепла, що виникає при механічній обробці (точіння), який іде у поверхневий шар оброблюваної деталі та стружку, що утворюється. На цій основі аналітично визначена температура різання, яка пов'язана з товщиною нагрітого поверхневого шару оброблюваної поверхні. Показано, що зі збільшенням швидкості різання температура різання безперервно збільшується до певного значення, а потім залишається постійною при одночасному збільшенні продуктивності обробки. При цьому товщина нагрітого поверхневого шару оброблюваної поверхні деталі зі збільшенням швидкості різання безперервно зменшується, що знижує ймовірність виникнення в поверхневому шарі оброблюваної деталі температурних дефектів (припикань, мікротріщин). Причому, дана закономірність, виходячи з виконаних розрахунків, має місце як при рівномірному, так і нерівномірному розподілі тепла в поверхневому шарі оброблюваної деталі. Отже, зі збільшенням швидкості різання тепло, що утворюється, фактично повністю йде на нагрівання стружки, що узгоджується з експериментальними даними. Цим показано, що характер зміни температури різання аналогічний характеру зміни частки тепла, що йде в стружку, яка утворюється: чим вона більше, тим більше температура різання. Тому дослідження закономірностей зміни температури різання зводиться, по суті, до встановлення характеру зміни частки тепла, що йде в стружку, яка утворюється, що є основою вибору оптимальних параметрів механічної обробки за температурним критерієм.

Ключові слова: точіння, різець, температура різання, енергоємність обробки, деталь, що оброблюється, температурний критерій, продуктивність обробки.

NOVIKOV F. V., POLYANSKY V. I.

REGULATIONS OF MANAGEMENT OF HEAT PROCESSES DURING MECHANICAL PROCESSING

A theoretical approach to determining the parameters of a heat process during mechanical processing from the standpoint of the law of conservation of energy is proposed taking into account the analytical representation of the energy intensity of processing. The nature of the distribution of heat that occurs during machining (turning), leaving in the surface layer of the workpiece and the resulting chips is theoretically substantiated. On this basis, the cutting temperature has been analytically determined, which is related to the thickness of the heated surface layer of the treated surface. It is shown that with an increase in cutting speed, the cutting temperature continuously increases to a certain value, and then remains constant with a simultaneous increase in processing productivity. In this case, the thickness of the heated surface layer of the workpiece surface with a decrease in cutting speed continuously decreases, which reduces the likelihood of temperature defects in the surface layer of the workpiece being treated (burns, microcracks). Moreover, this regularity, based on the calculations made, takes place both with uniform and uneven distribution of heat in the surface layer of the workpiece. Consequently, with an increase in the cutting speed, the generated heat almost completely goes to the heating of the chips, which is consistent with experimental data. This shows that the nature of the change in cutting temperature is similar to the nature of the change in the fraction of heat leaving in the generated chips: the more it is, the higher the cutting temperature. Therefore, the study of the laws of change in cutting temperature is reduced, in essence, to establishing the nature of the change in the fraction of heat leaving in the generated chips, which is the basis for choosing the optimal machining parameters according to the temperature criterion.

Keywords: turning, cutter, cutting temperature, processing energy consumption, workpiece, temperature criterion, processing productivity.

1. Введение. Общеизвестно, что тепловые процессы, возникающие при механической обработке, отрицательно влияют на качество обрабатываемой поверхности и работоспособность режущего инструмента. Поэтому определение условий уменьшения температуры резания является актуальной задачей механической обработки. В настоящее время на практике накоплен большой

арсенал различных технологических средств уменьшения температуры резания. Особенно это относится к процессам шлифования, характеризующимся повышенными температурами резания и образованию на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. Применение шлифовальных кругов, обладающих высокой режущей способностью,

позволяет добиться уменьшения температуры. При лезвийной обработке температура резания также может достигать значения температуры плавления обрабатываемого материала, что требует изыскания эффективных технологических средств для ее уменьшения. Поэтому в настоящей работе решается актуальная задача теоретического определения условий управления тепловыми процессами при механической обработке, которые обеспечивают уменьшение температуры резания и повышение качества и производительности обработки.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам управления тепловыми процессами при лезвийной и абразивной обработках посвящены работы [1-3]. В них приведены теоретические решения определения тепловых полей, возникающих в поверхностных слоях обрабатываемой детали, и установлены оптимальные условия обработки, обеспечивающие заданную температуру резания. Это позволило теоретически обосновать основные направления уменьшения температуры резания и повышение качества и производительности обработки. Однако, в полученных решениях недостаточно четко показано распределение тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующуюся стружку при лезвийной обработке. Для этого в расчетах используются экспериментальные данные, справедливые для частных условий обработки, которые не позволяют получить обобщенные решения. Поэтому в работе приведено аналитическое решение данной задачи и произведена его экспериментальная оценка на основе теоретического подхода, предложенного в работе [4].

3. Цель исследования. Теоретическое обоснование условий уменьшения температуры резания при механической обработке.

4. Изложение основного материала. Согласно закона сохранения энергии, работа резания A , затрачиваемая на нагревание обрабатываемого материала, главным образом, образующейся стружки, определяется зависимостью:

$$A = Q_T = c \cdot m \cdot \theta, \quad (1)$$

где Q_T – количество тепла, затрачиваемого на нагревание обрабатываемого материала (образующейся стружки), Дж; $A = Q_T = c \cdot m \cdot \theta$ – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); $m = \rho \cdot g$ – масса удаленного материала, кг; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; θ – температура нагрева обрабатываемого материала (температура резания), К.

Откуда

$$\frac{A}{g} = c \cdot \rho \cdot \theta. \quad (2)$$

Отношение A/g , равное условному напряжению резания σ (энергоемкости обработки), в данном случае вполне однозначно определяется температурой резания θ : чем она больше, тем больше отношение A/g . С учетом зависимости (2) имеем:

$$\sigma = c \cdot \rho \cdot \theta. \quad (3)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость для определения условного напряжения резания σ с учетом температуры резания θ . Зная условное напряжение резания σ , на основе зависимости (3) можно определить температуру резания:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}. \quad (4)$$

В данном случае основным условием уменьшения температуры резания θ является уменьшение условного напряжения резания σ путем уменьшения интенсивности трения в зоне резания.

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (3) значения условного напряжения резания σ применительно к обработке стали 45 ($c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град.) = 5 Н/(мм²·град.)).

Таблица 1 – Расчетные значения условного напряжения резания σ

θ , град.	100	300	600	900	1200	1500	1800	2000
$\sigma \cdot 10^3$, Н/мм ²	0,5	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10

В работе [4] приведена зависимость для определения температуры резания при точении без учета трения задней поверхности резца с обрабатываемым материалом, а с учетом нагрева лишь образующейся стружки и обрабатываемой детали:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{h}{a}\right)} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot a \cdot V \cdot \tan \beta}}\right)}, \quad (5)$$

где h – толщина нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности, м; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала,

Вт/м·К; a – толщина среза, м; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

Как видно, с увеличением скорости резания V температура резания увеличивается, асимптотически приближаясь к предельному значению $\theta = \sigma / (c \cdot \rho)$, определяющему температуру нагрева стружки (рис. 1). Это обусловлено уменьшением толщины нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности h , т.е. уменьшением доли тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и увеличением доли тепла, уходящего в образующуюся стружку.

Таким образом показано, что при небольшой скорости резания V в связи с тем, что значительная часть тепла уходит в поверхностный слой материала

обрабатываемой детали, температура резания θ незначительна, несмотря на высокие значения условного напряжения резания σ . По мере увеличения скорости резания V и, соответственно, уменьшения параметра h , температура резания θ увеличивается и может достигать предельного значения $\theta = \sigma / (c \cdot \rho)$, после чего остается постоянной при дальнейшем увеличении V .

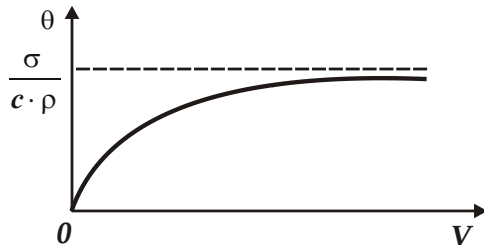


Рис. 1 – Зависимость температуры резания θ от скорости резания V

Следовательно, одновременный учет тепла, уходящего в образующуюся стружку и в поверхностный слой материала обрабатываемой детали, позволяет уточнить расчетные значения температуры резания θ и привести в соответствие теорию и практику механической обработки.

Для оценки достоверности теоретического решения следует воспользоваться результатами экспериментальных исследований параметров процесса точения стали ШХ15 резцами из эльбора-Р (рис. 2, рис. 3), приведенными в работе [5].

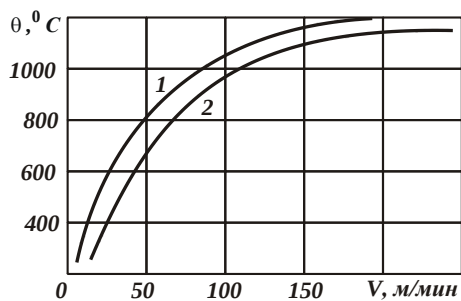


Рис. 2 – Влияние скорости резания V на температуру резания θ при точении: подача $S = 0,05$ мм/об.; глубина резания $t = 0,1$ мм; сталь ШХ15 (HRC 63); 1 – гексанит-Р; 2 – эльбор-Р

Как следует из рис. 2 [5], с увеличением скорости резания V составляющие силы резания P_z , P_y и P_x непрерывно уменьшаются. Температура резания θ при этом, наоборот, увеличивается, приближаясь к определенному значению (рис. 3 [5]). В табл. 2 приведены экспериментальные значения составляющих силы резания P_z и P_y , взятые из рис. 2, и значения условного напряжения резания σ , рассчитанные на основе зависимости $\sigma = P_z / S_{срез}$ с учетом $S_{срез} = S \cdot t = 0,005$ мм², где S – подача, мм/об.; t – глубина резания, мм.

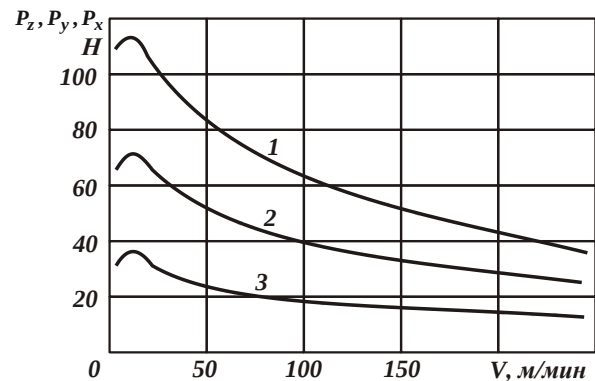


Рис. 3 – Влияние скорости резания V на составляющие силы резания P_z (1), P_y (2) и P_x (3) при точении: подача $S = 0,05$ мм/об.; глубина резания $t = 0,1$ мм; сталь ШХ15 (HRC 63); резцы: эльбор-Р

Как видно, условное напряжение резания σ принимает значения, значительно превышающие предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, что свидетельствует об интенсивном трении в зоне резания. Расчеты температуры резания θ по зависимости (4) с учетом значений σ , приведенных в табл. 2, и величины $c \cdot \rho = 4,5$ Н/(мм²·град.) показали, что расчетные и экспериментальные значения температуры резания θ примерно равны при скорости резания $V = 250$ м/мин, т.е. когда происходит стабилизация экспериментальной кривой $\theta - V$ (рис. 3 [5]).

Таблица 2 – Экспериментальные и расчетные значения параметров процесса точения

V , м/мин	25	50	100	150	200	250
P_z , Н	60	51	40	33	26	25
P_y , Н	100	81	63	52	42	35
σ , Н/мм ²	12000	10200	8000	6600	5200	5000
$\theta_{расч}$, град.	2667	2267	1778	1466	1155	1111
$\theta_{эксп}$, град.	420	660	960	1090	1140	1150
h/a	5,35	2,43	0,85	0,35	0,01	0

$h, \text{ мм}$	0,187	0,085	0,03	0,012	0	0
-----------------	-------	-------	------	-------	---	---

При скорости резания $V < 250$ м/мин расчетные значения температуры резания θ превышают экспериментальные значения в связи с тем, что в расчетах по зависимости (4) не учитывается доля тепла, уходящего в обрабатываемый материал. Принято, что все образующееся при резании тепло уходит в образующуюся стружку. Однако, это справедливо лишь при скорости резания $V = 250$ м/мин, когда расчетное $\theta_{расч}$ и экспериментальное

$\theta_{эксн}$ значения температуры резания равны (табл. 2). При меньших скоростях резания часть тепла уходит в поверхностный слой обрабатываемой детали, что приводит к уменьшению температуры резания θ до значений, приведенных на рис. 3 [5]. Таким образом, теоретически обосновано и экспериментально подтверждено существование важнейшего условия процесса резания, состоящего в том, что при достижении определенной скорости резания V температура резания θ стабилизируется, поскольку образующееся тепло полностью уходит на нагревание стружки. В поверхностный слой обрабатываемой детали образующееся при резании тепло фактически не поступает. Это условие следует рассматривать одним из основных условий процесса резания. На его основе можно оценивать физические и технологические закономерности процесса резания, устанавливать рациональные параметры обработки.

Следовательно, в отличие от зависимости (4), более правильно характер изменения температуры резания θ с увеличением скорости резания V описывает зависимость (5), которая учитывает тепло, уходящее как в стружку, так и в обрабатываемую деталь. Из зависимости (5) вытекает, что на характер изменения температуры резания θ существенно влияет отношение h/a . Для его определения зависимость (5) следует представить в виде:

$$\frac{h}{a} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \theta} - 1. \quad (6)$$

С учетом значений параметров σ и $\theta = \theta_{эксн}$, приведенных в табл. 2, по зависимости (6) произведен расчет отношения h/a . Установлено, что с увеличением скорости резания V отношение h/a уменьшается (табл. 2, рис. 4,а), принимая нулевое значение при $V = 250$ м/мин.

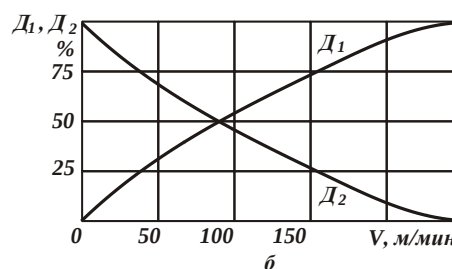
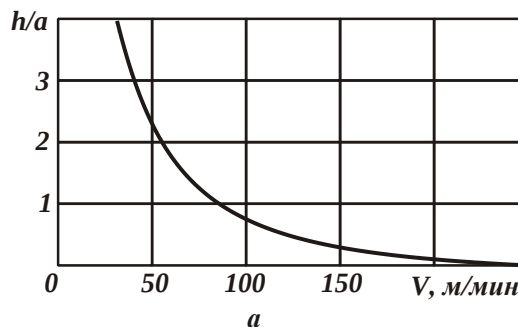


Рис. 4 – Зависимости отношения h/a (а) и долей тепла, уходящего в образующуюся стружку (D_1) и обрабатываемую деталь (D_2), (б) от скорости резания V

Следовательно, с увеличением скорости резания V уменьшается доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и, соответственно, увеличивается доля тепла, уходящего в образующуюся стружку. При $V = 250$ м/мин все образующееся при резании тепло уходит в стружку, что объективно отражает физические закономерности формирования теплового потока при резании. Из этого можно сделать вывод, что с увеличением скорости резания V (т.е. с переходом в область высокоскоростного резания) уменьшается вероятность возникновения в поверхностном слое обрабатываемой детали дефектов, вызванных температурным фактором (прижогов, микротрещин и др.).

В работе [6] установлено, что при продольном точении толщина среза определяется зависимостью $a = S \cdot \sin \varphi$, ширина среза – зависимостью $b = t / \sin \varphi$, соответственно, площадь поперечного сечения среза – зависимостью $S_{срез} = S \cdot t$. В этом случае $S = 0,05$ мм/об., $t = 0,1$ мм, $\varphi = 45^\circ$, тогда $a = 0,035$ мм; $b = 0,141$ мм.

В табл. 2 приведены расчетные значения h (для $a = 0,035$ мм), которые существенно увеличиваются с уменьшением скорости резания V .

Для определения долей тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь, зависимость (6) следует представить в виде уравнения:

$$\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma} \cdot \left(1 + \frac{h}{a}\right) = 1. \quad (7)$$

Первое слагаемое уравнения определяет долю тепла, уходящего в образующуюся стружку (D_1), а второе слагаемое – долю тепла, уходящего в обрабатываемую деталь (D_2).

Подставляя в уравнение (7) значения параметров σ , $\theta = \theta_{\text{эксн}}$ и h/a , приведенных в табл. 2, определены доли тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь (табл. 3).

Как видно, с увеличением скорости резания V доля тепла, уходящего в образующуюся стружку, непрерывно увеличивается до значения 100 %, а доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, наоборот, уменьшается до нулевого значения при $V = 250$ м/мин (рис. 4,б).

При скорости резания $V = 25$ м/мин в обрабатываемую деталь уходит значительно больше тепла, чем в образующуюся стружку, что и предопределяет относительно большое значение $h = 0,187$ мм (табл. 2), в 5,35 раз превышающее толщину среза a .

В работе [7] показано, что при расчете температуры резания θ необходимо учитывать неравномерность распределения тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали толщиной h (рис. 5). С физической точки зрения температура резания θ по глубине поверхностного слоя должна уменьшаться по закону, близкому к линейному закону. Поэтому для упрощения расчетов в первом приближении следует принять линейный закон уменьшения температуры резания θ . Тогда условие (1) выразится (рис. 5):

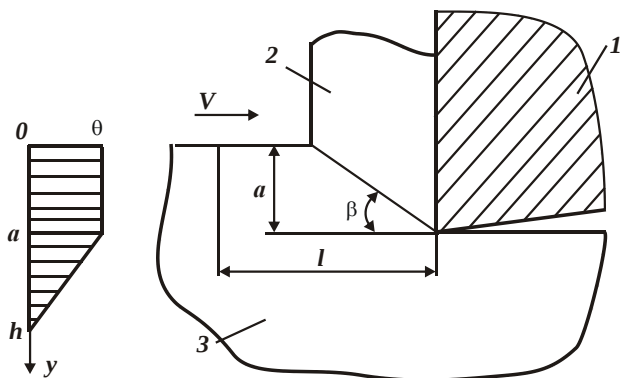


Рис. 5 – Расчетная схема параметров процесса резания и характер изменения температуры резания θ по глубине нагретого поверхностного слоя обрабатываемой детали h :

Таблица 3 – Расчетные значения долей тепла, уходящего в образующуюся стружку (D_1) и обрабатываемую деталь (D_2)

V , м/мин	25	50	100	150	200	250
D_1 , %	15,75	29,1	54,1	74,3	98,7	100
D_2 , %	84,25	70,9	45,9	25,7	1,3	0

1 – резец; 2 – образующаяся стружка; 3 – обрабатываемый материал

$$P_z \cdot l = c \cdot \rho \cdot \left(\mathcal{Q}_1 + \frac{1}{2} \cdot \mathcal{Q}_2 \right) \cdot \theta, \quad (8)$$

где $P_z = \sigma \cdot S_{\text{срез}} = \sigma \cdot a \cdot b$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н; a , b – толщина и ширина среза, м; l – длина пути резания, м; $\mathcal{Q}_1 = a \cdot b \cdot l$ – объем образующейся стружки, м³; $\mathcal{Q}_2 = h \cdot b \cdot l$ – объем нагретого поверхностного слоя обрабатываемой детали, м³; h – толщина нагретого поверхностного слоя обрабатываемой детали, м.

После преобразований получено:

$$\sigma = c \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{a}\right) \cdot \theta. \quad (9)$$

Тогда температура резания θ опишется:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{a}\right)}. \quad (10)$$

Как видно, зависимость (10) отличается от аналогичной зависимости (5) наличием множителя 0,5 в знаменателе второго слагаемого. Это указывает на увеличение температуры резания θ по мере увеличения параметра h .

Для определения отношения h/a зависимость (10) необходимо представить в виде:

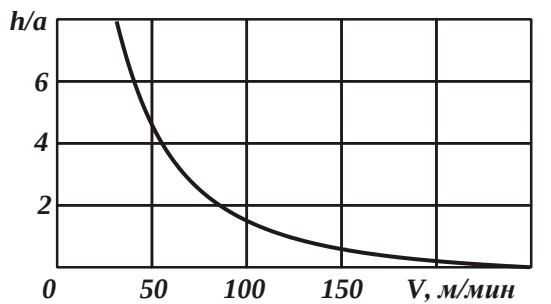
$$\frac{h}{a} = 2 \cdot \left(\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma} - 1 \right). \quad (11)$$

В табл. 4 приведены значения отношения h/a и параметра h (для $a = 0,035$ мм), рассчитанные с учетом значений параметров σ и $\theta = \theta_{\text{эксн}}$, представленных в табл. 2 и на рис. 6.

В данном случае значения отношения h/a и параметра h вдвое больше аналогичных значений, приведенных в табл. 2, т.е. учет неравномерности распределения тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали приводит к увеличению отношения h/a и, соответственно, параметра h .

Таблица 4 – Расчетные значения отношения h/a и параметра h

V , м/мин	25	50	100	150	200	250
h/a	10,7	4,86	1,7	0,7	0,02	0
h , мм	0,374	0,17	0,06	0,024	0	0



Для определения долей тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь, зависимость (11) следует представить в виде уравнения:

$$\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{a}\right) = 1. \quad (12)$$

Как и в уравнении (7), первое слагаемое уравнения (12) определяет долю тепла, уходящего в образующуюся стружку (D_1), а второе слагаемое определяет долю тепла, уходящего в обрабатываемую деталь (D_2). Подставляя в уравнение (12) значения параметров σ , $\theta = \theta_{эксн}$ (табл. 2) и h/a (табл. 4), установлено, что доли тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь, принимают те же значения, как и в случае равномерного распределения тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали (табл. 3). Таким образом показано, что учет неравномерности распределения тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали позволяет уточнить расчетные значения отношения h/a и параметра h . При этом температура резания θ , определяемая зависимостью (10), увеличивается с большей интенсивностью за счет наличия во втором слагаемом в знаменателе коэффициента 0,5.

Полученные результаты расчетов указывают на то, что характер изменения температуры резания θ аналогичен характеру изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку: чем она больше, тем больше температура резания θ . Наибольшее значение θ достигается при условии 100 %-го перехода тепла в образующуюся стружку. В этом случае доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, равна нулю. Поэтому при дальнейшем увеличении скорости резания V температура резания θ не изменяется, она остается постоянной, зависящей лишь от условного напряжения резания σ , как это вытекает из зависимости (10). Следовательно, исследование закономерностей изменения температуры резания θ сводится к установлению характера изменения доли тепла, уходящего в

образующуюся стружку. Это также следует рассматривать важнейшим условием осуществления процесса резания и выбора оптимальных параметров обработки по температурному критерию.

Выводы. В работе теоретически обоснован характер распределения тепла, возникающего при механической обработке (точении), уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали и образующуюся стружку. На этой основе теоретически определена температура резания, которая увязана с толщиной нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности. Показано, что с увеличением скорости резания температура резания непрерывно увеличивается до определенного значения, а затем остается постоянной. При этом толщина нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности непрерывно уменьшается. Следовательно, образующееся тепло фактически полностью уходит на нагревание стружки, что согласуется с экспериментальными данными. Этим показано, что характер изменения температуры резания аналогичен характеру изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку: чем она больше, тем больше температура резания. Поэтому исследования закономерностей изменения температуры резания сводится, по сути, к установлению характера изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку.

Список литературы:

1. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
3. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
4. Новиков Ф. В. Аналитическое определение температуры резания при лезвийной обработке / Новиков Ф. В., Полянский В. И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. – № 33 (1205). – С. 133–138.
5. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навч. посібник / за ред. А. І. Грабченка. – Харків: ХДПУ, 1999. – 436 с.
6. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
7. Технологии производства: проблемы и решения: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, С. А. Дитиненко и др. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 536 с.

References (transliterated)

1. Reznikov A. N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermophysics of the processes of mechanical processing of materials]. – Moskva, Mashinostroyeniye. 279 s. (1981).

2. Silin S. S. *Metod podobiya pri rezanii materialov* [The method of similarity when cutting materials]. Moskva, Mashinostroyeniye. 152 c. (1979).
3. Sipaylov V. A. *Teplovyye protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti* [Thermal processes during grinding and surface quality control]. Moskva, Mashinostroyeniye. 166 c. (1978).
4. Novikov F. V., Polyanskiy V. I. *Analiticheskoye opredeleniye temperatury rezaniya pri lezviynoy obrabotke* [Analytical determination of cutting temperature during blade processing] / *Vestnik NTU "KHPI". Seriya: Tekhnologii v mashinostroyenii* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Engineering Technologies]. Khar'kov, NTU "KHPI". № 33 (1205). 133–138 (2016).
5. *Robochi protsesy vysokikh tekhnolohiy v mashynobuduvanni* [Working processes of high technologies in mechanical engineering]: navch. posibnyk / za red. A. I. Hrabchenka. Kharkiv, KhDPU. 436 c. (1999).
6. Bobrov V. F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moskva, Mashinostroyeniye. 343 c. (1975).
7. Novikov F. V., Zhovtobryukh V. A., Ditinenko S. A., Kryuk A. G., Savchenko N. F., Shkurupiy V. G., Polyanskiy V. I., Ryabenkov I. A., Novikov D. F. *Tekhnologii proizvodstva: problemy i resheniya* [Production technologies: problems and solutions]: monografiya. – Dnepr: LIRA. 536 c. (2018).

Поступила (received) 15.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasilivych) – доктор технічних наук, професор кафедри "Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: novikovfv@i.ua ORCID: 0000-0001-6996-3356

Полянський Володимир Іванович (Полянский Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich) – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ "Імперія металів", м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com, ORCID: 0000-0003-2841-9455

СЕРГЕЕВ А. С.

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Предложен теоретический подход к обоснованию условий уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке с учетом величины удаленной части микронеровностей, оставшихся на обрабатываемой поверхности после предварительной лезвийной обработки. Установлено, что параметр шероховатости поверхности R_a при этом непрерывно уменьшается, а отношение R_{max}/R_a , наоборот, увеличивается, достигая значений 30 и более в условиях абразивного полирования. Полученные расчетные значения согласуются с экспериментальными данными. Таким образом, на основе предложенного теоретического подхода удалось определить характер изменения отношения параметров шероховатости поверхности R_{max}/R_a , которое дополняет анализ образования шероховатости поверхности при абразивной обработке, выполненный с учетом параметра R_a . Показано, что при внутреннем шлифовании параметр шероховатости поверхности R_a значительно больше, чем при абразивном полировании. Поэтому для его уменьшения предложено внутреннее шлифование осуществлять кругом с мягкой основой, например, мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Этот круг обеспечивает утопание абразивных зерен в связку и увеличение количества работающих зерен, что, как установлено экспериментально, приводит к уменьшению шероховатости поверхности при одновременном увеличении производительности обработки. В результате появляется возможность совместить операции предварительного и окончательного внутреннего абразивного шлифования в одну операцию с обеспечением требуемых (высоких) показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей. Теоретически установлено, что уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a можно также увеличением скорости круга и уменьшением скорости поперечной подачи.

Ключевые слова: абразивное полирование, внутреннее шлифование, мягкий войлочный круг, абразивный порошок, количество работающих зерен, производительность обработки

СЕРГІЄВ О. С.

ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ

Запропоновано теоретичний підхід до обґрунтування умов зменшення шорсткості поверхні при фінішній абразивній обробці з урахуванням величини віддаленої частини микронеровностей, що залишилися на оброблюваній поверхні після попередньої лезової обробки. Встановлено, що параметр шорсткості поверхні R_a при цьому безперервно зменшується, а відношення R_{max} / R_a , навпаки, збільшується, досягаючи значень 30 і більше в умовах абразивного полірування. Отримані розрахункові значення узгоджуються з експериментальними даними. Таким чином, на основі запропонованого теоретичного підходу вдалося визначити характер зміни відношення параметрів шорсткості поверхні R_{max} / R_a , яке доповнює аналіз утворення шорсткості поверхні при абразивній обробці, виконаний з урахуванням параметра R_a . Показано, що при внутрішньому шліфуванні параметр шорсткості поверхні R_a значно більше, ніж при абразивному поліруванні. Тому для його зменшення запропоновано внутрішнє шліфування здійснювати кругом з м'якою основою, наприклад, м'яким повстяним (фетровим) кругом з наклеєним шаром абразивного порошку 63С 20П. Цей круг забезпечує утопання абразивних зерен в зв'язку і збільшення кількості працюючих зерен, що, як встановлено експериментально, призводить до зменшення шорсткості поверхні при одночасному збільшенні продуктивності обробки. В результаті з'являється можливість поєднати операції попереднього і остаточного внутрішнього абразивного шліфування в одну операцію із забезпеченням необхідних (високих) показників шорсткості оброблюваних поверхонь. Теоретично встановлено, що зменшити параметр шорсткості поверхні можна також збільшенням швидкості круга і зменшенням швидкості поперечної подачі.

Ключові слова: абразивне полірування, внутрішнє шліфування, м'який повстяний круг, абразивний порошок, кількість працюючих зерен, продуктивність обробки.

SERHIEV ALEXANDER

SUBSTANTIATION OF EFFICIENCY OF APPLICATION OF ABRASIVE MACHINING TO REDUCE SURFACE ROUGHNESS

A theoretical approach is proposed to justify the conditions for reducing surface roughness during finishing abrasive treatment taking into account the magnitude of the removed part of the microroughness remaining on the treated surface after preliminary blade processing. It was found that the surface roughness parameter R_a in this case continuously decreases, and the ratio R_{max} / R_a , on the contrary, increases, reaching values of 30 or more under conditions of abrasive polishing. The calculated values obtained are consistent with the experimental data. Thus, on the basis of the proposed theoretical approach, it was possible to determine the nature of the change in the ratio of surface roughness parameters R_{max} / R_a , which complements the analysis of the formation of surface roughness during abrasive processing, performed taking into account the parameter R_a . It is shown that with internal grinding, the surface roughness parameter R_a is much larger than with abrasive polishing. Therefore, to reduce it, it was proposed to carry out internal grinding with a circle with a soft base, for example, a soft felt (felt) wheel with a glued layer of abrasive powder 63C 20P. This circle ensures that abrasive grains are buried in a bundle and an increase in the number of working grains, which, as established experimentally, leads to a decrease in surface roughness while increasing processing productivity. As a result, it becomes possible to combine the operations of preliminary and final internal abrasive grinding in one operation with the provision of the required (high) roughness indices of the machined surfaces. It has been theoretically established that it is also possible to reduce the surface roughness parameter by increasing the circle speed and decreasing the lateral feed rate.

Keywords: abrasive polishing, internal grinding, soft felt wheel, abrasive powder, number of working grains, processing performance.

1. Введение. Изготовление деталей машин в современных условиях требует высококачественной обработки их поверхностей, что достигается применением эффективных финишных операций абразивной обработки. В особой мере это относится к операциям шлифования внутренних поверхностей гидро- и пневмоцилиндров, где требуется обеспечить

высокие требования шероховатости поверхности после предварительных операций лезвийной обработки. Однако, как показывает практика, выполнить эти требования на операциях внутреннего шлифования обычными абразивными кругами весьма сложно. Поэтому актуальна задача применения новых более эффективных технологий финишной

абразивной обработки внутренних поверхностей гидро- и пневмоцилиндров, обеспечивающих снижение шероховатости поверхности до требуемого уровня – не выше $R_a=0,05$ мкм. Перспективным направлением следует рассматривать применение метода внутреннего шлифования мягким войлочным (фетровым) кругом, на рабочей поверхности которого расположено большее количество абразивных зерен, чем на обычном абразивном круге. В связи с этим необходимо, прежде всего, теоретически обосновать возможности существенного уменьшения шероховатости поверхности при внутреннем шлифовании этим кругом. Это позволит совместить операции предварительного и окончательного шлифования в одну операцию, обеспечивая увеличение производительности и снижение трудоемкости обработки.

2. Анализ последних исследований и публикаций.

Вопросам снижения шероховатости поверхности при абразивной обработке в научно-технической литературе уделено довольно большое внимание. В работе [1-3] получены аналитические зависимости для определения параметров шероховатости поверхности при шлифовании с позиции теоретико-вероятностного подхода. По сравнению с традиционно применявшимся упрощенным геометрическим подходом к расчету параметров шлифования, этот подход позволяет более правильно описать взаимодействие абразивных зерен с обрабатываемым материалом и приблизить результаты расчетов к экспериментальным данным.

В работах [4, 5] приведены аналитические модели определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании. При этом экспериментально установлено, что отношение параметров шероховатости поверхности R_{max}/R_a может достигать значения 30, тогда как при шлифовании оно не превышает 10. Параметр R_a принимает в этом случае значения, меньшие 0,1 мкм, чего нельзя добиться при шлифовании. Такое отличие параметров шероховатости поверхности при шлифовании и абразивном полировании свидетельствует о существовании значительных отличительных признаков в формировании шероховатости поверхности. Однако в научно-технической литературе они в достаточной степени не раскрыты. Поэтому представляется важным и актуальным, используя теоретический подход,

предложенный в работах [4, 5], провести дальнейшие исследования закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке и выявить новые технологические возможности уменьшения шероховатости при шлифовании. Иными словами, попытаться реализовать при шлифовании эффекты, связанные с уменьшением шероховатости поверхности, присущие процессу абразивного полирования, но с более высокой производительностью обработки.

3. Цель исследования. Теоретическое обоснование условий существенного уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке.

4. Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи воспользуемся расчетной схемой определения параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке, приведенной в работе [4, 5].

На рис. 1,а приведен график изменения функции $L(y)$ – опорной длины микропрофиля обработанной поверхности по глубине y . Заштрихованным показан неудаленный с обработанной поверхности металл, оставшийся в виде микронеровностей после предварительной лезвийной обработки. За начало отсчета ($y=0$) на графике принята самая глубокая впадина микронеровностей, оставшихся после предварительной обработки. Координата $y=R_{max0}$ соответствует максимальной высоте микронеровностей на обрабатываемой поверхности.

При абразивном полировании происходит удаление оставшихся после предварительной обработки микронеровностей. В результате координата $y=R_{max0}$ через определенное время обработки переместится в положение $y=R_{max1}$. Расчетами установлено, что при упрощенном представлении на рис. 1,а функции $L(y)=tg\alpha \cdot y$ (где $tg\alpha = B/R_{max0}$; B – базовая длина обработанной поверхности, м) в виде прямой линии положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности определяется из условия $a = 0,5 \cdot R_{max0}$. Соответственно, отношение параметров шероховатости обработанной поверхности $R_{max0}/R_a = 4$.

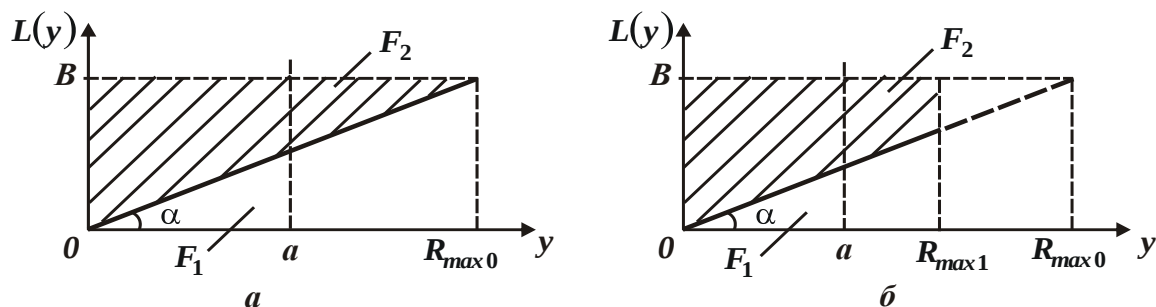


Рис. 1 – Характер изменения функции $L(y)$ по глубине микропрофиля y для исходной шероховатости поверхности (а) и после абразивной обработки (б)

При значении $y = R_{max1}$ (рис. 1,б) положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности изменится. Для его определения следует воспользоваться известным условием [4], согласно которому площади F_1 и F_2 , определяющие площади впадин и выступов на базовой длине B обработанной поверхности, равны между собой.

Исходя из рис. 1,б, имеем:

$$F_1 = \int_0^a L(y) \cdot dy = \int_0^a tg\alpha \cdot y \cdot dy = tg\alpha \cdot \frac{a^2}{2}; \quad (1)$$

$$F_2 = (R_{max1} - a) \cdot B - \int_a^{R_{max1}} L(y) \cdot dy = (R_{max1} - a) \cdot B - tg\alpha \cdot \left(\frac{R_{max1}^2}{2} - \frac{a^2}{2} \right). \quad (2)$$

Из условия $F_1 = F_2$ получено:

$$a = R_{max1} - \frac{R_{max1}^2}{2 \cdot R_{max0}}. \quad (3)$$

Тогда

$$F_1 = \frac{B \cdot R_{max1}^2}{2 \cdot R_{max0}} \cdot \left(1 - \frac{R_{max1}}{2 \cdot R_{max0}} \right)^2; \quad (4)$$

$$F_2 = \frac{B \cdot R_{max1}^2}{2 \cdot R_{max0}} \cdot \left(1 - \frac{R_{max1}}{2 \cdot R_{max0}} \right)^2. \quad (5)$$

Как видно, площади F_1 и F_2 равны между собой. Следовательно, расчеты выполнены правильно.

Таблица 1 – Расчетные значения параметра R_a при $R_{max0}=1$ мкм

R_{max1} , мкм	0	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,67	0,8	1,0
R_a , мкм	0	0,0001	0,0023	0,009	0,0324	0,065	0,102	0,176	0,2	0,23	0,25

Таблица 2 – Расчетные значения отношений R_a / R_{max1} и R_{max1} / R_a

R_{max1} / R_{max0}	0	0,005	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,67	0,8	1,0
R_a / R_{max1}	0	0,005	0,01	0,047	0,09	0,162	0,216	0,256	0,294	0,296	0,288	0,25
R_{max1} / R_a	∞	200	100	21,3	11,1	6,17	4,63	3,9	3,4	3,38	3,47	4,0

Из зависимости (7) вытекает зависимость для определения отношения параметров шероховатости поверхности R_a / R_{max1} :

$$\frac{R_a}{R_{max1}} = \frac{R_{max1}}{R_{max0}} \cdot \left(1 - \frac{R_{max1}}{2 \cdot R_{max0}} \right)^2. \quad (9)$$

В зависимости (9) отношение параметров R_{max1} / R_{max0} оказывает противоположное влияние на отношение параметров шероховатости поверхности R_a / R_{max1} . Для определения экстремального значения функции R_a / R_{max1} следует зависимость (9) подчинить необходимому условию

Параметр шероховатости поверхности R_a определяется из условия $R_a \cdot B = F_1 + F_2$ или

$$\frac{1}{2} \cdot R_a \cdot B = F_1. \quad (6)$$

С учетом зависимости (4) имеем:

$$R_a = \frac{R_{max1}^2}{R_{max0}} \cdot \left(1 - \frac{R_{max1}}{2 \cdot R_{max0}} \right)^2. \quad (7)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные на основе зависимости (7) значения параметра R_a . Как видно, с уменьшением параметра R_{max1} в пределах $R_{max0} \dots 0$ значения R_a непрерывно уменьшаются, вплоть до нуля. Это указывает на возможность существенного уменьшения параметра R_a в условиях абразивного полирования за счет уменьшения высоты микронеровностей исходной шероховатости. Данная закономерность, по сути, и определяет эффективность применения на практике абразивного полирования. В этих условиях расчет параметра R_a можно производить по упрощенной зависимости (7):

$$R_a = \frac{R_{max1}^2}{R_{max0}}. \quad (8)$$

Уменьшение параметра R_a с уменьшением параметра R_{max1} связано с уменьшением площадей F_1 и F_2 . В результате площадь $(a \cdot B - F_1)$ незначительно отличается от площади $a \cdot B$ (рис. 1,б) и параметр $R_a \rightarrow 0$ согласно зависимости (6).

экстремума: первая производная функции R_a / R_{max1} от отношения R_{max1} / R_{max0} равна нулю. Используя это условие, получено: $R_a / R_{max1} = 0,67$.

Расчетами установлено, что в точке экстремума вторая производная функции R_a / R_{max1} по величине R_{max1} / R_{max0} принимает отрицательное значение. Это указывает на то, что в точке экстремума функция принимает максимальное значение.

В табл. 2 приведены расчетные значения отношения R_a / R_{max1} , которые подтверждают правильность аналитического решения. В диапазоне

изменения $R_{max1}/R_{max0}=0,4...1,0$ отношение R_a/R_{max1} изменяется незначительно, а с уменьшением значений $R_{max1}/R_{max0}=0,1...0,01$ оно принимает весьма малые значения – $R_a/R_{max1}=0,1...0,01$. Соответственно, отношение $R_{max1}/R_a = 10...100$.

Как видно, в этом случае отношения R_{max1}/R_{max0} и R_a/R_{max1} фактически равны между собой. Этим объясняются экспериментальные данные, приведенные в работе [4], согласно которым при абразивном полировании отношение R_{max1}/R_a достигает значения 30 и более. В результате фактически полностью устраняется исходная шероховатость и на обработанной поверхности образуется шероховатость, сформированная непосредственно в процессе абразивного полирования.

При шлифовании отношение R_{max1}/R_a , как правило, не превышает значение 10. Исходя из табл. 2, это указывает на то, что процесс шлифования осуществляется при изменении отношения $R_{max1}/R_{max0} = 0,1...1$, тогда как процесс абразивного полирования осуществляется при изменении отношения $R_{max1}/R_{max0} = 0,01...0,1$, т. е. в весьма малом диапазоне.

Таким образом, на основе предложенного теоретического подхода удалось определить характер изменения отношения R_a/R_{max1} , которое дополняет анализ образования шероховатости поверхности при абразивной обработке с помощью параметра R_a .

Для более полного анализа закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке следует рассмотреть аналитическую зависимость для определения параметра R_a , приведенную в работе [6]:

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n}, \quad (10)$$

где γ – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна; $n = k \cdot B \cdot l$ – количество абразивных зерен, принимающих участие в процессе образования шероховатости поверхности; k – поверхностная концентрация абразивных зерен, шт./м²; l – длина контакта абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, м.

Окончательно зависимость (10) принимает вид:

$$R_a = \frac{0,367}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot l}. \quad (11)$$

Как следует из зависимости (11), уменьшить параметр R_a можно за счет увеличения двух параметров: k и l . Увеличение l при внутреннем шлифовании предполагает увеличение длины контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Для этого можно использовать схему внутреннего шлифования, устанавливая ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом

перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 2 [7]).



Рис. 2 – Схема обработки отверстия в цилиндре

Это позволяет в несколько раз увеличить длину контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью и изменить направление образования рисков от проработавших зерен. Они будут образовываться фактически вдоль обрабатываемой поверхности, что положительно отразится на работоспособности пневмо- и гидроцилиндров.

Увеличить поверхностную концентрацию абразивных зерен k на рабочей поверхности шлифовального круга можно за счет применения круга с мягкой основой, например, мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [7]. В этом случае под действием нагрузки абразивные зерна «утапают» в связку и в процессе резания участвует большее их количество, что способствует увеличению параметра k . Применение этого круга позволяет одновременно увеличить параметры k и l , что приводит к уменьшению параметра R_a до значения 0,04 мкм, чего невозможно достичь при внутреннем шлифовании обычными абразивными кругами.

Полученное небольшое значение параметра шероховатости поверхности R_a соответствует аналогичным значениям R_a , полученным при абразивном полировании. Однако при внутреннем шлифовании достигается более высокая производительность обработки, что позволяет совместить операции предварительного и окончательного внутреннего абразивного шлифования в одну операцию с обеспечением требуемых (высоких) показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей. Следовательно, основным фактором, влияющим на достижение высоких показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей при абразивной обработке необходимо рассматривать количество работающих зерен n . С их увеличением ($n = k \cdot B \cdot l$) за счет увеличения параметров k и l параметр шероховатости поверхности R_a уменьшается и может принимать весьма малые значения.

Для установления связи количества работающих зерен n со скоростью поперечной подачи шлифовального круга S_{non} необходимо представить $l = V \cdot \tau$, где V – скорость резания, м/с;

$\tau = R_{max1} / S_{non}$ – время перемещения шлифовального круга в радиальном направлении на величину R_{max1} , с.

Параметр шероховатости поверхности R_{max1} следует выразить через известное отношение R_{max1} / R_a , расчетные значения которого приведены в табл. 2:

$$R_{max1} = \left(\frac{R_{max1}}{R_a} \right) \cdot R_a. \quad (12)$$

Подставляя приведенные выше выражения в зависимость (11), получено:

$$R_a = \frac{0,367 \cdot S_{non}}{tg\gamma \cdot k \cdot V \cdot \left(\frac{R_{max1}}{R_a} \right) \cdot R_a},$$

откуда

$$R_a = \sqrt{\frac{0,367 \cdot S_{non}}{tg\gamma \cdot k \cdot V \cdot \left(\frac{R_{max1}}{R_a} \right)}}. \quad (13)$$

Значение отношения R_{max1} / R_a необходимо применять таким, чтобы установленное по зависимости (13) значение R_a соответствовало ему согласно табл. 2. В этом случае расчет параметра R_a будет выполнен правильно.

Исходя из зависимости (13), параметр R_a в меньшей степени изменяется с изменением параметров процесса шлифования, чем в зависимости (11).

Уменьшить параметр R_a можно увеличением параметров k , V и отношения R_{max1} / R_a , которое согласно табл. 2 тем больше, чем меньше параметр шероховатости поверхности R_{max1} . Из этого вытекает, что, осуществляя процесс полирования, для которого отношение R_{max1} / R_a принимает относительно большие значения, можно добиться существенного уменьшения параметра R_a . Кроме того, уменьшению параметра R_a при абразивном полировании способствует также уменьшение скорости поперечной подачи S_{non} . При обычном абразивном шлифовании S_{non} больше, чем при абразивном полировании, а отношение R_{max1} / R_a , входящее в зависимость (13), наоборот, меньше. Это предопределяет более высокие значения параметра R_a при абразивном шлифовании. Поэтому в этих условиях эффективно применение указанного выше круга с мягкой основой, например, мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [7]. Для него отношение R_{max1} / R_a будет больше, а, соответственно, будет меньше параметр R_a даже при увеличенных значениях S_{non} , т.е. при увеличенной производительности обработки.

Выводы. В работе теоретически обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке с учетом величины удаленной части микронеровностей, оставшихся на обрабатываемой поверхности после предварительной лезвийной обработки. Установлено, что параметр шероховатости поверхности R_a при этом непрерывно уменьшается, а отношение R_{max1} / R_a , наоборот, увеличивается, достигая значений 30 и более в условиях абразивного полирования. Полученные расчетные значения согласуются с экспериментальными данными. Показано, что при внутреннем шлифовании параметр шероховатости поверхности R_a значительно больше, чем при абразивном полировании. Для его уменьшения предложено внутреннее шлифование осуществлять кругом с мягкой основой, например, мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П, обеспечивающим увеличение количества работающих зерен и уменьшение шероховатости поверхности.

Список литературы:

1. Novoselov, Yu.K.: Dynamics of surface shaping in abrasive processing (LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland, P.317 (2017).
2. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. А. Королев. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 212 с.
3. Федосеев О. Б. Шлифование синтетическими сверхтвердыми материалами / О. Б. Федосеев // Изв-я высш. учебн. заведений / Машиностроение. – 1977. – № 5. – С. 104–106.
4. Новіков Ф. В. Основи обробки металевих виробів з оптичними властивостями: монографія / Ф. В. Новіков, В. Г. Шкурупій. – Харків: Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 388 с. Новіков Ф. В. Оптимальные решения в технологии машиностроения : монография / Ф. В. Новіков, В. А. Жовтобрюх, В. Г. Шкурупій. – Д. : ЛІРА, 2018. – 424 с.
5. Сергеев А. С. Повышение качества обработки при шлифовании путем уменьшения шероховатости поверхности / А. С. Сергеев, С. А. Дитиненко, Ф. В. Новіков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – № 12(1337), 2019. – С. 70–75.
6. Сергеев А. С. Высокоэффективная технология внутреннего шлифования отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском, 20–22 листопада 2019 р., Харків. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – С. 144–145.

References (transliterated)

1. Novoselov, Yu. K.: Dynamics of surface shaping in abrasive processing (LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland, 317 (2017)
2. Korolev A.V. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke

[Investigation of the processes of formation of tool surfaces and parts during abrasive processing]. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta. 212. (1975).

3. Fedoseyev O. B. *Shlifovaniye sinteticheskimi sverkh-tverdymi materialami* [Grinding with synthetic super-hard materials] // *Izv-ya vyssh. uchebn. zavedeniy / Mashinostroyeniye*, 5. 104–106 (1977).

4. Novikov F. V., Shkurupiy V. H. *Osnovy obrobky metalevykh vyrobiv z optychnymy vlastyivostyamy* [Fundamentals of processing of metal products with optical properties]: monohrafiya. – Kharkiv: Vyd. Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics. 388 (2015)

5. Novikov F. V., Zhovtobryukh V. A., Shkurupiy V. G. *Optimal'nyye resheniya v tekhnologii mashinostroyeniya* [Optimal solutions in engineering technology]: monografiya. – Dnepr: LIRA. 424 (2018).

6. Sergeyev A. S., Ditinenko S. A., Novikov F. V. *Povysheniye kachestva obrabotki pri shlifovanii putem umen'sheniya sherokhovatosti poverkhnosti* [Improving the quality of processing during grinding by reducing surface roughness] // *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: *Innovatsiyni tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies

and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy]: zbirnyk naukovykh prats' / National Technical University "KhPI". – Kharkiv: NTU "KhPI". 12(1337). 70–75 (2019).

7. Sergeyev A. S. *Vysokoeffektivnaya tekhnologiya vnutrennego shlifovaniya otverstiy v pnevmo- i gidrotsilindrakh* [Highly efficient internal grinding of holes in pneumatic and hydraulic cylinders] // *Resursozberezhennya ta enerhoefektyvnist' protsesiv i obladnannya obrobky tyskom u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Resource saving and energy efficiency of processes and equipment of pressure treatment in mechanical engineering and metallurgy]: materialy XI Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi, prysvyachenoyi 90-richchyu zasnuvannya kafedry obrobky metaliv tyskom. – Kharkiv: NTU «KHPI». 144-145 (2019).

Поступила (received) 14.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сергеев Александр Сергійович (Сергеев Александр Сергеевич, Serhieiev Alexander) – аспірант кафедри «Технологія машинобудування», ДВНЗ «ПДТУ», м. Маріуполь; тел.: +38-068-78-08-555; e-mail: andilayahayaa@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8974-9872>

МИРОНЕНКО Е.В., КОВАЛЕВ В.Д., ВАСИЛЬЧЕНКО Я.В., ШАПОВАЛОВ М.В.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

В статье рассмотрены научные основы создания систем блочно-модульного инструмента для тяжелых станков, которые включают принципы создания систем блочно-модульного инструмента на основе квалиметрической оценки состояний процесса механической обработки, возможных отказов технологической системы, свойств и критериев их оптимизации, определение весовых критериев, основы конструирования элементов блочно-модульного инструмента с учетом оценки напряженно-деформированного состояния и жесткости основных узлов, создание математической модели процесса дробления стружки их режущими элементами и вероятностной оценки стабильности дробления стружки; методологию моделирования сложных конструкций модульного инструмента с применением расчетно-аналитических методов конечных элементов, статических и динамических методов исследования системы механической обработки. Проведены исследования оптимизационных расчетов и предложена система блочно-модульного инструмента с механическим креплением пластин для чернового и полуконического точения; разработаны рекомендации по эксплуатации блочно-модульного инструмента для тяжелых станков с пластинчатыми суппортами, позволяющие осуществить выбор рациональных режимов резания с обеспечением заданной стойкости инструмента. Определены показатели надежности модульного инструмента, нормы расхода основных элементов.

Ключевые слова: процесса механической обработки, технологическая система, блочно-модульный инструмент, тяжелые станки, эксплуатация, выбор рациональных режимов резания, стойкость инструмента, надежность, нормы расхода

МИРОНЕНКО Є.В., КОВАЛЬОВ В.Д., ВАСИЛЬЧЕНКО Я.В., ШАПОВАЛОВ М.В.

ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ БЛОЧНО-МОДУЛЬНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

У статті розглянуті наукові основи створення систем блочно-модульного інструмента для важких верстатів, які включають принципи створення систем блочно-модульного інструмента на основі квалиметричної оцінки станів процесу механічної обробки, можливих відмов технологічної системи, властивостей і критеріїв їх оптимізації, визначення вагомості критеріїв, основи конструювання елементів блочно-модульного інструмента з урахуванням оцінки напружено-деформованого стану і жорсткості основних вузлів, створення математичної моделі процесу дроблення стружки їх ріжучими елементами і ймовірнісної оцінки стабільності дроблення стружки; методологію моделювання складних конструкцій модульного інструмента із застосуванням розрахунково-аналітичних методів кінцевих елементів, статичних і динамічних методів дослідження системи механічної обробки. Проведено дослідження оптимізаційних розрахунків і запропонована система блочно-модульного інструмента з механічним кріпленням пластин для чернового і напівконічного точіння; розроблені рекомендації по експлуатації блочно-модульного інструмента для важких верстатів з пластинчастими суппортами, що дозволяють здійснити вибір раціональних режимів різання з забезпеченням заданої стійкості інструменту. Визначено показники надійності модульного інструмента, добові норми витрат основних елементів.

Ключові слова: процес виготовлення, технологічна система, блочно-модульний інструмент, важкі верстати, експлуатація, вибір раціональних режимів різання, стійкість інструменту, надійність, добові норми витрат

MIRONENKO E.V., KOVALEV V.D., VASILCHENKO Y.V., SHAPOVALOV M.V.

TECHNOLOGICAL SYSTEM OF MECHANICAL PROCESSING OF BLOCK-MODULAR TOOL

The article discusses the scientific foundations of creating block-modular tool systems for heavy machines, which will include the principles of creating block-modular tool systems based on a qualimetric assessment of the machining process conditions, possible failures of the technological system, properties and criteria for their optimization, determination of weighting criteria, design fundamentals elements of a block-modular tool, taking into account the assessment of the stress-strain state and stiffness of the main nodes, the creation of a mathematical model of the process of crushing chips by their cutting elements and a probabilistic assessment of the stability of crushing chips; a methodology for modeling complex constructions of a modular tool using calculation and analytical methods of finite elements, static and dynamic methods for studying a machining system. Studies of optimization calculations are carried out and a system of block-modular tools with mechanical fastening of plates for roughing and semi-turning is proposed; recommendations on the operation of a block-modular tool for heavy machine tools with plate calipers have been developed, allowing the selection of rational cutting conditions to ensure the specified tool life. The reliability indicators of a modular tool, the consumption rates of the main elements are determined.

Keywords: machining process, technological system, block-modular tool, heavy machine tools, operation, selection of rational cutting conditions, tool life, reliability, flow rates

1. Введение. Эффективность процесса механической обработки деталей на тяжелых станках в большей степени определяется надежностью и универсальностью режущего инструмента, зависящего от множества случайных факторов. До 70 % операций, выполняемых на тяжелых токарных станках, связаны с снятием больших сечений среза.

Это объясняется тем, что в тяжелом машиностроении наиболее широко используются заготовки, полученные методом литья,ковки,штамповки, которые характеризуются наличием больших припусков, пор, раковин, трещин, неметаллических включений и других дефектов поверхностного слоя.

Поэтому на этапе получения заготовок возникает необходимость применения черновой лезвийной обработки с целью удаления дефектного поверхностного слоя. Трудоёмкость обработки резанием таких заготовок очень велика. Например, для обработки заготовки длиной (4000 ÷ 5000) мм и диаметром 1500 мм потребуется 3 рабочих смены (около 22 часов).

После удаления дефектного слоя с поковки, деталь подвергается термообработке, а дальнейшая лезвийная обработка производится на тяжелых токарных станках. При этом удаляется припуск до 30 мм, с целью лучшего приближения формы заготовки к профилю детали.

В результате перед окончательными (чистовыми) операциями вес детали составляет $(60 \div 70) \%$ от веса первоначальной заготовки. Анализ применяемых глубин резания [1, 2, 3, 4] при обработке на тяжёлых токарных станках показывает значительное рассеивание и зависимость их от размера станка. Возрастающая сложность механической обработки, её автоматизация, включая автоматизацию проектирования и жесткие требования рыночной

экономики, обуславливают необходимость системного подхода.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Под системой понимают сочетание элементов, связанных между собой, внешней средой и обусловленную совокупностью целей. На формально-математическом языке система может быть представлена как пространство [2, 5, 6, 7]. Так, для системы механической обработки (СМО) можно записать

$$\text{СМО} = \{Y, Ц, Ф, P, R(Y, Ц), R(Y, P), R(Y, Ф), R(Ц, P), R(Ф, P)\}, \quad (1)$$

где, Y – условия, среда эксплуатации инструмента; $Ц$ – цели проектирования, критерии; $Ф$ – физическая часть системы; P – режимы эксплуатации системы; R – отношения между названными элементами системы.

Рассматриваемая СМО является элементом более общей производственной системы. С другой стороны, каждый элемент СМО также может быть представлен как система. Так, физическая часть СМО является технологической системой (ТС), современный инструмент, входящий в ТС, в свою очередь является достаточно сложной системой модулей и т. д.

Подобную многоуровневую систему, в которой каждый нижележащий элемент подчинен вышележащему, называют иерархической и изображают в виде графа, который может быть деревом. Дерево – это граф, который не имеет циклов, это в частности означает, что элементы одного уровня не соединены ребрами – они независимы. Мы будем изображать, если пользоваться аналогией с живым деревом, всегда перевернутые "деревья". Иерархический граф показан на рис. 1, причем для пояснения раскрыт состав только одного элемента каждого уровня.

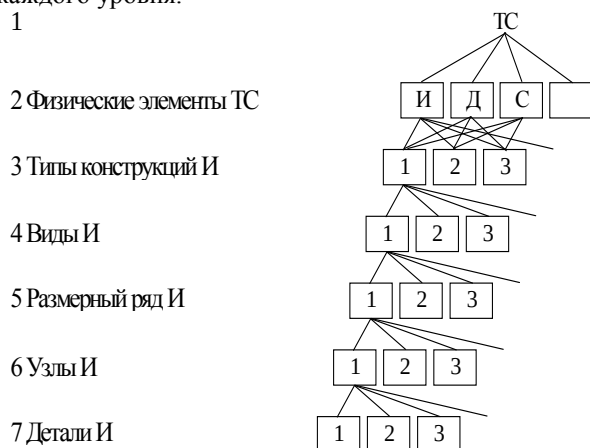


Рис. 1 – Технологическая система в виде иерархического графа (Д – деталь; И – инструмент; С – станок)

В качестве примера на рис. 2 показана модульная система инструментов для автоматизированных средних токарных станков фирмы Сандвик Коромант. Здесь на 1-ом уровне рассмотрения – корпус с узлом крепления модуля, на 2-ом – модули для обработки наружных и внутренних поверхностей, на 3-ем –

виды модулей и на 4-ом – их размерные ряды [8, 9, 10, 11].

Система инструментов обязательно должна иметь физический системо-объединяющий узел (Рис. 2 – узел крепления модулей различных видов).

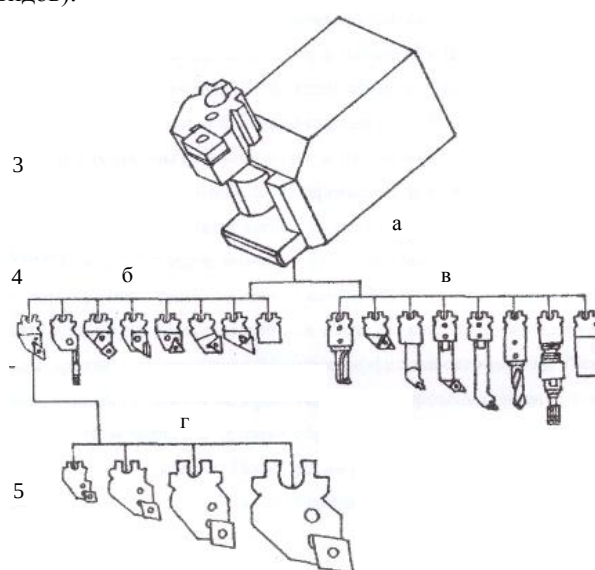


Рис. 2 – Модульная система инструментов для токарных станков фирмы «Сандвик Коромант» (Швеция): а) – корпус с узлом крепления модулей; б) – виды модулей для наружного точения; в) – виды модулей для обработки отверстий; г) – размерный ряд одного вида

Четыре элемента, образующих СМО, имеют различный характер. Например, ТС – это материальная система машинных объектов – детали, станки и инструменты, $Ц$ – информационная система.

Связи между элементами системы также могут иметь различный характер: быть физическими или информационными.

Как правило, более полное рассмотрение системы, то есть начало анализа с более высоких уровней или охват большего числа элементов на данном уровне обеспечивает большую эффективность работы. Так, например, многие ошибки и недоработки в проектировании связаны с недостаточно полным анализом условий обработки. Нельзя рассматривать инструмент в отрыве от станка. Так, конструирование инструмента совместно с резцедержателем станков токарной группы привело к созданию новых высокоэффективных систем блочно-

модульного инструмента (они рассмотрены далее). Если одновременно с оптимизацией параметров инструмента оптимизировать режимы резания и число рабочих, обслуживающих уникальный станок, это дает более точные и эффективные результаты.

3. Цель исследования. Необходимо создать систему инструментов для определенной совокупности операций и станков. В этом случае под системой инструмента понимают совокупность типоразмерных рядов резцов для указанного оборудования.

4. Изложение основного материала. Инструмент, собираемый из унифицированных узлов и модулей, переналаживают применительно к изменению формы обрабатываемых деталей простой компоновкой унифицированных взаимозаменяемых узлов. В этом случае традиционный инструмент заменяется комплектами, состоящими из унифицированных агрегатов и узлов, с их частичной или полной разборкой для последующей сборки в другом сочетании. Такая конструкция позволяет создавать не просто инструмент определенного типа, а систему инструмента с необходимыми сменными устройствами.

Создание систем блочно-модульного инструмента является эффективным средством удовлетворения требований потребителей к комплексному оснащению тяжелых токарных станков с ЧПУ, позволившим уменьшить число индивидуальных заказов на инструмент.

Модулем называют повторяющийся унифицированный узел, который выполняет самостоятельную функцию в различных инструментальных системах.

Блочно-модульный принцип компоновки инструмента с относительно ограниченным комплектом модулей позволяет создать без серьезных дополнительных затрат широкую номенклатуру систем инструмента, наиболее приспособленных к конкретным требованиям производства.

Исходя из особенностей блочно-модульного принципа компоновки инструмента можно выделить основные положения проектирования и реализации систем инструмента:

- модуль – это конструктивно и функционально завершенная единица, являющаяся составной частью общей системы инструмента;
- модули характеризуются наименьшим возможным числом связей для присоединения к ним других новых моделей;
- ограниченная номенклатура модулей должна обеспечивать большое количество разных сочетаний путем разнообразных компоновок и положений модулей;
- блочно-модульный принцип проектирования систем инструмента наиболее полно отвечает требованиям решения конкретной технологической задачи (создание на модульном принципе систем инструмента не имеет излишних функций, и поэтому оно должно быть экономичнее обычных инструментов с универсальными возможностями);

- сокращение времени и трудоемкости проектирования систем инструмента, поскольку модульный принцип позволяет более полно использовать выполненные ранее разработки;

- увеличить надежность работы инструмента за счет применения модулей, наиболее предназначенных для выполнения конкретных операций;

- уменьшение разнообразия конструктивных вариантов модулей и составных их элементов улучшают условия эксплуатации и ремонтпригодности системы инструмента;

- блочно-модульное проектирование позволяет создавать новые высокопроизводительные конструкции инструмента для конкретных операций механической обработки, а не подгонять процесс под имеющийся инструмент;

- блочно-модульный принцип дает реальную возможность заменить устаревшие формы и методы создания новых конструкций инструмента и их систем;

- блочно-модульный принцип построения компоновки инструмента наиболее эффективен для тяжелых токарных станков, где в основном применяются инструменты, имеющие большие габариты $H \times B \times L = 80 \times 80 \times 1000$ мм и массу более 15 кг, что делает трудоемким смену и переналадку на новую операцию.

Одной из важных особенностей обработки заготовок на тяжелых токарных станках является широкий диапазон глубин резания. При первом проходе глубина резания может достигать 40 мм, однако во многих случаях она составляет 10 – 20 мм. Вместе с тем почти во всех случаях черновая обработка производится одним и тем же резцом с высотой державки $H = 80, 63$ мм и припаянной твердосплавной пластиной длиной $l = 50$ мм. Поэтому чаще всего используется $1/3$ длины пластины.

На графике (рис. 3) плотности распределения относительной длины режущей кромки (l_r/l) построенном по статистическим данным, собранными на заводах тяжелого машиностроения, с участием авторов. Абразивные и ударные воздействия на режущий инструмент вследствие наличия высокотвердых частиц и неравномерности припуска приводит к ускоренному абразивно-механическому изнашиванию, а также к хрупкому разрушению твердосплавной пластины [12, 13, 14].

Анализ влияния глубин на распределение нормальных напряжений при постоянной длине режущей кромки $l = 50$ мм [55] показал, что при глубине 10 – 20 мм экстремум растягивающих напряжений приходится на середину режущей пластины. Это приводит к возникновению микротрещин, которые переходят в макротрещины и приводят к разрушению твердосплавной режущей пластины.

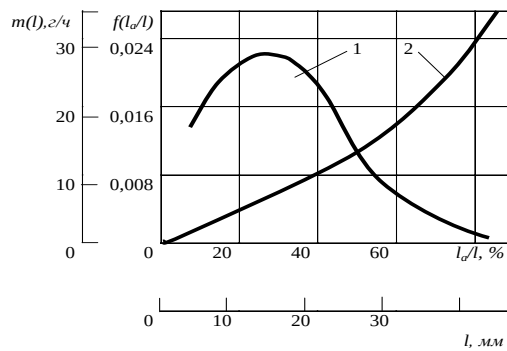


Рис. 3 – Плотность распределения относительной длины $f(l_a/l)$ режущей кромки (1) и зависимость удельного расхода m твердого сплава от длины l пластины (2); l_a – длина активной части режущей кромки; l – длина режущей кромки

При снятии больших сечений среза при нагружении $1/3$ длины режущего лезвия свободный конец витка стружки упирается в заднюю поверхность режущего лезвия резца, разрушая ее ненагруженную часть, что приводит к уменьшению числа переточек и увеличению расхода твердого сплава.

Это хорошо видно из графика зависимости расхода твердого сплава от длины режущей кромки твердосплавной пластины (рис. 3, кривая 2). С учетом анализа особенностей обработки на тяжелых станках целесообразно работать при использовании $3/4$ длины режущей кромки пластины.

Следовательно, можно сделать общий вывод: на тяжелых токарных станках необходимо иметь широкую номенклатуру твердосплавных пластин, а конструкция инструмента должна быть модульной для быстрой смены инструмента в зависимости от величины снимаемого припуска.

Для обеспечения наибольшей эффективности работы системы блочно-модульного инструмента и разработки регламентов его эксплуатации необходимо учитывать не только процесс резания, но и вспомогательное время.

Поэтому анализ условий необходимо начинать с анализа структуры времени обработки деталей на тяжелых токарных станках.

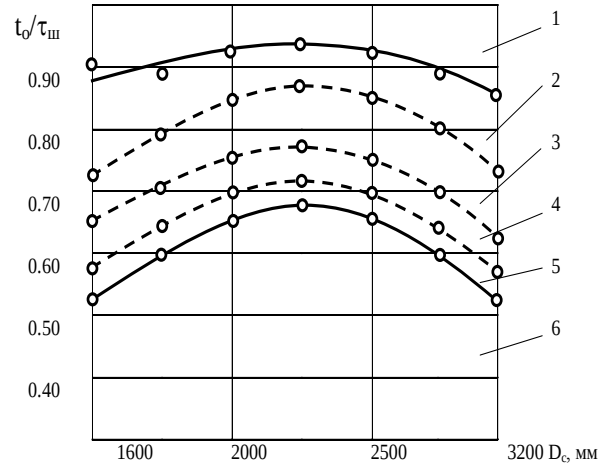
В результате анализа статистических данных, учета работы оборудования было получено отношение среднего основного времени T_0 к штучному $T_{шт}$ для тяжелых токарных станков равно $0,6 \div 0,8$.

Процесс обработки в значительной мере требует времени, прямо не связанного с резанием, т.е. вспомогательного времени.

Анализ статистических данных по эксплуатации тяжелых токарных станков разных типоразмеров [3, 8, 15] показал, что в структуре времени обработки деталей на этих станках кроме основного времени имеет место – время замены детали, замена инструмента в результате отказа, замена инструмента в результате появления неудовлетворительной

стружки, контроль детали и управление станком (рис.4).

Процесс резания чередуется с операциями обслуживания технологической системы, т.е. процесс перехода системы из состояния резания в состояние восстановления. Этот процесс можно представить в виде графа состояний технологической системы (рис. 5).



ис. 4 – Структура времени в зависимости от размера станка (500 данных), 1 – замена детали; 2 – подналадка инструмента; 3 – замена инструмента в результате отказа; 4 – замена инструмента, в результате появления неудовлетворительной стружки; 5 – контроль размеров детали; 6 – резание

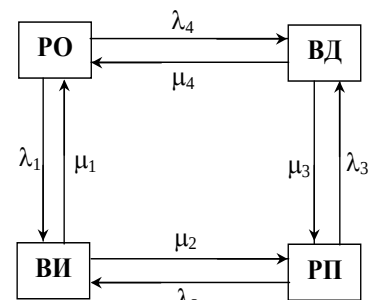


Рис. 5 – Граф переходов между состояниями (РО – резание до отказа инструмента; РП – резание до конца перехода; ВИ – восстановление в связи со сменой инструмента; ВД – восстановление в связи со сменой детали)

Интенсивности перехода из состояния резания в состояние восстановления и обратно равны:

$$\lambda_1 = \frac{1}{T}, \quad \lambda_2 = \frac{1}{T_{пер}}, \quad \mu_1 = \frac{1}{T_B}, \quad \mu_2 = \frac{1}{T_{ВП}}, \quad (2)$$

где, T – стойкость инструмента до возникновения отказа; $T_{пер}$ – стойкость инструмента до окончания перехода; $T_{ВП}$ – время восстановления технологической системы в связи с настройкой на новый переход; T_B – время восстановления в связи с отказом инструмента.

Анализируя статистические данные о состоянии технологической системы, можно определить

вероятность нахождения ТС в соответствующем

$$\begin{cases} P_P \lambda_1 + P_P \lambda_2 = P_B \mu_1 + P_{ВП} \mu_2; \\ P_P \lambda_1 = P_B \mu_1; \\ P_P \lambda_2 = P_{ВП} \mu_2, \end{cases} \quad (3)$$

где, P_P – вероятность процесса резания; P_B – вероятность восстановления в связи с отказом инструмента; $P_{ВП}$ – вероятность восстановления в связи с настройкой на новый переход.

Для любого момента времени состояние технологической системы можно представить как: $P_P + P_B + P_{ВП} = 1$. Тогда вероятность резания будет равна:

$$P_P = \frac{1}{1 + \frac{T_B}{T} + \frac{T_{ВП}}{T_{ПЕР}}} \quad (4)$$

Процесс перехода из состояния в состояние показан в виде графа и описан уравнениями (3).

Выводы. Блочно-модульный принцип построения компоновки инструмента наиболее эффективен для тяжелых токарных станков, где в основном применяются инструменты, имеющие большие габариты $H \times B \times L = 80 \times 80 \times 1000$ мм и массу более 15 кг, что делает трудоемким смену и переналадку инструмента на новую операцию. Блочно-модульный принцип компоновки, с относительно ограниченным комплектом модулей, позволяет создавать без серьезных дополнительных затрат широкую номенклатуру систем инструмента, наиболее приспособленных к конкретным требованиям производства. Показано, что на тяжелых станках при черновом и получистовом точении, на экономически целесообразных режимах резания, доля поломок по сечению пластины колеблется от 20% до 40% от всех видов отказов. Анализ структуры отказов позволяет наметить конструктивные и технологические мероприятия по повышению прочности и надежности инструмента.

Список литературы:

1. Грабченко А.И. *Системные принципы создания агрегатно-модульного инструмента и оптимизации рабочего процесса* [Текст] / А.И. Грабченко, Е.В. Мироненко // Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. научн. – техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2003. – Вып. 64. – С. 47 – 52.: ил.
2. Драчев О.И. *Автоматическое управление процессом точения маложестких деталей* [Текст] / О.И. Драчев, А.Н. Кравцов; ВолгГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 250 с.: ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева).
3. Драчев О.И. *Обеспечение эксплуатационных свойств изделий при автоматизированном проектировании* [Текст] / О.И. Драчев, А.Н. Кравцов, Н.В. Кравцов; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) – Ирбит: ОНИКС, 2011 – 257 с.: ил., табл.; (Серия: «Автоматизированное проектирование и автоматизация производственных процессов» / Под ред. Ю.М. Соломенцева)
4. Кравцов А.Н. *Моделирование технологического обеспечения производственно-технических характеристик блочно-модульных инструментов на основе системной оптимизации* [Текст] / А.Н. Кравцов, Н.В. Кравцов // Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств: сборник научных трудов. – Волгоград: ВолгГТУ,

состоянии и представить в виде системы уравнений:

- Тольятти: Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2013. – 208 с.: ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева) (С. 122 – 141).
5. Кравцов А.Н. *Обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей с применением функционально-стоимостного анализа при многокритериальной регламентации параметров их поверхностного слоя* [Текст] / А.Н. Кравцов // Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств: сборник научных трудов. – Волгоград: ВолгГТУ, Тольятти: Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2013. – 208 с.: ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева) (С. 189 – 201).
 6. Кравцов А.Н. *Обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей с применением функционально-стоимостного анализа при многокритериальной регламентации параметров их поверхностного слоя* [Текст] / А.Н. Кравцов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сборник научных трудов. – Краматорск, вып. №31, 2012. – 276 с.
 7. Кравцов А.Н. *Эксплуатационные свойства поверхностей деталей блочно-модульных токарных резцов и их обеспечение* [Текст] / А.Н. Кравцов // Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт»: Машиностроение. № 66, 2012 (с. 56 – 62).
 8. Кравцов Н.В. *Комплексные параметры состояния поверхностей деталей блочно-модульных токарных резцов* [Текст] / Н.В. Кравцов, А.Н. Кравцов // Журнал «Омский научный вестник». Серия: Приборы, машины и технологии. № 3 (113). – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012 (с. 162 – 166).
 9. Кравцов А.Н. *Геометрическое моделирование взаимосвязи эксплуатационных свойств поверхностей деталей блочно-модульных токарных резцов с их показателями качества при помощи теории графов* [Текст] / А.Н. Кравцов // Журнал "Вектор науки ТГУ". № 3 (21), 2012 (с. 89 – 93).
 10. Кравцов А.Н. *Обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей блочно-модульных токарных резцов* [Текст] / А.Н. Кравцов // Журнал "Вектор науки ТГУ". № 2 (20), 2012 (с. 33 – 37).
 11. Кравцов А.Н. *Моделирование технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин* [Текст] / А.Н. Кравцов, Н.В. Кравцов; науч. ред. О.И. Драчев; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) – Изд. 2-е, испр., перераб. и доп. – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 293 с.: ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю.М. Соломенцев)
 12. Кравцов А.Н. *Обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей при изготовлении* [Текст] / А.Н. Кравцов, Н.В. Кравцов; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) – Ирбит: ОНИКС, 2011. – 267 с.
 13. Крамарь В.А. *Вопросы прикладной математики в проектировании и автоматизации производственных процессов: Учебн. Пособие* [Текст] / В.А. Крамарь, О.И. Драчев, А.Н. Кравцов; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур). – Ирбит: ОНИКС, 2011. – 176 с.
 14. Митрофанов В.Г. *Моделирование и управление движениями формообразования при механической обработке* [Текст] / Митрофанов В.Г. [и др.]; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур); – Ирбит: ОНИКС, 2011 – 239 с. (Сер.: «Автоматизированное проектирование и автоматизация производственных процессов» / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева)
 15. Тисенко В.Н. *Инструментальные средства менеджмента* [Текст] / В.Н. Тисенко [и др.]; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур); – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 217 с.

References (transliterated)

- Grabchenko A.I. *Sistemny'e principy' sozdaniya agregatno-modul'nogo instrumenta i optimizacii rabocheho protsessa* [Tekst] / A.I. Grabchenko, E.V. Mironenko // Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh. – Mezhd. nauchn. – tekhn. sbornik. – Khar'kov: NTU «KhPI». 2003. – Vy'p. 64. – S. 47 – 52.: il.
- Drachev O.I. *Avtomaticheskoe upravlenie protsessom tocheniya malozhestkikh detalej* [Tekst] / O.I. Drachev, A.N. Kravczov; VolgGTU – Tol'yatti: ZAO «ONIKS», 2012 – 250 s.: il., tabl.; – (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii / Pod obshh. red. Yu.M. Solomenczeva).
- Drachev O.I. *Obespechenie e'kspluatatsionny'kh svoystv izdelij pri avtomatizirovannom proektirovanii* [Tekst] / O.I. Drachev, A.N. Kravczov, N.V. Kravczov; Zakry'toe akcionernoe ob-vo "ONIKS" (Ob-nie nauch., inzhenerny'kh i kommercheskikh struktur) – Irbit: ONIKS, 2011 – 257 s.: il., tabl.; (Seriya: «Avtomatizirovannoe proektirovanie i avtomatizaciya proizvodstvenny'kh protsessov» / Pod red. Yu.M. Solomenczeva)
- Kravczov A.N. *Modelirovanie tekhnologicheskogo obespecheniya proizvodstvenno-tekhnicheskikh kharakteristik blochno-modul'ny'kh instrumentov na osnove sistemnoy optimizacii* [Tekst] / A.N. Kravczov, N.V. Kravczov // Problemy' proektirovaniya i avtomatizacii mashinostroitel'ny'kh proizvodstv: sbornik nauchny'kh trudov. – Volgograd: VolgGTU, Tol'yatti: Irbit: ZAO «ONIKS», 2013. – 208 s.: il., tabl.; – (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii / Pod obshh. red. Yu.M. Solomenczeva) (S. 122 – 141).
- Kravczov A.N. *Obespechenie e'kspluatatsionny'kh svoystv poverkhnostej detalej s primeneniem funktsional'no-stoimostnogo analiza pri mnogokriterial'noj reglamentacii parametrov ikh poverkhnostnogo sloya* [Tekst] / A.N. Kravczov // Problemy' proektirovaniya i avtomatizacii mashinostroitel'ny'kh proizvodstv: sbornik nauchny'kh trudov. – Volgograd: VolgGTU, Tol'yatti: Irbit: ZAO «ONIKS», 2013. – 208 s.: il., tabl.; – (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii / Pod obshh. red. Yu.M. Solomenczeva) (S. 189 – 201).
- Kravczov A.N. *Obespechenie e'kspluatatsionny'kh svoystv poverkhnostej detalej s primeneniem funktsional'no-stoimostnogo analiza pri mnogokriterial'noj reglamentacii parametrov ikh poverkhnostnogo sloya* [Tekst] / A.N. Kravczov // Nadezhnost' instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem. Sbornik nauchny'kh trudov. – Kramatorsk, vy'p. #31, 2012. – 276 s.
- Kravczov A.N. *E'kspluatatsionny'e svoystva poverkhnostej detalej blochno-modul'ny'kh tokarny'kh rezcov i ikh obespechenie* [Tekst] / A.N. Kravczov // Vestnik NTUU «Kievskij politekhnicheskij institut»: Mashinostroenie. # 66, 2012 (s. 56 – 62).
- Kravczov N.V. *Kompleksny'e parametry' sostoyaniya poverkhnostej detalej blochno-modul'ny'kh tokarny'kh rezcov* [Tekst] / N.V. Kravczov, A.N. Kravczov // Zhurnal «Omskij nauchny'j vestnik». Seriya: Pribory, mashiny i tekhnologii. # 3 (113). – Omsk: Izd-vo OmGTU, 2012 (s. 162 – 166).
- Kravczov A.N. *Geometricheskoe modelirovanie vzaimosvyazi e'kspluatatsionny'kh svoystv poverkhnostej detalej blochno-modul'ny'kh tokarny'kh rezcov s ikh pokazatelyami kachestva pri pomoshhi teorii grafov* [Tekst] / A.N. Kravczov // Zhurnal "Vektor nauki TGU". # 3 (21), 2012 (s. 89 – 93).
- Kravczov A.N. *Obespechenie e'kspluatatsionny'kh svoystv poverkhnostej detalej blochno-modul'ny'kh tokarny'kh rezcov* [Tekst] / A.N. Kravczov // Zhurnal "Vektor nauki TGU". # 2 (20), 2012 (s. 33 – 37).
- Kravczov A.N. *Modelirovanie tekhnologicheskogo obespecheniya e'kspluatatsionny'kh svoystv poverkhnostej detalej mashin* [Tekst] / A.N. Kravczov, N.V. Kravczov; nauch. red. O.I. Drachev; Zakry'toe akcionernoe ob-vo "ONIKS" (Ob-nie nauch., inzhenerny'kh i kommercheskikh struktur) – Izd. 2-e, ispr., pererab. i dop. – Tol'yatti: ZAO "ONIKS", 2012 – 293 s.: il., tabl.; – (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii / obshh. red. Yu.M. Solomenczev)
- Kravczov A.N. *Obespechenie e'kspluatatsionny'kh svoystv poverkhnostej detalej pri izgotovlenii* [Tekst] / A.N. Kravczov, N.V. Kravczov; Zakry'toe akcionernoe ob-vo "ONIKS" (Ob-nie nauch., inzhenerny'kh i kommercheskikh struktur) – Irbit: ONIKS, 2011. – 267 s.
- Kramar' V.A. *Voprosy' prikladnoy matematiki v proektirovanii i avtomatizacii proizvodstvenny'kh protsessov: Uchebn. Posobie* [Tekst] / V.A. Kramar', O.I. Drachyov, A.N. Kravczov; Zakry'toe akcionernoe ob-vo "ONIKS" (Ob-nie nauch., inzhenerny'kh i kommercheskikh struktur). – Irbit: Oniks, 2011. – 176 s.
- Irbit: ONIKS, 2011 – 239 s. (Ser.: «Avtomatizirovannoe proektirovanie i avtomatizaciya proizvodstvenny'kh protsessov» / Pod obshh. red. Yu.M. Solomenczeva)
- Tisenko V.N. *Instrumental'ny'e sredstva menedzhmenta* [Tekst] / V.N. Tisenko [i dr.]; Zakry'toe akcionernoe ob-vo "ONIKS" (Ob-nie nauch., inzhenerny'kh i kommercheskikh struktur); – Tol'yatti: ZAO «ONIKS», 2012 – 217 s.

Поступила (received) 05.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мироненко Євген Васильович (Мироненко Евгений Васильевич, Mironenko Evgeny Vasilyevich) – декан, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050)-604-4967; e-mail: evgeny.mironenko@dgma.donetsk.ua;

Ковалев Віктор Дмитрієвич (Ковалев Виктор Дмитриевич, Kovalev Victor Dmitrievich) – ректор, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (095)-398-9725; e-mail: kovalov.viktor@gmail.com;

Васильченко Яна Василівна (Васильченко Яна Васильевна, Vasilchenko Yana Vasilievna) – завід. кафедри, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050)-814-7730; e-mail: wasilchenko.ua@gmail.com,;

Шаповалов Максим Валерійович (Шаповалов Максим Валерьевич, Shapovalov Maxim Valerevich) – кандидат технічних наук, кафедра комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (066)-336-0808; e-mail: mntk.ddma@gmail.com

БЕРЕЗОВСЬКИЙ Д.О., КЛОЧКО Ю.О., ГРУЩИН С.С., КОЛІСНИК М.Е.

УПРАВЛІННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЯК ЕФЕКТИВНА КОНЦЕПЦІЯ РОЗВИТКУ МЕНЕДЖМЕНТУ МАШИНОБУДУВАННЯ В УКРАЇНІ

У даній статті розглядається управління за результатами як ефективна концепція розвитку менеджменту машинобудування в Україні. Визначено основні положення розвитку менеджменту машинобудування і підходи. Розглянуто відмінності у рисах звичайного управління і управління за результатами. Досліджено зарубіжний досвід з приводу збалансованої системи показників і її впливу на кінцевий результат управління. Виявлено необхідність використання моніторингу результатів з метою мінімізації можливості дублювання однакових функцій розвитку менеджменту машинобудування. Розглянуто проблему впровадження концепції управління за результатами в практику національних підприємств і інвестицій. Досліджено основні недоліки та переваги розвитку менеджменту машинобудування. Обґрунтовано необхідність використання концепції управління за результатами в сучасній Україні. Описано оптимальні початкові стратегії з метою зменшення витрат за часом на оптимізацію початкових інвестицій в цінні папери промисловості. Проведено порівняння теоретично можливих рішень і експериментальних даних стосовно операцій різних інвестиційних стратегій. Розглядаються висновки і результати обраних стратегій, включаючи вибір галузі з Найбільш багатобачуючий довгостроковою перспективою. Висновки підкріплюються прикладами з інвестиційного словника різних стратегій фондового ринку індустрії

Ключові слова: машинобудування, управління за результатами, концепція, зворотний зв'язок, моніторинг, рішення діджиталізація, ефективність, контроль, планування, оперативне управління. Інвестиції, опціонна позиція, промисловий індекс Доу-Джонса

БЕРЕЗОВСКИЙ Д.О., КЛОЧКО Ю.А., ГРУШЧИН С.С., КОЛЕСНИК М.Э.

УПРАВЛЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КАК ЭФФЕКТИВНАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ МЕНЕДЖМЕНТА МАШИНОСТРОЕНИЯ В УКРАИНЕ

В данной статье рассматривается управления по результатам как эффективная концепция развития менеджмента машиностроения в Украине. Определены основные положения развития менеджмента машиностроения и подходы. Рассмотрены отличия в чертах обычного управления и управления по результатам. Исследован зарубежный опыт по поводу сбалансированной системы показателей и ее влияния на конечный результат управления. Выявлена необходимость использования мониторинга результатов с целью минимизации возможности дублирования одинаковых функций развития менеджмента машиностроения. Рассмотрена проблема внедрения концепции управления по результатам в практику национальных предприятий и инвестиций. Исследованы основные недостатки и преимущества развития менеджмента машиностроения. Обоснована необходимость использования концепции управления по результатам в современной Украине. Описаны оптимальные начальные стратегии с целью уменьшения затрат по времени на оптимизацию начальных инвестиций в ценные бумаги промышленности. Проведено сравнение теоретически возможных решений и экспериментальных данных применительно к операциям различных инвестиционных стратегий. Рассматриваются выводы и результаты выбираемых стратегий, включая выбор отрасли с Наиболее многообещающий долгосрочной перспективой. Выводы подкрепляются примерами из инвестиционного словаря различных стратегий фондового рынка индустрии

Ключевые слова: машиностроение, управление по результатам, концепция, обратная связь, мониторинг, решение диджитализация, эффективность, контроль, планирование, оперативное управление. Инвестиции, опционная позиция, промышленный индекс Доу-Джонса

BEREZOVSKY D.O., KLOCHKO Y.A., GRUSHCHIN S.S., KOLESNIK M.E.

MANAGEMENT BY RESULTS AS AN EFFECTIVE CONCEPT OF DEVELOPMENT OF MANAGEMENT OF MACHINE-BUILDING IN UKRAINE

This article discusses results-based management as an effective concept for the development of mechanical engineering management in Ukraine. The main provisions of the development of engineering management and approaches are determined. The differences in the features of conventional control and management by results are considered. Foreign experience has been studied regarding a balanced scorecard and its impact on the final management result. The need for monitoring results in order to minimize the possibility of duplication of the same functions for the development of engineering management has been identified. The problem of introducing the concept of management by results in the practice of national enterprises and investments is considered. The main disadvantages and advantages of the development of engineering management are investigated. The necessity of using the concept of results management in modern Ukraine is substantiated. The optimal initial strategies are described in order to reduce the time spent on optimizing the initial investment in industry securities. A comparison of theoretically possible solutions and experimental data in relation to the operations of various investment strategies. The conclusions and results of the selected strategies are considered, including the choice of the industry with the most promising long-term perspective. The findings are supported by examples from the investment dictionary of various stock market strategies of the industry.

Keywords: engineering, results management, concept, feedback, monitoring, digitalization solution, efficiency, control, planning, operational management. Investment, option position, Dow Jones Industrial Average

Вступ. Ефективний розвиток будь-якого регіону України залежить від того, як виконуються функції менеджменту на різних ланках управління. Управління - це сукупність інструментів та методів, за допомогою яких один об'єкт впливає на інший, при цьому неодмінно змінюючи його властивості, стан і так далі [1]. Останній час усе більш стає актуальною проблема ефективного управління, як на регіональному рівні, так і на загальнодержавному. В сучасних реаліях, постійно змінюючої зовнішньої середовища, система управління знаходиться у постійній динаміці. Тому не дивно, що управлінням нового

покоління необхідно швидко корегувати плани розвитку галузей та адаптувати їх під зміни.

Підвищення ефективності роботи нових менеджерів і якості прийнятих рішень на досягнення цілей, оцінка їх результативності і управління підсумковим результатом є найбільш актуальною проблемою сучасної української науки.

Аналіз наукових досліджень та публікацій. Дослідженнями цієї проблеми присвятили свої праці такі автори як: П. Друкер, Я. А. Лейман, А. С. Горшков, А. Л. Кирилов, В. О. Бережний, Р. Каплан, Д. Нортон, Д. МакГрегор та ін..

1. Мета. Провести дослідження матеріалів стосовно концепції «управління за результатами». Визначити її роль та можливість ефективного використання в сучасній Україні. Надати рекомендації щодо застосування даної концепції.

2. Основна частина. Останні роки в Україні можна охарактеризувати як етап всебічних реформ, переосмислення управління та ролі управлінця в цілому. Тому не дивно, що увага приділяється ефективним концепціям управління. Для розвитку України однією з провідних можна вважати концепцію «управління за результатами». Дану концепцію (МВО – Management by Objectives) у 1954 році розробив відомий вчений Пітер Друкер. Уперше вона була згадана у його книзі «The Practice of Management». Вона передбачала особливий метод підвищення ефективності організації, де працівник виконуючи свої обов'язки оцінюється не за процесом, а за результатом.

У змісті управління за результатами найістотнішим є саме наголос на результат, що має як принципове, так і функціональне значення. При управлінні за результатами можливості організації використовуються таким чином, щоб плани діяльності простиралися від їх стратегічного рівня до планів індивідуального використання робочого часу окремими працівниками. Вже на етапі планування активізується використання волі й мислення всіх членів організації [1].

Одними з основних положень даної концепції є:

- Розробка цілей потрібна не тільки для певної організації, вони повинні розроблятися також і для робітників. Основним моментом є те що цілі робітників повинні впливати з цілей самої організації.

Таблиця. 1 – Відмінні риси звичайного управління і управління за результатами

	Звичайне управління	Управління за результатами
Загальна характеристика	Неясна або неточна система управління, спрямована на досягнення результату.	Управління є процесом пошуку результату (визначення результату; оперативне управління; контроль результатів).
Планування	Ініціативи співробітників не заохочуються; немає чіткого зв'язку між групами і окремими працівниками.	Ясність кінцевого результату; позиція стратегічного управління; враховуються ініціативи працівників; складаються плани діяльності в календарному виді; планування бюджету.
Оперативне управління	Результати виникають завдяки роботі персоналу; немає чіткої ув'язки планування з результатами.	У основі управління лежить зв'язок з результатами; постійний оперативний контроль; надання допомоги і підтримки в роботі персоналу.
Контроль	Вузька ринкова спрямованість; немає аналізу, тільки пояснення.	Робляться висновки по удачах і невдачах; цінується аналіз діяльності.

Як відомо, в основу методології управління за результатами покладена концепція, що має назву «збалансованої системи показників» (ЗСП), яка була розроблена в 1980х рр. Девідом Нортоні і Робертом Капланом. Можна відзначити, що найбільш успішно даний підхід застосовується в США і країнах ЄС [4].

- Розробка цілей йдеться зверху вниз для налагодження зв'язку з основною стратегією і знизу вгору для досягнення розуміння зі співробітником

- Прийняття участі в ухваленні рішень. Процес розробки цілі для робітника є етапом творчого процесу між ним та керівником. У даній концепції цілі повинні розроблятися керівником та співробітником разом. У такому разі начальник та робітник в період обговорення набагато краще розуміють, що потрібно робити і яким чином для досягання цілі.

- Постійний зворотний зв'язок та оцінка виконаних робіт.

Одним з провідних дослідників який був прибічником даного методу є Д. Мак-Грегор. На його переконання використання цього методу є доцільним, тому що дає можливість оцінювати керівників за результатами, а не за індивідуальними якостями. Д. Мак-Грегор запропонував, щоб кожен керівник нижчої ланки визначав конкретні виробничі цілі та засоби їх досягнення спільно з керівником вищої ланки.[2]

Слід відзначити, що одними з головних недоліків концепції управління за результатами є: можливість застосування лише на великих підприємствах; не дає результатів, якщо відсутня особиста мотивація працівників; потребує достатньо організованої системи контролю; труднощі при формуванні цілей; недостатність часу; проблема інтеграції з елементами організації; статичність ієрархії цілей.

У чому різниця між звичайним управлінням та управлінням за результатами? На це запитання можливо знайти відповідь у таблиці 1 де приведені найбільш характерні відмінні риси звичайного управління від управління за результатами.

Контроль досягнення цілей і моніторинг виконання заходів, спрямованих на їх досягнення, необхідно здійснювати за допомогою вимірних показників. Розроблені показники повинні найбільшою мірою відповідати наступним вимогам:

- адекватність: показник (група показників) повинен характеризувати прогрес у досягненні мети і охоплювати всі істотні аспекти досягнення мети;

- точність: дана вимога спрямована на запобігання похибок та забезпечення такого виміру показника, яке формує об'єктивне уявлення про хід процесу досягнення мети;

- об'єктивність: не допускається використання показників, поліпшення яких обумовлює погіршення реального стану справ, використовувати показники повинні в найменшій мірі створювати стимули управлінців для здійснення такого роду діяльності;

- достовірність: спосіб збору та обробки вихідної інформації повинен припускати точність отриманих даних у процесі незалежного моніторингу та оцінки досягнення мети;

- однозначність: визначення показника повинно забезпечувати однакове розуміння істоти вимірюваної величини;

- економічність: отримання звітних даних повинно проводитися з мінімально можливими витратами, застосовувати показники повинні в максимальному ступені ґрунтуватися на чинних програмах збору інформації;

- порівнянність: вибір показників слід здійснювати, виходячи з необхідності безперервного накопичення даних та можливості їх порівняння, як за окремі періоди, так і з показниками, використовуваними для оцінки прогресу в досягненні подібних цілей, а також з показниками, використовуваними в міжнародній практиці;

- своєчасність і регулярність: звітні дані повинні надходити зі строго визначеною періодичністю і з незначним часовим лагом між моментом збору інформації та строком її використання. Для використання в цілях моніторингу звітні дані повинні надаватися не рідше одного разу на рік і, як правило, не більше ніж через 2-3 місяці після закінчення звітного періоду;

- унікальність: показники досягнення мети не повинні представляти собою об'єднання (зважену суму або твір) кількох показників, що характеризують рішення окремих відносяться до цієї мети завдань [4].

Отримана в результаті система показників і являє собою ЗСП, використання якої в процесі управління забезпечує фундамент побудови управлінських процедур, орієнтованих на результат. Таким чином, ЗСП є інструментом, вміле застосування якого надає нові можливості ефективного управління [4].

Слід зазначити, що моніторинг результатів надає змогу мінімізувати можливість дублювання однакових функцій в одному і тому ж суб'єкті планування. Також він потрібен задля стеження за рівнем успіху стосовно реалізації плану та виникнення певних негараздів, орієнтуючись на результати попередньої роботи. Все це робить можливим запобігти можливості виникнення схожих помилок в управлінні. Виходячи з цього моніторинг є дієвим засобом покращення ефективності завдяки створенню необхідних умов для закладання міцного фундаменту досягнення поставлених цілей.

Як відомо, особистий вклад людини грає найважливішу роль в успішній діяльності організації. Ефективність управління за результатами як системи буде незначною, якщо керівники не самоудосконалюються в межах, визначених для них організацією. Таким чином, розвиток в управлінні за результатами означає формування цілеспрямованих і професійно підготовлених керівників [5].

Таким чином, у сучасному розумінні “управління за результатами” має низку характеристик, які відрізняють його від інших форм управлінської діяльності. По-перше, під час використання “управління за результатами” обов'язковим є постановка цілей і завдань, а також розуміння очікуваного результату. “Управління за результатами” являє собою повний цикл дій, в якому є етапи підготовки та планування, реалізації та оцінки. По-друге, схема роботи являє собою співвідношення “цілі – результати”, і під час постановки наступних цілей передбачає уваги попередніх результатів [3].

Якщо припустити повну відмову від бюрократії і надання більшої гнучкості системі управління через діджиталізацію ми отримаємо прискорення процесу прийняття інновацій в роботі організацій і зміни напрямків роботи в разі глобальних претворень, яких не можна виключати [3, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Слід зазначити, що успішне функціонування організації, формування та існування організаційної культури, засвоєння та проповідання корпоративних ідей і цінностей неможливе без налагодженого процесу комунікацій. Комунікація створює сприятливі умови для розкриття професійних і ділових якостей співробітників, сприяє розвитку їх творчого потенціалу задля створення додаткових цінностей і отримання результату [11].

Сьогодні складність середовища функціонування підприємств визначає ситуації, які здебільшого формують загрози і посилюють негативну дію їх слабких сторін. У таких умовах підприємствам доводиться послідовно застосовувати знання для інтерпретації наявної інформації по окремій ситуації для прийняття рішень про те, як з неї виходити. А це, своєю чергою, вимагає нагромадження знань, організації процесу їх використання і зберігання для того, щоб застосовувати у конкретній ситуації чи проблемі. Необхідно зазначити, що у процесі формування і реалізації ситуаційних моделей управління підприємством виявляється практична значимість знань, отриманих в організації [12].

Під час планування та реалізації змін, зокрема у сфері управління, важливим є виявлення ефектів, що можуть виникати. Це можливо за допомогою застосування методів оцінювання додаткових вигід для підприємства від такої діяльності. Дуже часто такі результати важко виявити традиційними способами: через прибуток, частку ринку, товарний асортимент. Виконання цього завдання можливе за рахунок визначення прихованих можливостей, які можуть виникати як результат зв'язків, що створюють додаткові вигоди для підприємств і проявляються за певних обставин. Будь-яка система має безліч поєднань і комбінацій щодо залучення і використання

навного потенціалу; крім того, кожне підприємство має власні компетенції щодо ефективного ведення бізнесу. Все це може забезпечити підприємству додатковий результат у разі вмілого управління. Тому важливим сьогодні є обґрунтування методів виявлення прихованих можливостей досягнення якісних змін на основі застосування сучасних технологій управління [12, 13, 14, 15, 16].

Висновки. Концепція “управління за результатами” може стати універсальним засобом у менеджменті України з приводу боротьби з витоком ресурсів, неефективністю і бюрократизмом системи управління. Концепції чітко окреслює орієнтацію на кінцевий результат і на споживачів, коли продукт, визначений на основі цілей і завдань, є вихідним пунктом усіх процесів інформації та прийняття рішень, а отже, необхідним елементом формування нової концепції управління. Треба відзначити, що для ефективного функціонування даної концепції потрібна розробка збалансованої системи показників. Для цього потрібно скористатися досвідом країн ЄС та США де використання такого підходу дає найбільший результат.

Список літератури:

1. *Управление по результатам* / общ. ред. и пред. Я. А. Леймана ; [пер. с финн.]. – М. : Наука, 1993. – 315 с.
2. Музиченко-Козловський А. В. *Управління за цілями як інноваційна модель розвитку підприємства* [Електронний ресурс] / А. В. Музиченко-Козловський. – 2011. – Режим доступу: http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/12869/1/019_Upravl%20%D1%96nnja%20za%20%D1%96ljam_109_113_714.pdf.
3. Сучасні концепції публічного управління / В. О. Бережний // *Актуальні проблеми державного управління*. - 2013. - № 2. - С. 31-38. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/apdy_2013_2_6.pdf
4. Горшков А. С. *Принципы управления по результатам в деятельности органов власти* / А. С. Горшков, А. Л. Кириллов // *Управленческое консультирование*. – 2008. – № 1. – С. 5–13.
5. *Менеджмент організацій* [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://uchebnikirus.com/menedzhment/organizatsiy-fedulova_1_i/upravlinnya_rezultatami_finskiy_dosvid.htm.
6. Адизес И. *На пороге управленческой революции* // *HarvardBusinessReview* – 2017 с.7-9.
7. Талер Р. *Новая поведенческая экономика* М.: Издательство «Э», 2017. 225 с.
8. Гохберг Л. *Инновационные процессы: тенденции проблемы* // *Экономист*. -2016.-№2- С. 50-59.
9. Комов М. С. *Роль инноваций в антикризисном управлении* // *Молодой ученый*. — 2016. — № 19. — С. 458-459.
10. Козаченко В.Г. *Технологізація управлінської діяльності: зміст та призначення* // *Економіка і регіон* № 3 (58) – 2016 – ПолтНТУ. - С. 37-40.
11. Бабчинська О. І. *Комунікаційний процес в управлінні: основні положення*. Ефективна економіка. 2018. № 9. [Електронний ресурс] / О.І. Бабчинська.- Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6539>
12. Поплавська Ж.В. *Зміна парадигми стратегічного управління на підприємстві в умовах сучасного розвитку*. / Ж.В.

Поплавська, А.С. Полянська [Електронний ресурс]. - <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/26244/1/16-109-116.pdf>.

13. Campbell, John Y. and Viceira, Luis M., *The Term Structure of the Risk-Return Tradeoff* (February 2005): 34-44.

14. Levine, Ross (2005), *Finance and Growth: Theory and Evidence*. Handbook of economic growth 1, 865-934, 2005.

15. Robert G. King, Ross Levine, *Capital fundamentalism, economic development, and economic growth*, Washington, D.C.: World Bank, Policy Research Department, Finance and Private Sector Development Division, [1994], 33.

16. *The Paperback of the Investment Management for Taxable Private Investors* by Jarrod W. Wilcox, Jeffrey E. Horvitz, Dan DiBartolomeo, 2006, Charlottesville, VA: Research Foundation of CFA Institute, 53.

References(transliterated)

1. *Upravlenie po rezul'tatam / obshh. red. i. pred. Ja. A. Leimana ; [per.s finn.]. – М. : Nauka, 1993. – 315 s.*
2. Muzychenko-Kozlovskyy A. V. *Upravlinnya za tsilyamy yak innovatsiyna model' rozvytku pidpriyemstva* – 2011. Available at:http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/12869/1/019_Upravl%D1%96nnja%20za%20%D1%96ljam_109_113_714.pdf.
3. *Suchasni kontseptsiiy publichnoho upravlinnya / V. O. Berezhnyy // Aktual'ni problemy derzhavnoho upravlinnya*. - 2013. - № 2. - S. 31-38. Available at: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/apdy_2013_2_6.pdf
4. Gorshkov A. S. *Principy upravleniya po rezul'tatam v dejatel'nosti organov vlasti* / A. S. Gorshkov, A. L. Kirillov // *Upravlencheskoe konsul'tirovanie*. – 2008. – № 1. – S. 5–13.
5. *Menedzhment organizacij*. Available at:http://uchebnikirus.com/menedzhment/menedzhment_organizatsiy-fedulova_1_i/upravlinnya_rezultatami_finskiy_dosvid.htm.
6. Adizes I. *Na poroge upravlencheskoj revolyucii* // *HarvardBusinessReview* – 2017 s.7-9.
7. Taler R. *Novaja povedencheskaja jekonomika* M.: Izdatel'stvo «Je», 2017. 225 s.
8. Gohberg L. *Innovacionnye processy: tendencii problemy* // *Jekonomist*. -2016.-№2- S. 50-59.
9. Komov M. S. *Rol' innovacij v antikrizisnom upravlenii* // *Molodoj uchenyj*. — 2016. — № 19. — S. 458-459.
10. Kozachenko V.H. *Tekhnolohizatsiya upravlins'koy diyal'nosti: zmist ta pryznachennya* // *Ekonomika i rehion* # 3 (58) – 2016 – PoltNTU. - S. 37-40.
11. Babchyn'ska O. I. *Komunikatsiynny protses v upravlinni: osnovni polozhennya*. *Efektivna ekonomika*. 2018. # 9. Available at: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6539>
12. Poplavs'ka Zh.V. *Zmina paradyhmy strateichnoho upravlinnya na pidpriyemstvi v umovakh suchasnoho rozvytku*. / Zh.V. Poplavs'ka, A.S. Polyan'ska. Available at: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/26244/1/16-109-116.pdf>.
13. Campbell, John Y. and Viceira, Luis M., *The Term Structure of the Risk-Return Tradeoff* (February 2005): 34-44.
14. Levine, Ross (2005), *Finance and Growth: Theory and Evidence*. Handbook of economic growth 1, 865-934, 2005.
15. Robert G. King, Ross Levine, *Capital fundamentalism, economic development, and economic growth*, Washington, D.C.: World Bank, Policy Research Department, Finance and Private Sector Development Division, [1994], 33.
16. *The Paperback of the Investment Management for Taxable Private Investors* by Jarrod W. Wilcox, Jeffrey E. Horvitz, Dan DiBartolomeo, 2006, Charlottesville, VA: Research Foundation of CFA Institute, 53.

Поступила (received) 15.06.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Березовський Данило Олегович (Березовский Даниил Олегович, Berezovskyi Danylo Olegovich) – кандидат наук з державного управління, кафедра менеджменту, Донбаський інститут техніки та менеджменту Міжнародного науково-технічного університету імені Ю. Бугая, м. Краматорськ, Україна; e-mail: dbusiness08@gmail.com

Клочко Юрій Олександрович (Клочко Юрий Александрович, Klochko Yuri Alexandrovich) – кандидат економічних наук, зав. кафедри менеджменту, Донбаський інститут техніки та менеджменту Міжнародного

науково-технічного університету імені Ю. Бугая; м. Краматорськ, Україна;; e-mail: asimba@ukr.net, ORCID 0000-0002-6219-0087.

Грушін Сергій Сергійович (Грушин Сергей Сергеевич, Grushchin Sergey Sergeevich) – director, SS&C Technologies, Inc., 4 Times Square, New York, NY, 10036, USA, e mail: sgrushchin@sscinc.com.

Колісник Марія Едуардівн (Колесник Мария Эдуардовна, Kolesnik Maria Eduardovna) –кандидат технічних наук, старший викладач кафедри економіки та маркетинга Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет» ; м. Харків, Україна;; e-mail: rozaeduard@gmail.com, ORCID 0000-0001-9930-7819.

ІВАНОВА Л. П.

АНАЛІЗ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИН МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Перспективним шляхом підвищення точності виготовлення деталей є мінімізація теплових деформацій технологічної системи. Важливим фактором такого впливу є тепловий стан технологічних рідин, які використовуються в циклі обробки. Вказаний фактор вивчено недостатньо, але у теперішній час проводиться велика кількість наукових досліджень у цьому напрямку. В даній статті проведено детальний аналіз найбільш відомих результатів досліджень, надрукованих як у закордонних, так і в вітчизняних авторитетних наукових виданнях. На цій підставі виконано оцінку ступені впливу теплового стану технологічних рідин на деформацію базових елементів шліфувальних верстатів, класифіковано відомі способи і техніка охолодження металоерізальних верстатів та виконана порівняльна оцінка ефективності їх застосування, запропоновано комплекс шляхів зниження кількості теплоти, яка сприймається МОР.

Ключові слова: гідросистема верстата, тепловий стан технологічних рідин, техніка охолодження, конвекційний теплообмін.

ІВАНОВА Л. П.

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ МЕТАЛЛОРЕЗУЩИХ СТАНКОВ

Перспективным путем повышения точности изготовления деталей является минимизация тепловых деформаций технологической системы. Важным фактором такого влияния является тепловое состояние технологических жидкостей, используемых в цикле обработки. Указанный фактор изучен недостаточно, но в настоящее время проводится большое количество научных исследований в этом направлении. В данной статье проведен детальный анализ наиболее известных результатов исследований, опубликованных как в зарубежных, так и в отечественных научных изданиях. На этой основе выполнена оценка степени влияния теплового состояния технологических жидкостей на деформацию базовых элементов шлифовальных станков, классифицированы известные способы и техника охлаждения металлорежущих станков и выполнена сравнительная оценка эффективности их применения, предложен комплекс путей снижения количества теплоты, которая воспринимается СОЖ.

Ключевые слова: гидросистема станка, тепловое состояние технологических жидкостей, техника охлаждения, конвекционный теплообмен.

IVANOVA L. P.

ANALYSIS OF THE THERMAL STATE OF TECHNOLOGICAL FLUIDS OF METAL CUTTING MACHINES

A promising way to increase the accuracy of manufacturing parts is to minimize thermal deformations of the technological system. An important factor in this effect is the thermal state of the process fluids used in the treatment cycle. The indicated factor has not been studied enough, but a large amount of scientific research is currently being conducted in this direction. This article provides a detailed analysis of the most famous research results published both in foreign and domestic scientific journals. On this basis, an assessment of the degree of influence of the thermal state of process fluids on the deformation of the basic elements of grinding machines was made, the known methods and techniques for cooling metal cutting machines were classified, a comparative assessment of the effectiveness of their use was performed, a set of ways to reduce the amount of heat that was absorbed by the coolant was proposed.

Keywords: machine hydraulic system, thermal state of technological liquids, cooling technology, convection heat exchange.

Вступ. Сучасні транспортні і технологічні машини використовують все більш інтенсивні швидкісні режими праці, що викликає потребу у підвищенні точності і якості виготовлення їх деталей та вузлів. У цих умовах значно зростає роль шліфування, як однієї з поширених фінішних технологічних операцій. Шліфування відрізняється високою енергонасиченістю процесу, що визиває теплові деформації технологічної системи і викликає зниження точності обробки. Тепловий стан технологічних речовин відіграє значну роль у формуванні теплового поля верстата, тому зменшення теплового впливу технологічних рідин на елементи верстата потребує більш детального вивчення цього фактору.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Останнім часом питанням вивчення теплового впливу технологічних речовин на протікання теплових процесів у технологічній системі металоерізальних верстатів приділяється значна увага дослідників. Вивченню цього питання присвячена велика кількість робіт як закордонних [1-7], так і вітчизняних [8-13] вчених.

Незважаючи на різноманітні підходи і

використану методологію досліджень дослідники єдині в оцінці значного впливу цього фактору на точність операцій механічної обробки. Численні відомості з цих питань потребують детального аналізу, узагальнення і систематизації з метою використання їх для створення методології і засобів зниження впливу теплової дії технологічних рідин на точність обробки на верстатах.

3. Мета дослідження. Виконати детальний оглядовий аналіз найбільш відомих публікацій з питань вивчення впливу теплового стану технологічних рідин на точність обробки узагальнити і класифікувати інформацію з цих питань та рекомендувати на цій основі шляхи зниження кількості тепла, що переходить у МОР при механічній обробці.

4. Викладення основного матеріалу.

Тепловий вплив на вузли верстата може викликати температурні деформації і пов'язані з ними погіршеності розмірів і форми деталей. Тепловий режим роботи верстата, як правило, є нестабільним, так як це обумовлено відмінністю умов циклічності процесу обробки. При цьому похибки, викликані температурними змінами можуть мати різну природу (рис. 1).



Рис. 1 – Фактори, що викликають температурні погрішності при механічній обробці на верстатах

Серед факторів, які викликають температурні похибки, слід виділити тепловий стан технологічних рідин в елементах (підсистемах) гідросистеми верстата: гідроприводу подач, мащення, охолодження і застосування МОР.

Температура рідини в гідросистемі верстата може змінюватися в залежності від етапу роботи протягом 300 с часу від 24°C до 38°C , що негативним чином може вплинути на точність обробки [1].

Температурні деформації верстатів залежать від величини, споживаної ними енергії і характеру її розподілу між елементами технологічної системи.

Інформація з цього питання суперечлива. На думку деяких дослідників, основним споживачем енергії є шпиндельний вузол [2], який споживає до 45,1% енергії, споживаної верстатом.

За даними інших джерел [3] основними споживачами енергії, що підводиться є інші функціональні елементи верстата (рис. 2).

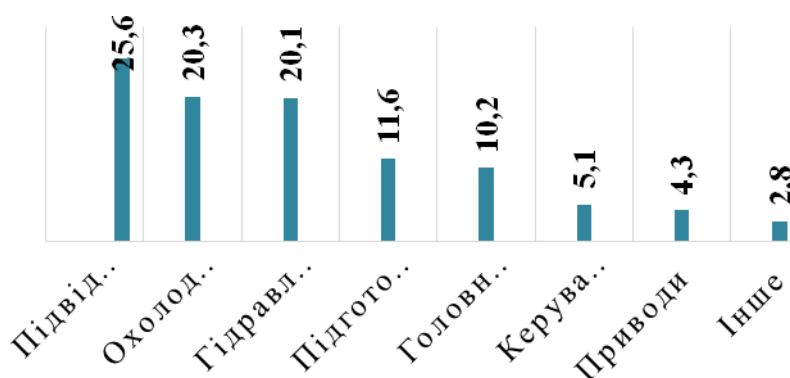


Рис. 2 – Розподіл енергії, що вживається, %, між елементами технологічної системи обробного центру

В роботі [4] проведено 3D-моделювання прецизійного шліфувального верстата з визначенням основних джерел теплової потужності: лінійного приводу $Q=13,23\ldots30,70$ Вт; передача гвинт-гайка кочення $Q_{\text{ко}} = 350,3$ Вт/м²; напрямні $Q = 1,9$ Вт.

Поля розподілу температур отримано з урахуванням температури навколишнього середовища 22°C і умови конвективного теплообміну. При підвищенні температури в парі гвинт-гайка кочення на 5°C , температура лінійних приводів збільшується на $0,8-1,5^{\circ}\text{C}$, а температура напрямних – на $0,9^{\circ}\text{C}$.

Деформація елементів верстата з тепловим впливом і без нього практично одна і та ж і змінюється від 6,6 до 6,69 мкм.

Обсяг інформації про теплові процеси в гідросистемах металорізальних верстатів обмежений. У гідросистемах верстатів гідравлічна енергія передається по трубах через гідроапаратуру до споживачів. При цьому певна кількість енергії

перетворюється в теплову. Характер цього перетворення залежить від ряду факторів, у тому числі, від вязкісних властивостей рідини.

За функціональним призначенням гідросистема верстата може бути структурно розділена на кілька підсистем (наприклад, на чотири [2]):

- підсистема гідроприводу, призначена для перетворення гідравлічної енергії в механічну роботу, яка використовується, наприклад, для затиску інструменту, повороту столу та інших рухів виконавчих механізмів;

- підсистема застосування МОР, що забезпечує її подачу в зону різання і оптимальні умови експлуатації технологічної системи;

- підсистема мащення, призначена для змащення напрямних, механічних передач коробок швидкостей, підшипників і т. п.

- підсистема охолодження, призначена для охолодження шпинделів і інших елементів верстата. Підсистема забезпечує можливість управління станом

теплових потоків в верстаті і підвищення точності обробки (аж до прецизійної).

Встановлено [2], що елементи верстатів, які пов'язані з експлуатацією технологічних рідин

відрізняються значною енергонасиченістю. Крім того, визначено структуру розподілу гідравлічної і теплової енергії в гідросистемі на різних етапах технологічного циклу роботи верстата (рис. 3).

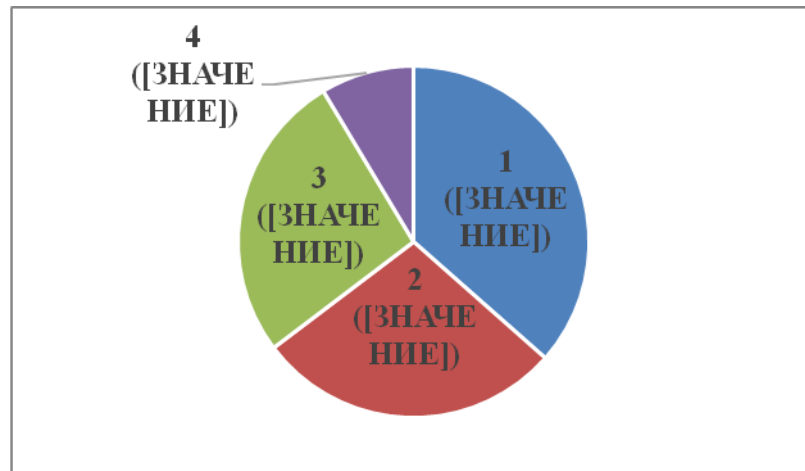


Рис. 3 – Розподілення споживаної енергії, %, в елементах гідросистеми 5-ти координатного обробного центра: 1 – підсистема застосування МОР; 2 – підсистема мащення; 3 – підсистема охолодження; 4 – підсистема гідроприводу подач

Для підсистеми гідроприводу подач характерно наступне. Оскільки потужність, яка втрачається в системі перетворюється в тепло, температура рідини може значно підвищитися. При цьому знижується в'язкість самої рідини, що збільшує витрати і сприяє прогресуючому підвищенню температури за рахунок втрат енергії в результаті витоків. У свою чергу, підвищення температури тягне за собою окислення рідини, яке супроводжується подальшим зниженням її в'язкості, появи в ній смолистих включень і опадів. Крім того, з підвищенням температури об'єм робочої рідини збільшується, причому приріст об'єму можна визначити за формулою:

$$\Delta V_{\text{жс}} = \alpha_{\text{жс}} \cdot V_{\text{жс}} \cdot \Delta t_{\text{жс}},$$

де $\alpha_{\text{жс}}$ – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини; $V_{\text{жс}}$ – початковий об'єм рідини;

$\Delta t_{\text{жс}}$ – приріст температури рідини.

Приріст температури рідини на 1°C призводить до збільшення її об'єму на 0,07%.

Як наслідок, перераховані чинники можуть стати однією з причин зміни просторового положення деталей гідроприводу і верстата в цілому.

Дуже важливим досить енергоємним елементом гідросистеми верстата є підсистема охолодження. Від її функціонального стану значною мірою залежить поведінка елементів верстата при обробці. В першу чергу це стосується шпиндельних вузлів і деяких інших елементів.

Узагальнення даних [5] дозволило скласти класифікацію способів і техніки охолодження металорізальних верстатів (рис. 4).



Рис. 4. – Класифікація способів і техніки охолодження металорізальних верстатів

Термоелектричне охолодження вимагає пристроїв з малим числом рухомих частин, є більш гнучким і надійним і, отже, більше підходить для верстатів з високошвидкісної обробкою.

Конвективне охолодження забезпечується за рахунок випаровування при стисненні і адсорбції в

використовуваних повітряних або водяних конденсаторах. Однак це вимагає великих витрат, пов'язаних з обладнанням для підготовки та обробки води.

Примусове охолодження з використанням холодильників, в яких циркулює охолоджуючий агент

вимагає енергоємного обладнання. Теплові труби можуть трансформувати велику кількість тепла через простір з малими поперечними перетинами, однак їх можливості обмежені.

В результаті досліджень [6] встановлено зв'язок між споживаною енергією приводу головного руху, енергією, що витрачається системою охолодження і зміщенням базових точок обробного центру в залежності від тривалості обробки. Конструкція системи охолодження впливає на величину зміщення характерних точок, яке знаходиться в межах 3-35 мкм.

Дослідження теплового стану шліфувальної бабки [7] з гідростатичними підшипниками ($V_k = 60$ м/с) показали, при температурі навколишнього середовища 25°C температура в різних точках бабки змінюється від $21,9$ до 38°C , при цьому фронтальна поверхня бабки нагрівається до $30-35^\circ\text{C}$.

Температура охолоджуючої рідини змінюється в межах від 18 до 27°C . Це призводить до деформації шліфувального шпинделя в межах 3,5-13 мкм.

Одним з джерел тепла, що визначає температурне поле і температурні деформації вузлів і деталей верстата є МОР нагріта в зоні різання. Встановлено [8, 9, 10], що тепловий фактор МОР може негативно впливати на температурні деформації верстатів.

За даними [11] підвищення температури МОР в підсистемі її застосування призводить до відхилення осей шліфувальних шпинделів, що призводить зміни кутового положення шліфувальних кругів. За деякими даними [12] виміряна температура в елементах технологічної системи, що працює із застосуванням МОР, вище, ніж в технологічній системі, що працює без її застосування (рис. 5).

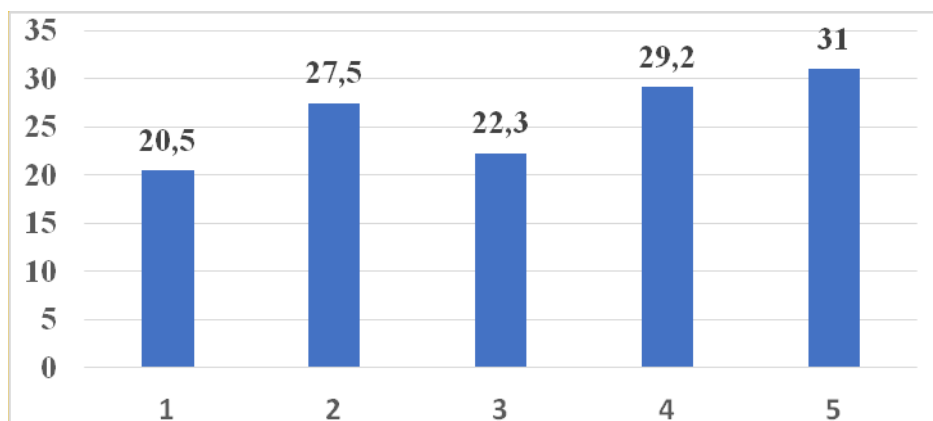


Рис. 5 – Результати вимірювань температури ($^\circ\text{C}$) елементів 5-ти координатного обробного центру після 7-ми годин роботи: 1 і 2 – область, що прилягає до зони різання, відповідно, обробка без і із застосуванням МОР; 3 і 4 – поворотний стіл, відповідно, обробка без і із застосуванням МОР; 5 – експлуатаційна температура МОР

Причому це помітно в першу чергу в фазі нагріву системи. У фазі охолодження різниці між температурами елементів не так відчутна. Одним з перспективних шляхів такого зниження є використання прогресивних технологічних схем обробки з застосуванням додаткових проміжних правок шліфувального круга, що дозволяє лімітувати

максимальне значення виділеної теплоти на кожній стадії обробки [13].

За результатами досліджень можна виділити заходи, що дозволяють знизити величину температурних деформацій верстатів і тим самим підвищити точність обробки (рис. 6).



Рис. 6 – Шляхи зниження теплового впливу на МОР при шліфуванні

На цій підставі намічено шляхи зниження теплових впливів на МОР. Це можна зробити в тому числі і за рахунок правильної організації поглинання тепла, що генерується зоною різання, мастильно-охолоджувальної рідиною.

Висновки. Таким чином, на основі оглядового аналізу літературних джерел виконана оцінка ступені впливу теплового стану технологічних рідин на деформації базових елементів шліфувальних верстатів і, в кінцевому рахунку, на точність обробки на фінішних операціях виготовлення деталей машин.

Класифіковано відомі способи і техніки охолодження металорізальних верстатів та виконана порівняльна оцінка ефективності їх застосування.

Запропоновано комплекс шляхів зниження кількості теплоти, яка сприймається МОР, тобто, опосередковано вказано шляхи зменшення теплових деформацій верстата.

Список літератури:

1. Pursian S. *Therme-energetische Modellierung der Fluidsysteme eines Bearbeitungszentrums* / TU Dresden; 2015.
2. Juliane Weber, Jürgen Weber, Linart Shabi, Harald Lohse. Energy, power and heat flow of the cooling and fluid systems in a cutting machine tool / 7 HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting. P. 99-102.
3. Bäuml S., Bode H., Brecher C., Braebach, T, Hansch, S., Henges, N. *Resourceeffizienz im Werkzeugmaschinenbau* / in Brecher, C., Cboche, F., Schmitt, R., Schuh, G. *Weltbawerbsfaktor Produktionstechnik Aachener Perspektiven*, Proceedings of Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium (AWK).
4. Leon-Yeol Oh, Joon Jang, WooChun Chooi. *Analyses of High-Precision Grinding Machine* / International Journal of Emerging Trends in Engineering Research (IJETER), Vol. 3 No 1, Pages: 12-16 (2015).
5. Poonam S., Patil, R. *Mudholkar. Cooling Techniques for a Spindle of Machine Tool* / International Journal Of Engineering And Computer Science ISSN: 2319-7242 Volume 5 Issue 12 Dec. 2016, Page No. 19653-19656.
6. Brecher, C., Bäuml, S., Jasper, D and Triebs J. *Energy Efficient Cooling Systems for Machine Tools* / 19 CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Berkeley, 2012. p. 239-244.
7. Bo-Sung, Gueong-Tae Bay, Gwi-Nam Kit. *A study on the thermal Characteristics of the grinding machine applied hydrostatic bearing* / Transaction of the Canadian society for Mechanical Engineering. Vol. 39, No 3, 2015, p. 717-728.
8. Вектрис В.Ю. *Стабилизация температурного режима круглошлифовальных станков* / В.Ю. Вектрис // Станки и инструмент. – 1986. – №7. – с. 17.
9. Марцинкявичус А.-Г. Ю. *Снижение температурных деформаций круглошлифовального станка* / А.-Г. Ю. Марцинкявичус // Станки и инструмент. – 1991. – №5. – с. 7-10.
10. Якимов, О.В. *Теплофизика механической обработки* / О.В. Якимов, А.В. Усов, П.Т. Слободяник, Д.В. Горбачов. – Одесса: Астропринт, 2000. – 256 с.
11. Андрианова И.А. *Повышение точности торцевого шлифования методом терморегулирования* / И.А. Андрианова, С.С. Шахновский // Станки и инструмент, 1984. – № 11. – с. 31-32.

12. Gebharolt, M. *Thermal Befavionur and Compensation of Rotary Axes in 5-Axis Machine Tools*, Dissertation No21733, ETHZurich, 2014.

13. M Stepanov, L Ivanova, P Litovchenko, M Ivanova, Y Basova. *Determination of Parameters of Cylindrical Grinding with Additional Intermediate Dressing*. In the book: Ivanov V. et al. (Ed.) *Advances in Design, Modeling and Production II. DSMIE 2019. Summary of lectures in the field of mechanical engineering*. Springer, Cham, P. 331-339

References (transliterated)

1. Pursian S. *Therme-energetische Modellierung der Fluidsysteme eines Bearbeitungszentrums* / TU Dresden; 2015.
2. Juliane Weber, Jürgen Weber, Linart Shabi, Harald Lohse. Energy, power and heat flow of the cooling and fluid systems in a cutting machine tool / 7 HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting. P. 99-102.
3. Bäuml S., Bode H., Brecher C., Braebach, T, Hansch, S., Henges, N. *Resourceeffizienz im Werkzeugmaschinenbau* / in Brecher, C., Cboche, F., Schmitt, R., Schuh, G. *Weltbawerbsfaktor Produktionstechnik Aachener Perspektiven*, Proceedings of Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium (AWK).
4. Leon-Yeol Oh, Joon Jang, WooChun Chooi. *Analyses of High-Precision Grinding Machine* / International Journal of Emerging Trends in Engineering Research (IJETER), Vol. 3 No 1, Pages: 12-16 (2015).
5. Poonam S. Patil, R. R. Mudholkar. *Cooling Techniques for a Spindle of Machine Tool*. International Journal Of Engineering And Computer Science ISSN: 2319-7242 Volume 5 Issue 12 Dec. 2016, Page No. 19653-19656.
6. Brecher, C., Bäuml, S., Jasper, D and Triebs J. *Energy Efficient Cooling Systems for Machine Tools*. 19 CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Berkeley, 2012. p. 239-244.
7. Bo-Sung, Gueong-Tae Bay, Gwi-Nam Kit. *A study on the thermal Characteristics of the grinding machine applied hydrostatic bearing*. Transaction of the Canadian society for Mechanical Engineering. Vol. 39, No 3, 2015, p. 717-728.
8. Vektris V.U. *Stabilizatsiya temperaturnogo regima krugloshlifovalnyh stankov* / V.U. Vektris // Cranki i instrument. – 1986. – №7. – с. 17.
9. Marcynkjavichus A.-G. U. *Cnigienie temperaturnyh deformacy krugloshlifovalnogo ctanka* / A.-G. U. Marcynkjavichus // Cranki i instrument. – 1991. – №5. – с. 7-10.
10. Jakimov, O.V. *Teplofizika mekhanichnoi obrobky* / O.V. Jakimov, A.V. Usov, P.T. Clobodjanik, D.V. Gorgachov. – Odessa: Actroprint, 2000. – 256 c.
11. Andrianova, I.A. *Povyshenie tochnosti torcovogo shlifovaniya metodom termoregulirovaniya* / I. A. Andrianova, C.C. Shahnovskiy // Cranki i instrument, 1984. – № 11. – с. 31-32.
12. Gebharolt, M. *Thermal Befavionur and Compensation of Rotary Axes in 5-Axis Machine Tools*, Dissertation No21733, ETHZurich, 2014.
13. M Stepanov, L Ivanova, P Litovchenko, M Ivanova, Y Basova. *Determination of Parameters of Cylindrical Grinding with Additional Intermediate Dressing*. In the book: Ivanov V. et al. (Ed.) *Advances in Design, Modeling and Production II. DSMIE 2019. Summary of lectures in the field of mechanical engineering*. Springer, Cham, P. 331-339

Поступила (received) 1.06.2020

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Іванова Лариса Петрівна (Иванова Лариса Петровна, Ivanova Larysa Petrovna) – аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету

ФЕСЕНКО А.В., УШАКОВ, А.Н., ЕВСЮКОВА, Ф.М., СЛИПЧЕНКО С.Е.

ВЫБОР УСИЛИЯ РЕЗАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЗАДАНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЛИФОВАНИЯ

В статье рассмотрены вопросы влияния усилия резания на состояния рабочей поверхности шлифовального круга и шероховатость обработанной поверхности. Выполнен анализ разработанных ранее алгоритмов для управления круглошлифовальными станками, установлено, что данные алгоритмы не учитывают характеристики шлифовального круга, которые имеют существенное влияние на формирование шероховатости обработанной поверхности детали. Установлено, что качество обработки на начальном этапе цикла определяется интенсивностью правки шлифовального круга. Разработана иерархическая структура получения шероховатости, учитывающая характеристики шлифовального круга, параметры правки, параметры шлифования, непосредственно процесс шлифования с определением удельной силы резания. Получена расчетная зависимость удельной составляющей силы резания, учитывающая структуру цикла, этап шлифования и уровень достижимой шероховатости поверхности, а также характеристики шлифовального круга и условия обработки в виде суммарного поправочного коэффициента. Разработан алгоритм расчета удельной составляющей силы резания. Получены зависимости шероховатости поверхности при обработке сталей 45 и ШХ-15 кругами 91А и 24А для различных этапов цикла обработки. Установлен, характер износа шероховатости при работе после правки, так начальная шероховатость зависит от интенсивности съема металла и от режимов правки. Установлено, что для стабильного процесса шлифования режимы правки должны обеспечивать уровень шероховатости достижимый при выбранной интенсивности шлифования. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили определить допустимый уровень радиальной составляющей усилия резания при получении заданной шероховатости.

Ключевые слова: сила резания, шероховатость, врезная подача, шлифовальный круг, твердость, зернистость, связка, время обработки.

ФЕСЕНКО А.В., УШАКОВ О.М., ЄВСЮКОВА Ф.М., СЛІПЧЕНКО С.Є.

ВИБІР ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ ПРИ ОТРИМАННІ ЗАДАНИХ ПАРАМЕТРІВ ШЛІФУВАННЯ

У статті розглянуті питання впливу зусилля різання на стани робочої поверхні шліфувального круга і шорсткість обробленої поверхні. Виконано аналіз розроблених раніше алгоритмів для управління круглошліфувальними верстатами, встановлено, що дані алгоритми не враховують характеристики шліфувального круга, які мають істотний вплив на формування шорсткості обробленої поверхні деталі. Встановлено, що якість обробки на початковому етапі циклу визначається інтенсивністю правки шліфувального круга. Розроблено ієрархічну структуру отримання шорсткості, що враховує характеристики шліфувального круга, параметри правки, параметри шліфування, безпосередньо процес шліфування з визначенням питомої сили різання. Отримано розрахункова залежність питомої складової сили різання, що враховує структуру циклу, етап шліфування і рівень досяжної шорсткості поверхні, а також характеристики шліфувального круга і умови обробки в вигляді сумарного поправочного коефіцієнта. Розроблено алгоритм розрахунку питомої складової сили різання. Отримано залежності шорсткості поверхні при обробці сталей 45 і ШХ-15 кругами 91А і 24А для різних етапів циклу обробки. Встановлено, характер зносу шорсткості при роботі після правки, так початкова шорсткість залежить від інтенсивності знімання металу і від режимів правки. Встановлено, що для стабільного процесу шліфування режими правки повинні забезпечувати рівень шорсткості досяжний при обраної інтенсивності шліфування. Виконані теоретичні та експериментальні дослідження дозволили визначити допустимий рівень радіальної складової зусилля різання при отриманні заданої шорсткості.

Ключові слова: сила різання, шорсткість, врізна подача, шліфувальний круг, твердість, зернистість, зв'язка, час обробки.

FESSENKO A.V., USHAKOV, A.N., EVSYUKOVA, F.M., SLIPCHENKO S.E.

SELECTION OF CUTTING EFFORT WHEN RECEIVING PRESET GRINDING PARAMETERS

The article questions of influence of effort of cutting on conditions of a working surface of a wheel and a roughness of the treated surface are considered. The analysis developed before algorithms for control of circular grinding machine tools is made, is established that the given algorithms do not consider performance of a wheel which have essential influence on shaping of a roughness of the treated surface of a detail. It is established that quality of handling at the cycle initial stage is defined by intensity of editing of a wheel. The hierarchical structure of deriving of the roughness, considering wheel performances, editing parameters, grinding parameters, immediately process of grinding with definition of specific force of cutting is developed. Settlement dependence of specific making force of the cutting, considering cycle structure, a stage of grinding and level of an accessible surface roughness, and also performance of a wheel and a condition of handling in the form of a total correction factor is received. Influence of editing for wheels 91A and 24A by which details from steels 45 and SH -15 were treated was examined, as a result established that roughness level under identical conditions of handling for circles 91A was above, than 24A. The algorithm of calculation of specific making force of cutting is developed. Dependences of a surface roughness are received at handling of steels 45 both SH -15 by circles 91A and 24A for various stages of an operation cycle. It is established, character of deterioration of a roughness at operation after editing so the initial roughness depends on intensity of a metal removal and from editing conditions. It is established that for stable process of grinding editing conditions should ensure roughness level accessible at the selected intensity of grinding. Executed theoretical and experimental researches have allowed to define admissible level of a radial component of effort of cutting at deriving of the set roughness.

Keywords: cutting force, roughness, mortise feed, grinding wheel, hardness, graininess, bond, processing time.

Введение. Состояние рабочей поверхности шлифовального круга зависят от характера износа абразивных зерен и во многом определяет качество обработки. Начальный повышенный износ образуется при удалении с рабочей поверхности круга дефектных по форме и неудачно ориентированных после правки зерен. В дальнейшем при шлифовании в зависимости от нагрузки на зерна износ может иметь характер выкрашивания зерен, скалывания отдельных

частиц, истирания с образованием площадок износа, засаливанием, при котором резания почти не происходит, а только идет интенсивный нагрев детали.

Литературный обзор. Характер расположения отдельных зон работы круга и его переход из одной области в другую в зависимости от твердости круга и зернистости (при постоянном режиме шлифования) см. рис. 1.

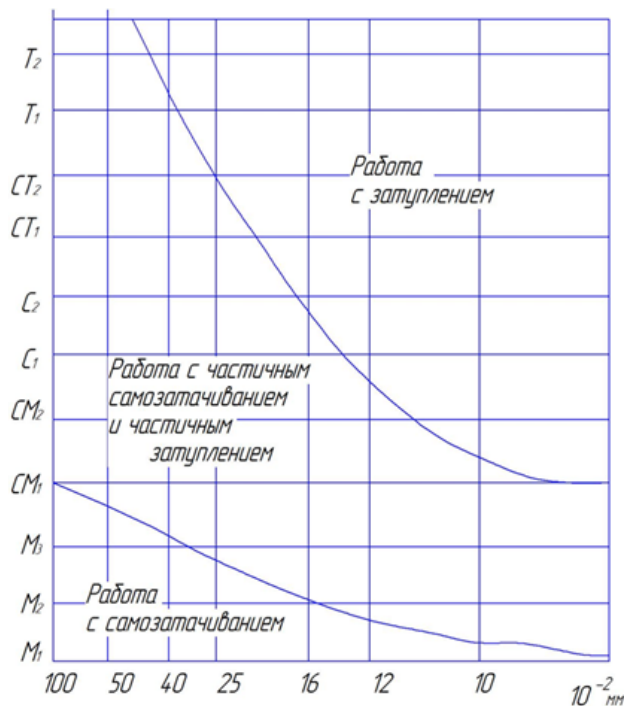


Рис. 1 – Изменение характера работы шлифовального круга

Для автоматизации циклов шлифования с получением заданного качества обработки в Опытном Конструкторском бюро шлифовальных станков (ОКБШС) были разработаны алгоритмы управления круглошлифовальными станками, в математическую модель которых закладывались определенные закономерности, по которым корректировались режимы резания при шлифовании. Однако алгоритмы ОКБШС не учитывали характеристику шлифовального круга, установленного на станке. А это, в свою очередь, не позволяет оценить её влияние на состояние рабочей поверхности круга и на выходные параметры процесса. В частности, на шероховатость.

В общем виде уравнение описывающее изменение шероховатости за время работы круга [2] представлено в виде:

$$R_a(\tau) = (R_{анач} - R_{аст})e^{-\lambda\tau} + R_{аст} \cdot e^{-\delta\tau}, \quad (1)$$

где $R_{анач}$ - высота микронеровностей в начале шлифования;

$R_{аст}$ - высота микронеровностей после приработки круга, в начале второго периода его работы;

δ - показатель степени, выражающий рост высоты микронеровностей в следствие затупления круга и вибраций в зоне резания;

λ - показатель степени, выражающий изменение микронеровностей в период приработки круга.

Использование этих данных [2] для расчета шероховатости позволяют проследить изменения R_a на деталях из закаленной стали 45 диаметром 60 мм при обработке кругом Э9А25С1 (рис.2).

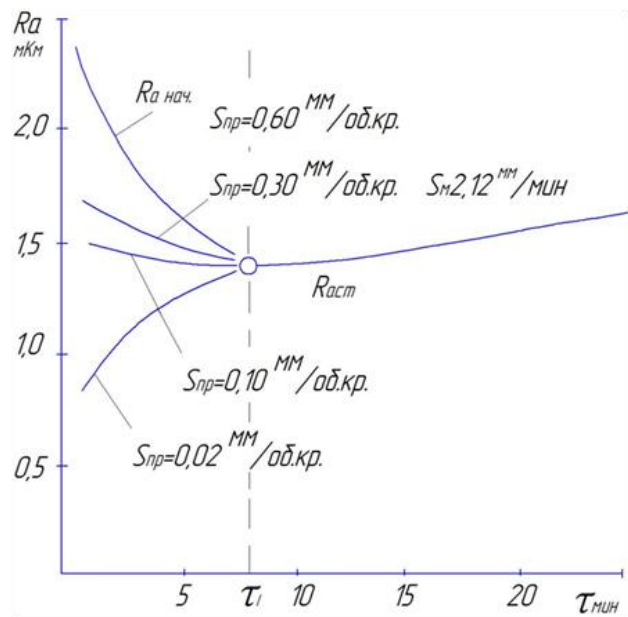


Рис.2 – Зависимость шероховатости от времени шлифов

Из графика видно, что при больших подачах алмаза при правке начальная шероховатость выше $R_{аст}$ и наоборот, при малых подачах правки $R_{анач} < R_{аст}$. Процесс стабилизируется при $\tau_1 = 8$ мин. Зависимость шероховатости и времени τ_1 от врезной подачи представлены на рисунке 3.

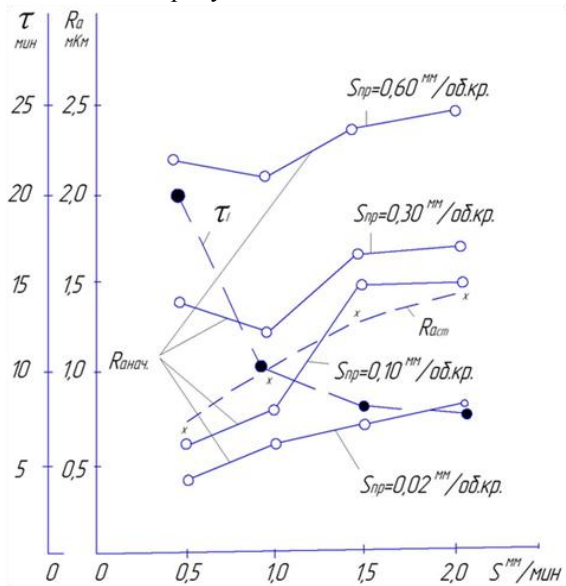


Рис.3 – Зависимость шероховатости и времени стабилизации процесса от врезной подачи

Из графиков видно, что шероховатость поверхности увеличивается с возрастанием интенсивности шлифования (подачи S_m), а время приработки τ_1 , при этом уменьшается. Это можно объяснить увеличением интенсивности износа круга с ростом подачи.

Анализируя графики можно сделать вывод, что для стабилизации процесса режимы правки следует выбирать такими, чтобы шероховатость поверхности в период приработки была близка к $R_{аст}$. В

рассмотренном примере это достигается при $S_{np}=0,08$ мм/об. Шероховатость обработанной поверхности может являться критерием при определении стойкости круга. Так, например, в работе [2] установлено отношение шероховатости в начале обработки к шероховатости в конце периода стойкости круга для стали 45 составляет 1,3.

Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования в настоящее время предварительный расчет высоты микронеровностей затруднен, из-за отсутствия обобщенных расчетных формул учитывающих различные условия шлифования. В отдельных случаях шероховатость поверхности детали может определяться по эмпирическим зависимостям для конкретного случая шлифования.

Основная часть. При анализе процесса шлифования было установлено, что качество обработки на начальном этапе цикла определяется интенсивностью правки. В дальнейшем при чистовых режимах шлифования происходит интенсивное истирание вершин абразивных зерен и переход от начального износа к затуплению, причем интенсивность износа уменьшается по мере увеличения длительности шлифования.

Исследование влияния режимов правки, выполнено по следующей методике. После правки шлифовального круга с подачами от 0,02 до 0,6 мм/на оборот круга выполнялась шлифовка детали со съемом 0,1 мм на диаметр. Контроль поверхности детали позволил определить величину начальной шероховатости. Уровень ее возрастает с увеличением скорости правки. На рисунке 4 показана зависимость Ra_0 от подачи при правке для незакаленной стали 45. При обработке кругом 91А, из графиков видно, что увеличение Ra_0 происходит при возрастании врезной подачи. Аналогичные зависимости получены при обработке закаленных сталей 45 и ШХ-15, для шлифования кругами 91А и 24А.

Эти данные представлены на графиках зависимости шероховатости от времени обработки. Установлено, что уровень шероховатости при одинаковых условиях обработки для кругов 91А был выше, чем 24А.

При дальнейшей работе круга шероховатость постепенно приближалась к установившемуся значению. Эта закономерность хорошо прослеживается при малых врезных подачах. Следовательно, для стабилизации шероховатости поверхности детали за период стойкости круга необходимо подачу правки принимать такой, чтобы начальная шероховатость была такой же, как шероховатость установившегося процесса обработки.

Повышение производительности шлифования связано с увеличением интенсивности обработки на черновом этапе. Без правки в цикле обработки черновая подача должна выбираться такой, чтобы шлифование протекало с гарантированным сохранением профиля круга, обеспечивающим в процессе последующей обработки заданный чертежом уровень шероховатости..

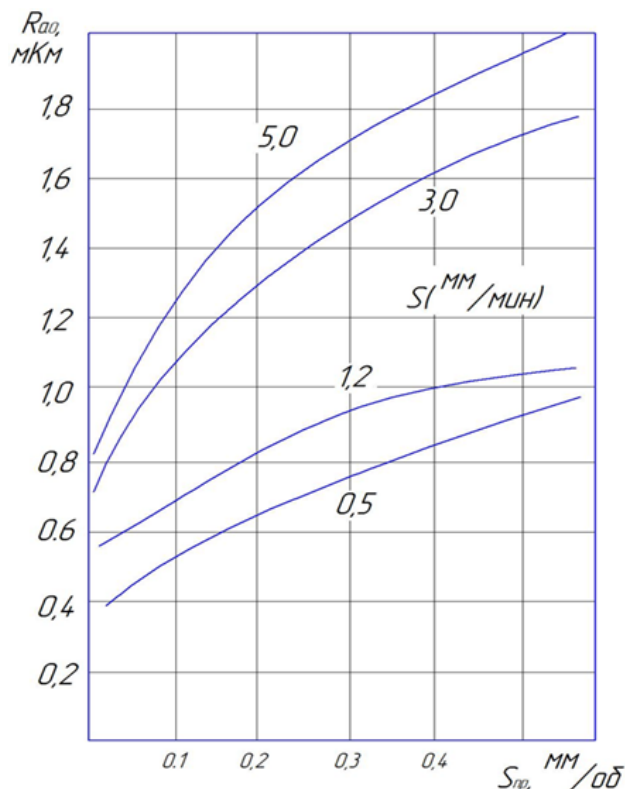


Рис.4 – Зависимость начальной шероховатости от подачи правки при обработке стали 45 (НЗК) кругом 91А

Взаимосвязь влияющих параметров показана на рисунке 5.

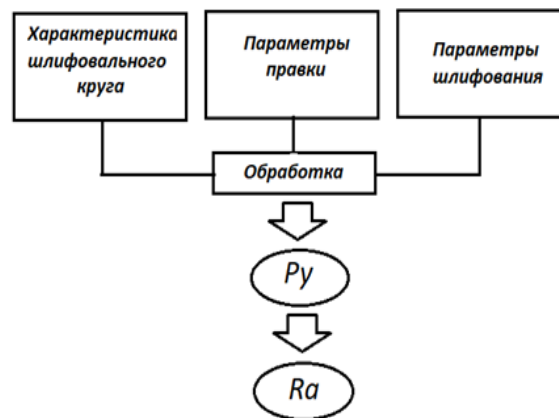


Рис.5 – Структура получения заданной шероховатости

При этом, нами предлагается, удельную силу резания для получения шероховатости определять по формуле:

$$P_y = K_{кр} \cdot C_u \cdot Ra, \quad (2)$$

где C_u - коэффициент, учитывающий структуру цикла, этап шлифования и уровень достижимой шероховатости поверхности,

$K_{кр}$ - коэффициент, учитывающий характеристику шлифовального круга и условия обработки.

Сопоставление ряда стойкостных зависимостей, влияния продолжительности шлифования с учетом затупления круга на шероховатость поверхности и сравнение этих данных с результатами проведенных нами экспериментальных проверок позволяют выполнить корректировку силовых зависимостей, используемых в алгоритмах выбора режимов шлифования.

Коэффициент $K_{кр}$ предлагается определять по формуле:

$$K_{кр} = K_A \cdot K_{ТВ} \cdot K_Z \cdot K_{CB} \cdot K_D \cdot K_V \cdot K_{ТО} \cdot K_{\phi}, \quad (3)$$

где отдельные составляющие учитывают влияние абразивного материала (K_A), твердости шлифовального круга ($K_{ТВ}$), зернистости (K_Z), связки круга (K_{CB}), диаметра шлифовального круга (K_D),

скорости круга (K_V), качества точности обрабатываемой детали ($K_{ТО}$), форму поверхности детали (K_{ϕ}).

На основании экспериментальных данных нами выполнены обобщения и получены расчетные зависимости вышеперечисленных коэффициентов.

Для введения в программу расчета были выполнены преобразования, в результате которых на основании графиков и использования кодирования параметров кругов были получены расчетные формулы для определения коэффициентов K_A , $K_{ТВ}$, K_{CB} , для их дальнейшего использования при расчетах на ЭВМ.

Таблица 1 – Кодирование марки круга

Абразивный материал	14A	24A	25A	33A	44A	91A	92A
Код X_1	0	1	2	3	4	5	6

Таблица 2 – Код твердости круга

Твердость Ш.К.	M3	CM1	CM2	C1	C2	CT1	CT2	CT3
Код X_2	0	1	2	3	4	5	6	7

Таблица 3 – Кодирование связки круга

Связка	Керамическая	Вулканиковая	Бакелитовая
Код X_3	0	1	2

Расчетная зависимость для K_A :

$$K_A = 1.05 - 0.01 \cdot (X_1 - 3)^2. \quad (4)$$

Кодирование твердости круга выполнялось по таблице 2

Расчетная зависимость для $K_{ТВ}$:

$$K_{ТВ} = 0.8 + 0.05 \cdot X_2. \quad (5)$$

При определении влияния зернистости (Z) использовали её величину

$$K_Z = 1.55 - 0.02 \cdot Z, \quad (6)$$

где Z – параметр зернистости (...16, 25, 40...)

Используемые в алгоритме зависимости соответствуют обработке шлифовальным кругом на керамической связке, т.е. $K_{CB} = 1$.

При установке на станке кругов с другой связкой следует внести поправку, величина которой определяется коэффициентом K_{CB} :

$$K_{CB} = 1 + 0.2 \cdot X_3, \quad (7)$$

где X_3 – код связки, определяемый по таблице 3.

Влияние диаметра шлифовального круга $D_{кр}$ и его скорости $V_{кр}$ учитывается коэффициентами:

$$K_D = 0.0025 \cdot D_{кр}, \quad (8)$$

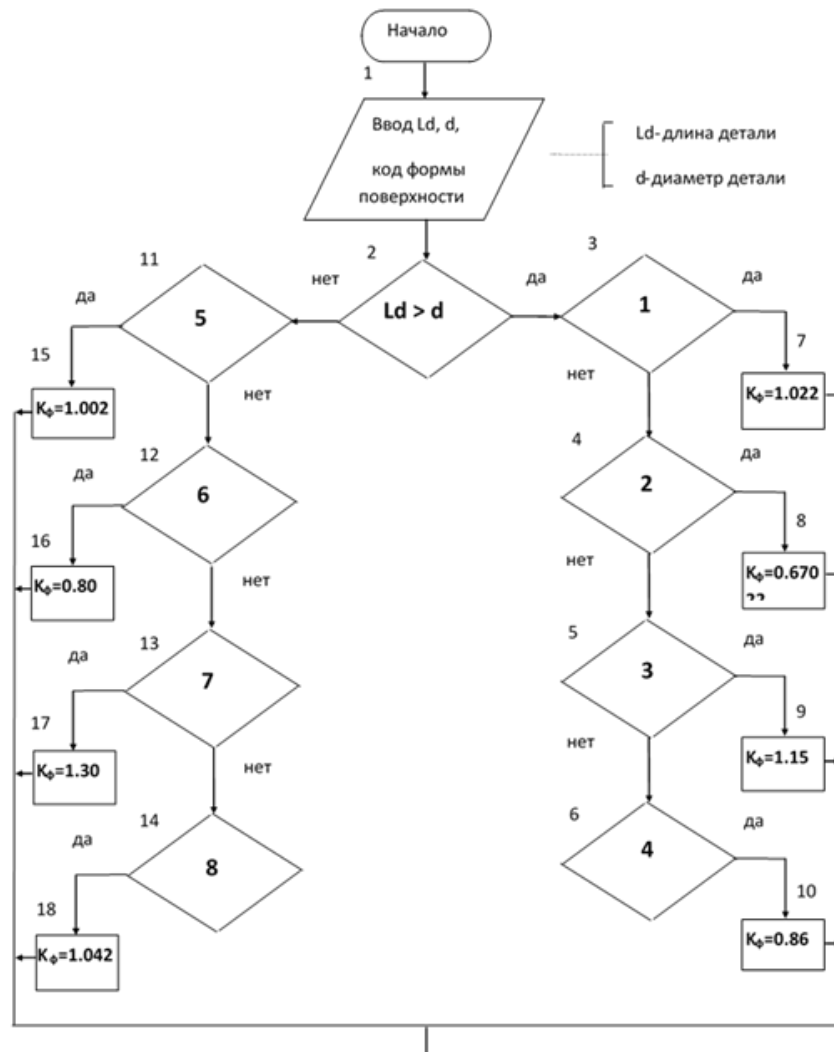
$$K_V = 0.37 \cdot V_{кр}^{0.23}. \quad (9)$$

Интенсивность износа шлифовального круга оказывает влияние на точность получаемой поверхности. В пределах точности, обеспечиваемой шлифованием (5-7 квалитет) поправочный коэффициент определяется зависимостью:

$$K_{ТО} = 0.19 \cdot H, \quad (10)$$

где H – квалитет детали.

Коэффициент учитывающий K_{ϕ} влияние формы поверхности детали выбирается по алгоритму рис.4. На рис.4 **1, 5** – код гладкой поверхности с канавкой у прилегающего бурта, **2, 6** – код гладкой поверхности с галтелью у прилегающего бурта, **3, 7** – код шлицевой поверхности с канавкой у прилегающего бурта, **4, 8** – код шлицевой поверхности с галтелью у прилегающего бурта. Для кодов **1-4** $Ld > d$, **5-8** $Ld \leq d$ (Рис.6).

Рис.6 – Алгоритм выбора коэффициента K_{ϕ} , учитывающего форму детали

Для примера выполним расчет коэффициента $K_{кр}$ для круга 25A25CM17K6 диаметром 600 мм при шлифовании гладкой поверхности детали при соотношении диаметра к длине <7 пятого квалитета точности:

$$K_{кр} = K_A \cdot K_{ТВ} \cdot K_Z \cdot K_{CB} \cdot K_D \cdot K_V \cdot K_{ТО} \cdot K_{\phi} = 1.04 \cdot 0.85 \cdot 1.05 \cdot 1 \cdot 1.5 \cdot 0.9 \cdot 0.95 \cdot 1 = 1.19.$$

Предельное значение удельной силы резания ограничено переходом к режиму полного самозатачивания и осыпания, при котором изменяется рельеф рабочей поверхности шлифовального круга.

Методика определения шероховатости в двухступенчатом цикле шлифования включала в себя измерение поверхности детали после черновой обработки, с врезными подачами от 0,4 до 5,0 мм/мин и после чистового шлифования изношенным кругом с врезной подачей 0,1 мм/мин. Результаты исследований приведены на графиках.

При обработке с врезной подачей 0,4 мм/мин шероховатость поверхностей обработанных кругом 91А была выше, чем для круга 24А (рис.7,8,9). После приработки круга шероховатость поверхности стабилизировалась. В дальнейшем намечалось постепенное возрастание шероховатости. Переход к чистовому шлифованию позволил снизить высоту

микронеровностей поверхности детали. Во всех случаях шероховатость после чистового этапа находилась в пределах 0,4-0,5 мкм.

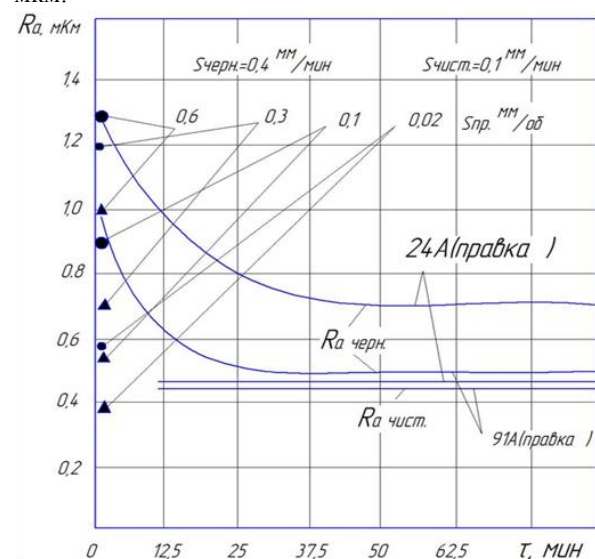


Рис.7 – Зависимость шероховатости поверхности от времени при обработке стали 45

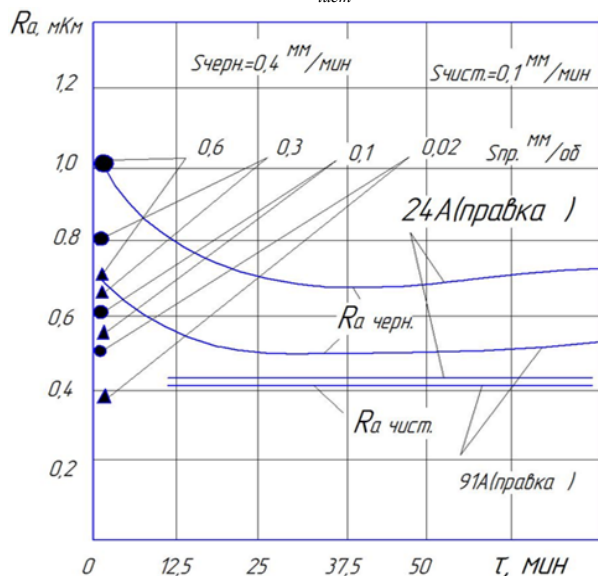
(НЗК) после черного Ra и после чистового этапа $Ra_{\text{чист}}$ 

Рис.8 – Зависимость шероховатости поверхности от времени при обработке стали 45 (ЗК) после черного Ra и после чистового этапа $Ra_{\text{чист}}$

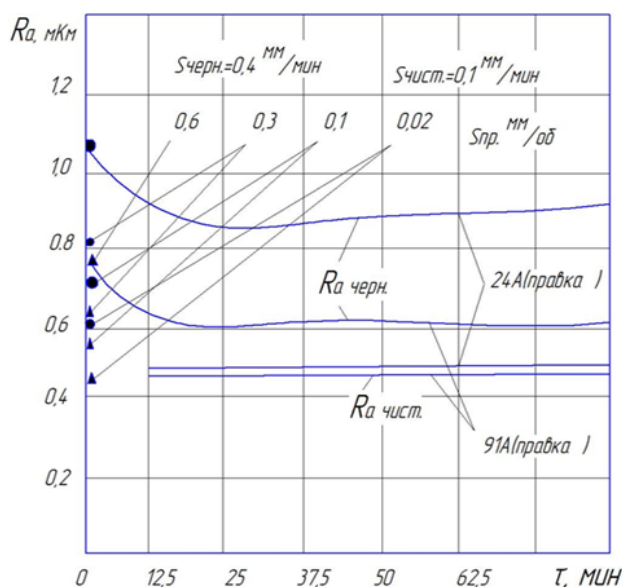


Рис.9 – Зависимость шероховатости поверхности от времени при обработке ШХ-15 (ЗК) после черного Ra и чистового этапа $Ra_{\text{чист}}$

При шлифовании с подачами 1,2 мм/мин шероховатость поверхностей обработанных кругами 91А выше чем 24А (рис.8,9). Причем интенсивность возрастания для кругов 91А выше. Так при шлифовании стали ШХ-15 на 17 минуте наблюдается резкое увеличение шероховатости.

Установлено, что характер износа аналогичен характеру изменения шероховатости при работе круга после правки. Начальная шероховатость зависит от интенсивности съема металла и от режимов правки. Со временем влияние правки постепенно уменьшается и при стабилизации износа шлифовального круга шероховатость поверхности детали в основном определяется режимами шлифования. На рисунке 1 приведен пример

изменения шероховатости на начальном этапе обработки.

В общем случае можно сделать выводы, что для стабильного процесса шлифования режимы правки должны обеспечивать уровень шероховатости достижимый при выбранной интенсивности шлифования.

Возможно также использование начального периода шлифования после правки. При этом (при $\tau \leq \tau_{\text{стаб}}$) шероховатость готовой детали в большей степени определяется режимами правки. Например, при правке круга в цикле, после черного съема металла, можно ожидать получения шероховатости, соответствующей режиму правки.

Установлено, что шероховатость поверхности увеличивается с возрастанием интенсивности шлифования (подачи S_M), а время приработки τ_1 , при этом уменьшается. Это можно объяснить увеличением интенсивности износа круга с ростом подачи.

Анализируя графики можно сделать вывод, что для стабилизации процесса режимы правки следует выбирать такими, чтобы шероховатость поверхности в период приработки была близка к $R_{\text{аст}}$. В рассмотренном примере это достигается при $S_{\text{пр}} = 0,08$ мм/об. Шероховатость обработанной поверхности может являться критерием при определении стойкости круга. Так, например, в работе [2] установлено, что отношение шероховатости в начале обработки к шероховатости в конце периода стойкости круга для стали 45 составляет 1,3.

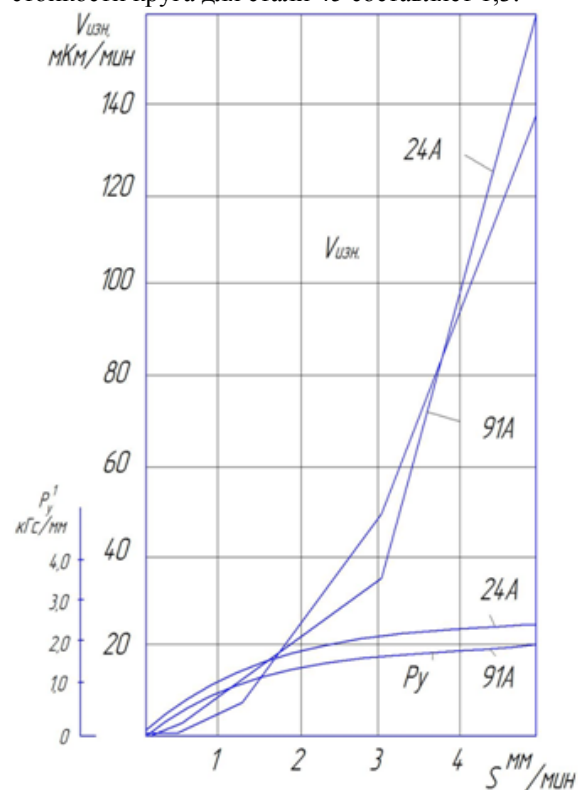


Рис.10 – Влияние врезной подачи на износ круга 25А25СМ17К6 при обработке стали 45 (ЗК)

Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования в настоящее время предварительный расчет высоты микронеровностей затруднен, из-за отсутствия обобщенных расчетных формул учитывающих различные условия шлифования. В отдельных случаях шероховатость поверхности детали может определяться по эмпирическим зависимостям для конкретного случая шлифования.

На рис.10 показаны графики зависимости изменения износа круга 25A25CM17K6 во времени при обработке стали 45 (ЗК). На этом же графике показано изменение удельной силы резания P_y .

Анализ зависимостей показывает, что с увеличением интенсивности износа ($P_y > 16$ Н/мм) замедляется возрастание силы резания, при этом происходит интенсивное самозатачивание зерен шлифовального круга. Следовательно, до $P_y = 16$ Н/мм возможно гарантированное получение шероховатости поверхности в зависимости от условий определяемых по формуле (2). Далее происходит интенсивный износ (осыпание) круга, поэтому на данном участке не возможно гарантировать получение требуемой шероховатости. Незначительный износ, характеризующийся пологим участком кривой $V_{изн}$ сохраняется до $P_y \approx 12$ Н/мм.

Вывод: Выполнены обобщения и кодировка расчетных зависимостей, с помощью которых в технологический алгоритм были внесены ряд параметров шлифовального круга и условий обработки. Это позволило определить допустимый уровень радиальной составляющей усилия резания при получении заданной шероховатости. Проведенные эксперименты подтвердили правильность сделанных вначале посылок о характере взаимосвязи усилий шлифования с изменением рабочего профиля шлифовального круга и шероховатостью обработанной поверхности.

Список литературы:

1. Якимов А. В. *Оптимизация процесса шлифования*. – Москва: Машиностроение, 1975. – 176 с.

2. Филимонов Л.Н. *Стойкость шлифовальных кругов*. – Ленинград: Машиностроение, 1973. – 134 с.
3. Корчак С.Н. *Производительность процесса шлифования стальных деталей*. – Москва: Машиностроение, 1974. – 280 с.
4. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г. В., Серов Б. С., Якимов А.А. *Теоретические основы резания и шлифования материалов* : учебное пособие. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
5. Кремень З.И. *Технология шлифования в машиностроении* / В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин. – Санкт-Петербург: Политехника, 2007. – 425 с.
6. Старков В.К. *Шлифование высокопористыми кругами*. – Москва: Машиностроение, 2007. – 688 с.
7. Стратиевский И. Х. *Абразивная обработка* : справочник / В. Г. Юрьев, Ю. Н. Зубарев. – Москва: Машиностроение, 2010 – 352 с.
8. Malkin S., Guo C., *Grinding technology: Theory and applications of machining with abrasives* New York: Industrial Press 2008.

References (transliterated)

1. Yakimov A. V. *Optimizatsiya protsessa shlifovaniya* [Grinding process optimization]. – Moscow: Mechanical Engineering, 1975. – 176 p.
2. Filimov L.N. *Stoykost' shlifoval'nykh krugov* [Resistance of grinding wheels]. – Leningrad: Mechanical Engineering, 1973. – 134 p.
3. Korchak S.N. *Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniya stal'nykh detaley* [Grinding performance of steel parts]. – Moscow: Mechanical Engineering, 1974. – 280 p.
4. Yakimov A.V., Novikov F. V., Novikov G. V., Serov B. S. and Yakimov A.A. *Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov* : *uchebnoye posobiye* [Theoretical Foundations of Cutting and Grinding of Materials: study guide]. – Odessa : OGPU, 1999. – 450 s.
5. Kremen' Z.I., Jur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tehnologiya shlifovaniya v mashinostroyenii* [Grinding technology in mechanical engineering]. – Sankt-Peterburg: Politehnika, 2007. – 425 s.
6. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Grinding with highly porous circles]. – Moscow: Mechanical Engineering, 2007. – 688 p.
7. Stratievskij I.X., Jur'ev V.G., Zubarev Ju.N. *Abrazivnaya obrabotka: spravochnik* [Abrasive handling: the quick reference]. – Moscow: Mechanical Engineering, 2010. – 352 p.
8. Malkin S., Guo C., *Grinding technology: Theory and applications of machining with abrasives* New York: Industrial Press 2008.

Поступила (received) 21.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Фесенко Анатолій Володимирович (Fesenko Anatoly Vladimirovich) – кандидат технічних наук, професор, кафедри технології машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: +38-067-577-28-87; e-mail: anfesenko73@gmail.com

Ушаков Олександр Миколайович (Uschakov Alexander Nikolaevich) – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: +38-097-882-22-11; e-mail: parom38@yandex.ua

Євсюкова Фатіма Магомедбіївна (Evsyukova Fatima Magomedbievna) – доцент кафедри технології машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: +38-097-941-22-99; e-mail: fatimaevsyukova@gmail.com

Сліпченко Сергій Євгенович (Slipchenko Sergey Evgenievich) – старший викладач кафедри технології машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: +38-063-851-47-14; e-mail: serg.slip@gmail.com

БЕРЕЗУЦКИЙ В. В., ХОНДАК И. И., БЕРЕЗУЦКАЯ Н. Л., ХАЛИЛЬ В. В.

АНАЛИЗ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ СВАРКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ С ОСНОВНЫМ ТИПОМ ПОКРЫТИЯ

В статье приведен анализ вентиляции на участке сварки. Исследованы изменения концентраций угарного газа и сварочного аэрозоля, которые образуются при ручной электродуговой сварке и использовании электродов с основным типом покрытия (УОНИ-13-45). Установлен характер распространения опасных газов и пыли в рабочей зоне, что увеличивает риск попадания их в зону дыхания сварщика и может быть причиной заболеваний. Проведено исследование изменения концентрации сварочного аэрозоля при сварке электродами с основным типом покрытия на различных расстояниях от источника образования, в том числе и непосредственно у органов дыхания сварщика, полученная зависимость представляет собой кривую, которая монотонно убывает и асимптотически стремится к нулю при увеличении расстояния от источника. Рассмотрена необходимость проведения подготовки к процессу сварки и выбор электродов с меньшим количеством загрязняющих выбросов сварочного аэрозоля в воздух рабочей зоны. Проведена оценка эффективности вытяжной вентиляции на участке сварки на соответствие требованиям нормативных документов и сделаны выводы, что использование только вытяжной вентиляции без приточно-вытяжной не может обеспечить допустимый уровень загрязнений в рабочей зоне сварки и в помещении.

Ключевые слова: сварка, электроды, монооксид углерода, сварочный аэрозоль, вентиляция.

В. В. БЕРЕЗУЦКИЙ, І. І. ХОНДАК, Н. Л. БЕРЕЗУЦЬКА, В. В. ХАЛІЛЬ

АНАЛІЗ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПРИ ЗВАРЮВАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОДІВ З ОСНОВНИМ ТИПОМ ПОКРИТТЯ

В статті наведено аналіз вентиляції на ділянці зварювання. Досліджено зміни концентрацій чадного газу та зварювального аерозолю, які утворюються при ручному электродуговому зварюванні та використанні електродів з основним типом покриття (УОНИ-13-45). Встановлено характер розповсюдження небезпечних газів та пилу у робочій зоні, що збільшує ризик потрапляння їх у зону дихання зварювальника та може бути причиною захворювань. Проведено дослідження зміни концентрації зварювального аерозолю при зварюванні електродами з основним типом покриття на різних відстанях від джерела утворення, в тому числі і безпосередньо біля органів дихання зварювальника, отримана залежність являє собою криву, яка монотонно спадає і асимптотично прагне до нуля при збільшенні відстані від джерела. Розглянуто необхідність проведення підготовки до процесу зварювання та вибір електродів з меншою кількістю забруднюючих викидів ЗА у повітря робочої зони. Проведено оцінку ефективності витяжної вентиляції на ділянці зварювання на відповідність вимогам нормативних документів і зроблені висновки, що використання тільки витяжної вентиляції без припливно-витяжної не може забезпечити припустимий рівень забруднень у робочій зоні зварювання та у приміщенні.

Ключові слова: зварювання, електроди, монооксид вуглецю, зварювальний аерозоль, вентиляція.

V. BEREZUCKYI, I. HONDAK, N. BEREZUTSKA, V. KHALIL

ANALYSIS OF VENTILATION DURING WELDING USING ELECTRODES WITH THE BASIC COATING TYPE

The article provides an analysis of ventilation for welding areas. Changes of concentrations of carbon monoxide and welding aerosol which are formed during manual arc welding and use of electrodes with the main type of coating (UONI-13-45), are investigated. The nature of the spread of hazardous gases and dust in the work area has been established, which increases the risk of them entering the welding zone of the welder and may cause disease. A study was made of the change in the concentration of the welding aerosol when welding with electrodes with the main type of coating at various distances from the source of formation, including directly near the welder's respiratory organs, the obtained dependence is a curve that decreases monotonically and asymptotically tends to zero with increasing distance from the source. The necessity of preparing for the welding process and the selection of electrodes with less polluting emissions of welding aerosol into the air of the working zone are considered. The effectiveness of exhaust ventilation in the welding area was assessed for compliance with the requirements of regulatory documents and it was concluded that using only exhaust ventilation without supply and exhaust cannot provide an acceptable level of pollution in the welding working area and in the room.

Keywords: welding, electrodes, carbon monoxide, welding aerosol, ventilation.

Вступ. Робоче місце зварювальника вважається, мабуть, одним з найбільш несприятливих місць для робочої діяльності людини з огляду на те, що під час технологічного процесу викидається значна кількість шкідливих речовин, а саме пил, дим, газу, частинки розплавленого металу тощо. Під час шліфувальних і зачищувальних робіт та газової різки металів у повітря виробничого середовища виділяється пил, який містить з'єднання марганцю, міді, заліза, цинку, свинцю [1,2].

Біологічні властивості електрозварювального пилу повно і добре описані в роботі [3], в якій аналізуються три основних гігієнічних показника шкідливості пилу: розчинність, затримка при диханні легеневою тканиною і фагоцитоз [4].

При зварюванні виділяється дим, який складається з суміші дуже дрібних частинок і газів.

Більшість компонентів диму, які виділяються

при зварюванні: хром, нікель, миш'як, азбест, марганець, кремній, берилій, кадмій, оксиди азоту,

хлороокіс вуглецю, акролеїн, сполуки фтору, оксид вуглецю, кобальт, мідь, свинець, озон, селен, і цинк можуть бути надзвичайно токсичні і провокувати розвиток небезпечних «професійних» захворювань і несучих шкоду навколишньому середовищу. На теперішній час основним напрямом регулювання параметрів повітря при зварюванні, залишається вентиляція, тому актуальним питанням є аналіз ефективності організації вентиляції у зварювального цеху.

Одними з основних завдань вентиляції є:

- забезпечення подачі чистого повітря із зовні, без змін його складу і параметрів, безпосередньо в робочу зону;

- з погляду розміщення джерел шкідливих виділень у приміщенні, припливне повітря належить

розподіляти в такий спосіб, аби шкідливі речовини якомога швидше покинули робочу зону і рухаючись, попадали в отвори систем витяжної вентиляції [5].

На ділянки зварювання при проектуванні системи вентиляції обов'язково враховують ступінь очищення повітряних мас і безперерйність процесу вентиляції. Для цього окрім основної вентиляційної системи встановлюють аварійну вентиляцію.

За допомогою вентиляції відбувається:

- мінімізація концентрації шкідливих речовин, які виділяються під час зварювальних робіт (місцева вентиляція);

- забезпечуються мікрокліматичні показники згідно нормативних документів;

- вилучаються забруднення із приміщення;

- забезпечується приплив чистого від забруднень повітря.

Мета роботи: оцінити ефективність витяжної вентиляції на ділянці зварювання на відповідність вимогам нормативних документів.

Основна частина. Практика показує, що вентиляція (витяжні пристрої, аспіраційні горілки, захисні дихальні маски) в сукупності з комплексом заходів технологічного і організаційного характеру дозволяє знизити концентрацію шкідливих речовин до граничнодопустимих концентрацій (ГДК) і сприяє значному оздоровленню умов праці робітників в зварювальних цехах. Між цим не дивлячись на значний розвиток сучасних технологій, процес зварювання з точки зору скорочення викидів шкідливих речовин диму, в теперішній час є не удосконаленим [6].

Одним із сучасних напрямів зниження викидів є дослідження широко розвиваючих і впроваджених в виробництво процесів зварювання нестационарною імпульсною дугою, які відрізняються тим, що виробляють менш викидів [7]. Але основним і найбільш ефективним засобом боротьби з забрудненням при процесі зварювання залишається вентиляція [13].

Один з найбільш важливих моментів, якому приділяється підвищена увага при організації вентиляції в цеху або ділянці зварювання - спорудження якісних приладів для місцевого відведення всіх шкідливих речовин, що виділяються в процесі зварювання. Якісна витяжка для зварювального поста - це не просто турбота про здоров'я співробітника, але і зменшення шкоди для навколишнього середовища. Чим краще організована вентиляція зварювального столу і добре відгороджене місце зварювання - тим менше шкідливих речовин потраплять в атмосферу приміщення.

На практиці, місцеві відсмоктувачі здатні вловити і поглинути до 2/3 обсягу всіх отруйних речовин, що викидаються в повітря робочої зони для видалення решти, тобто 1/3 використовують припливно-витяжну систему вентиляції приміщення де відбувається процес зварювання [8].

Вентиляція зварювального поста в обов'язковому порядку повинна бути обладнана потужними витяжними системами, з розрахунку розподілу

потужності за такою схемою: 25% спрямовані на верхній ярус виробничого цеху, 75% - на нижній [8].

Устаткування робочих зварювальних постів локальною системою відведення ефективно лише в тому випадку, коли мова йде про стаціонарні столи.

Загальний фон у вентиляованих цехах, як правило, не перевищує рівня ГДК. Але в зоні дихання зварювальника, що виконує ручні операції, зміст шкідливих компонентів зварювального аерозолі значно (у 7-10 разів) перевищує як фон, так і ГДК [9].

Дослідження. Для перевірки ефективності роботи витяжної вентиляції експеримент проводився на ділянці зварювання, яка є ізольованим приміщенням площею 240 (15×16) м², висота приміщення – 6 м. У приміщенні встановлена система витяжної вентиляції. Дослідження спрямовані на визначення ефективності вентиляції в процесі зварювання, при використанні електродів з основним типом покриття, на утворення шкідливих речовин на робочому місці зварювальника та в приміщенні ділянки. Дослідження проводились в наступних умовах:

- 1) відносна вологість повітря 50-60%;
- 2) температура повітря в ділянці 19,5 °С;
- 3) атмосферний тиск 101325 Па;
- 4) швидкість руху повітря в приміщенні становить не більше 0,1 м/с;

Найбільш простим і надійним методом визначення масової концентрації пилу є ваговий метод. Метод полягає у затримці пилу на фільтрі при протяжці через нього певного об'єму запиленого повітря (рис.1).

Перед початком зварювання було визначено місце розташування зварювальника, на одному із 5 спроектованих зварювальних постів (рис.2)

Для прямого (вагового) [10] визначення концентрації пилу було використано наступне обладнання: зварювальний апарат, пило-відсмоктувач, алонж, аналітичні аерозольні фільтри АФА-ВП-20 зі ступенем затримки аерозольних часток не менше 95% (рис.1), а також терези лабораторні, секундомір.

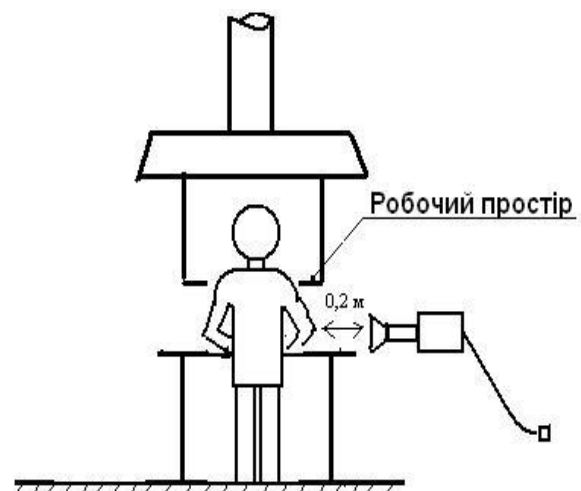


Рис.1 - Робоче місце зварювальника при проведенні експерименту

На рис.2 наведений план ділянки зварювання.

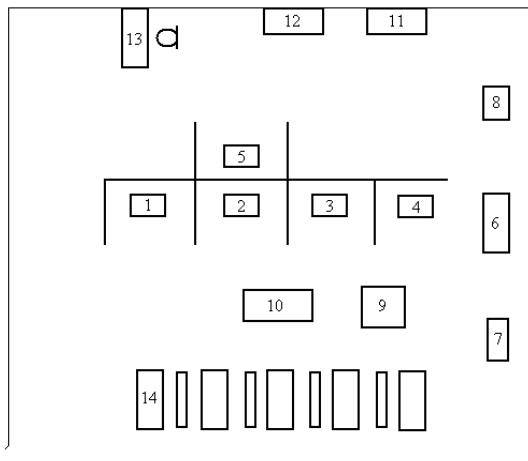


Рис.2 - План-схема ділянки зварювання
(1-5 місця для електродугового зварювання;
6-місце автоматичного зварювання;
7-місце контактного зварювання;
8-свердлильний верстат; 9-фрезерний верстат;
10 заточувальний верстат; 11 шліфувальний верстат;
12 шафа з інструментами; 13-робоче місце з ПК;
14 письмові столи (5 шт))

В Україні вимірювання концентрації пилу регламентовано методичними рекомендаціями Міністерства охорони здоров'я України [10]. Згідно цих рекомендацій, концентрацію пилу вимірюють у зоні дихання або на відстані від неї не більш ніж 1-1,5 м і на висоті 1,8 м від підлоги. Якщо робоче місце не фіксоване, вимірювання концентрації пилу проводять у точках робочої зони, в яких працівник перебуває більш ніж 50% часу зміни.

Елементами, що зварювались, були зразки металу із сталі ВСТЗСП, товщиною 8 мм. У вітчизняній і зарубіжній практиці ручного дугового зварювання використовуються електроди з різними видами покриття: кислі, рутилові, целюлозні, основні (фтористо-кальцієві); а також змішані види покриття: рутилово-кислі (ільменітові), рутил-целюлозні, рутил-основні. На практиці одні з найбільш використовуваних електродів є електроди з основним видом покриття, тому зварювання виконували електродами УОНИ-13-45 із основним покриттям, діаметром електродів 3 мм. Сила електричного струму зварювання (І зварки) становила 200 А. Вибір режиму зварки та характеристика джерела живлення електричним струмом, вказують на формування зварювального аерозолі та наявність його негативного впливу на працівників у ділянки. Оцінка емісій зварювальних аерозолів (ЗА) на наявність та виміри концентрацій монооксиду вуглецю виконувались при ручному дуговому зварюванні в зоні зварювання під витяжним зонтом.

На робочому місці зварника витяжна вентиляція у формі зонти розміром 0,82 x 0,40 (м²) в якому 8 отворів у формі рівносторонніх трикутників, розміром 0,05 x 0,2 x 0,2 (м³). Швидкість руху повітря біля входу в отвори 1,3 -1,6 (м/с).

На робочому місці на відстані 20 см від отворів швидкість руху повітря складає 0,2 м/с, а в області проведення зварювальних робіт на відстані 0,5 м (рис.3) швидкість руху повітря становить 0,05-0,1 м/с. Відповідно до [11] при зварювальних роботах в ділянки допустимий показник швидкості руху повітря в області проведення зварювальних робіт варіюється від 0,4 до 1,0 (м/с). Тому можна зробити висновок, що витяжна вентиляція на ділянки працює не достатньо ефективно, бо шкідливі речовини із робочої зони, видаляються зі швидкістю, яка не відповідає нормативній.



Рис.3 - Витяжна вентиляція (зонти) на робочому місці зварювальника

На інших робочих місцях (4 стаціонарних робочих місць) витяжна вентиляція виглядає у формі зонти розміром 0,4 x 0,82 (м²) з 12 вирізами у формі рівностороннього трикутника, розміром 0,035 x 0,2 x 0,2 (м³). Швидкість руху повітря біля входу в отвори дорівнює 1,6-1,9 (м/с). На робочому місці на відстані 0,5 м від отворів швидкість руху повітря складає 0,2-0,3 м/с, що також нижче норми.

За висновками експерименту табл.1 щодо дослідження концентрації чадного газу, можна сказати що витяжна вентиляція також не ефективна.

Таблиця 1 - Результати досліджень по СО з основними електродами

№ досліджень	Натуральні значення		Концентрація СО, мг/м ³
	I, А	t, c	
1	200	300	98
2	100	300	86
3	200	60	67
4	100	60	50,1
5	150	180	106,2

Зростання концентрації чадного газу залежно від сили струму і тривалості зварювання для електродів з основним типом покриття представлено на рис.4.

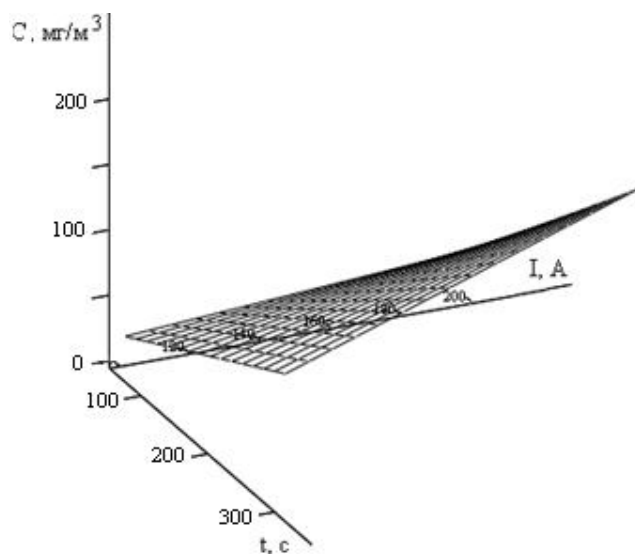
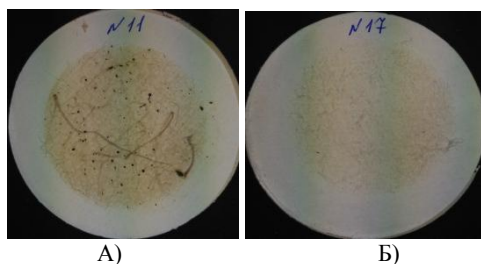


Рис. 4 - Залежність концентрації чадного газу від величини струму I і тривалості зварювання t для електроду з основним типом покриття.

Дослідження концентрації зварювального аерозолі, який виділявся від електродів з основним типом покриття, проводилось на відстані 0,2 м, 0,5 м, 1,0 м, при струмі 200 А і часі 180 с. Результати досліджень занесені в табл.2

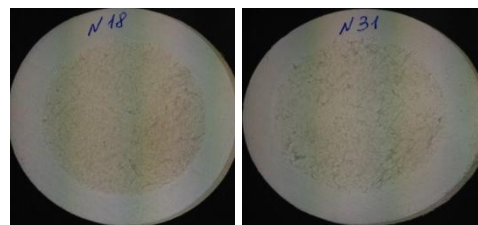
Таблиця 2 - Результати досліджень концентрації зварювального аерозолі

№ дослідження	Відстань, м	I, A	t, c	Концентрація зварювального аерозолі, mg/m^3
1(зразок № 11)	0,2	200	180	2,0
2 (зразок №17)	0,5	200	180	1,2
3 (зразок №18)	1,0	200	180	0,5
4 (зразок №31)	біля рота зварювальника	200	180	0,2



A)

B)



B)

Г)

Рис.5 - Зразки, які отримано при зварюванні основними електродами з витяжною вентиляцією струм 200 А, час 180 с: №А на відстані від місця зварювання 0,2 м, Б) - 0,5 м, В) -1,0 м, Г) – у зоні дихання зварювальника.

На рис.5 показані зразки фільтрів з уловленим зварювальним аерозолем при зварюванні електродами з основним типом покриття на різних відстанях:

- зразок № А отриманий при зварюванні основними електродами з витяжною вентиляцією струм 200 А, час 180 с, на відстані 0,2 м від місця зварювання.

- зразок № Б отриманий при зварюванні основними електродами з витяжною вентиляцією струм 200 А, час 180 с, на відстані 0,5 м від місця зварювання.

- зразок № В при зварюванні основними електродами з витяжною вентиляцією струм 200 А, час 180 с, на відстані 1,0 м від місця зварювання.

- зразок № Г отриманий при зварюванні електродами з основним типом покриття з використанням витяжної вентиляції при струмі 200 А, 180 с, безпосередньо біля органів дихання зварювальника

Згідно з експериментальними даними, наведеними в табл. 2, концентрація зварювального аерозолі зменшується при збільшенні відстані від джерела. Це дозволяє припустити, що математична модель залежності концентрації аерозолі від відстані до джерела може бути представлена поліномом другого ступеня:

$$C(L) = a + L \cdot b + L^2 \cdot k, \quad (1)$$

де C - концентрація аерозолі, mg / m^3 ; L - відстань до джерела, м; a, b, k - невідомі коефіцієнти.

В результаті експерименту отримано три точки з координатами (0,2; 2,0), (0,5; 1,2), (1,0; 0,5). Математичну модель розраховано за допомогою універсального методу (інтерполяція, точна в вузлах) [14]. Складемо таку систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} 2,0 = a + 0,2b + 0,2^2 k \\ 1,2 = a + 0,5b + 0,5^2 k \\ 0,5 = a + 1,0b + 1,0^2 k. \end{cases} \quad (2)$$

Рішення системи рівнянь (2) методом Гаусса дає наступні результати:

$a=2,7$; $b=3,8$; $k=1,6$. Підставивши отримані значення в рівняння (1), отримаємо математичну модель:

$$C(L) = 2,7 - 3,8L + 1,6L^2, \quad (3)$$

за умови:

$$0,2 \leq L \leq 1. \quad (4)$$

Графік функції (3), побудований в середовищі Mathcad, показан на рис. 6

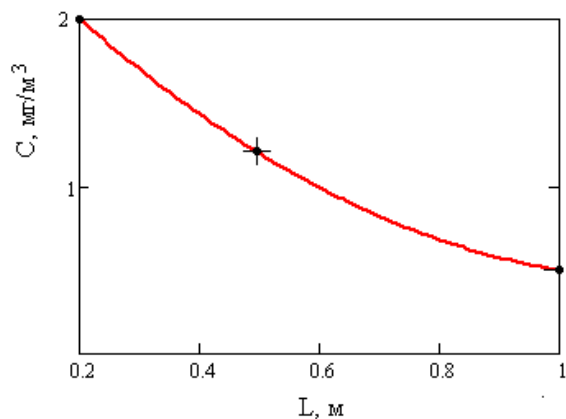


Рис. 6 - Залежність концентрації зварювального аерозолі від відстані до джерела

Отримана залежність являє собою криву, яка монотонно спадає і асимптотично прагне до нуля. Всі три точки, координати яких визначені експериментально, збігаються з побудованою кривою.

У першому наближенні адекватність отриманого результату можна пояснити наступним чином. Аерозольні частинки в процесі зварювання розсіюються в верхню півсферу над робочим столом. За умови того, що джерело і середовище ізотропні, поверхнева щільність частинок на умовній півсфері обернено пропорційна квадрату її радіуса. Цим пояснюється нелінійність кривої.

Подальше підвищення точності моделі повинно бути пов'язане зі збільшенням експериментальних даних. Доцільно використання різних інтерполяційних функцій і методів інтерполяції з подальшою оцінкою точності і вибором найкращого результату [14; 15].

Висновки. Виконані дослідження та отримані результати забрудненості повітря робочої зони чадним газом і зварювальним аерозолем на ділянці зварювання, довели необхідність комплексного рішення щодо їх зниження.

Концентрація зварювального аерозолі зменшується при збільшенні відстані від джерела не лінійно.

Викиди зварювального аерозолі можуть потрапляти у зону дихання не тільки зварювальника, а також оточуючих при відсутності припливно-витяжної вентиляції та не ефективної місцевої витяжної вентиляції;

Використання тільки витяжної вентиляції без припливно-витяжної не може забезпечити припустимий рівень забруднень у робочій зоні зварювання та у приміщенні;

При відсутності припливно-витяжної вентиляції, обов'язково необхідно використовувати індивідуальні засоби захисту та ефективні технічні прилади контролю концентрації чадного газу у зоні дихання працівника;

Необхідно проводити підготовку до процесу зварювання та робити вибір електродів з меншою

кількістю забруднюючих викидів ЗА у повітря робочої зони.

Список літератури:

1. *Березуцький В. В., Хондак І. І.* Зварювання металевих виробів та безпека // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2018.–№ 41 (1317). – С. 91-102.
2. *Демчина М.* Вплив компонентів зварювального аерозолі на здоров'я людини [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://city-adm.lviv.ua/news/society/emergency/233003-vplyv-komponentiv-zvarivvalnoho-aerololu-na-zdorovia-liudyny>. 24.06.2016
3. *Мигай К.В.* Гигиена и безопасность труда при электросварочных работах в судостроении. – Л.: Медицина, 1975. – 74 с.
4. *Солодский С.А., Луговцова Н.Ю., Борисов И.С.* Снижение сварочных аэрозолей при дуговой сварке металлов // International journal of applied and fundamental research №6, 2015
5. *Жуковский С.С.* Эффективность загальнообмінної вентиляції щодо переміщення шкідливих речовин поза межі приміщення // Lviv Polytechnic National University Institutional.2004., С.72-78.
6. *Солодский С.А.* Снижение вредных выделений при дуговой сварке металлов Экология и безопасность в техносфере : современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Юрга, 23-25 ноября 2017. С. 124-126.
7. *Розе С.* Концепции возникновения и сокращения выбросов дыма, выделяющегося при сварке металлов в среде защитного газа с учетом новых вариантов процесса. Сварка и контроль. 2013. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 125 летию изобретения Н.Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом. Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета. г.Пермь.2013.
8. Вентиляция сварочного цеха [Електронний ресурс] // Режим до ступу: <http://www.ads-vent.ru/blog/ventilyaciya-svarochnogo-ceha>
9. *Денисова Н.М.* Шляхи зниження забрудненості повітря робочої зони зварювальних дільниць // Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Серія: Технічні науки. Чернівці: ЧНТУ, 2012. №3 (59).
10. МУ 4436-87 Методичні вказівки Міністерства охорони здоров'я України «Измерение концентрации аэрозолей преимущественно фиброгенного действия» №4436-87.
11. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування
12. *V. Berezutskyi, I. Hondak, N. Berezutska, V. Dmitrik, V. Gorbenko, V. Makarenko* Assessment and prevention of the propagation of carbon monoxide over a working area at arc welding // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/10 (99), 2019, p.38 - 48.
13. *Писаренко В.Л.* Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве / Писаренко В.Л., Рогинский М.Л. М.: Машиностроение. 1981. - 120 с.
14. *Половко А.М.* MATHCAD для студента / А.М. Половко, И.В. Ганичев.-Санкт-Петербург: «БХВ-Петербург», 2006. – 336 с.
15. *Гурский Д.* Вычисления в MATHCAD 12/ Д. Гурский, Е. Турбина. - М.: «Питер», 2006. - 544 с.

Bibliography (transliterated):

1. *Berezutskij V. V., Hondak I. I.* Zvarjuvannja metalievih virobiv ta bezpeka // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "HPI". Ser.: Innovacijni tehnologii ta obladnannja obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii: zb. nauk. pr. – Harkiv : NTU "HPI", 2018.–№ 41 (1317). – С. 91-102.
2. *Demchina M.* Vpliv komponentiv zvarjuval'nogo aerololu na zdorov'ja ljudini [Elektronnij resurs] // Rezhim dostupu: <https://city-adm.lviv.ua/news/society/emergency/233003-vplyv-komponentiv-zvarivvalnoho-aerololu-na-zdorovia-liudyny>. 24.06.2016

3. Migaj K.V. Gigiena i bezopasnost' truda pri jelectrosvarochnykh rabotah v sudostroenii. – L.: Medicina, 1975. – 74 s.
4. Solodskij S.A., Lugovcova N.Ju., Borisov I.S. Snizhenie svarochnykh ajerozolej pri dugovoj svarke metallov // International journal of applied and fundamental research №6, 2015
5. Zhukovskij S.S. Efektivnost' zagal'noobminnoj ventiljacii shhodo peremishhennja shkidlivih rechovin poza mezhi primishhennja // Lviv Polytechnic National University Institutional.2004., S.72-78.
6. Solodskij S.A. Snizhenie vrednyh vydelenij pri dugovoj svarke metallov Jekologija i bezopasnost' v tehnosfere : sovremennye problemy i puti reshenija: sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenykh, aspirantov i studentov, g. Jurga, 23-25 nojabrja 2017. S. 124-126.
7. Roze S. Konceptii voznikovenija i sokrashhenija vybrosov dyma, vydelyajushhegosja pri svarke metallov v srede zashhitnogo gaza s uchetom novykh variantov processa. Svarka i kontrol'. 2013. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvjashhennoj 125 letiju izobretenija N.G. Slavjanovym jelektrodugovoj svarki plavjashhimsja jelektrodom. Izdatel'stvo Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. g.Perm'.2013.
8. Ventiljacija svarochnogo ceha [Elektronnij resurs] // Rezhim dostupu: <http://www.ads-vent.ru/blog/ventilyaciya-svarochnogo-ceha>
9. Denisova N.M. Shljahi znizhennja zabrudnenosti povitirja robochoj zoni zvarjuval'nih dil'nic' // Visnik Chernigivs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu: Serija: Tehnichni nauki. Chernigiv: ChNTU, 2012. №3 (59).
10. MU 4436-87 Metodichni vказivki Ministerstva ohoroni zdorov'ja Ukraїni «Izmerenie koncentracii ajerozolej preimushhestvenno fibrogenogo dejstvija» №4436-87.
11. DBN V.2.5-67:2013 Opalennja, ventiljacija ta kondicionuvannja
12. V. Berezutskij, I. Hondak, N. Berezutska, V. Dmitrik, V. Gorbenko, V. Makarenko Assessment and prevention of the propagation of carbon monoxide over a working area at arc welding // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/10 (99), 2019, p.38 - 48.
13. Pisarenko V.L. Ventiljacija rabochih mest v svarochnom proizvodstve / Pisarenko V.L., Roginskij M.L. M.: Mashinostroenie. 1981. - 120 s.
14. Polovko A.M. MATHCAD dlja studenta / A.M. Polovko, I.V. Ganichev.-Sankt-Peterburg: «BHV-Peterburg», 2006. – 336 s.
15. Gurskij D. Vychislenija v MATHCAD 12/ D. Gurskij, E. Turbina. - M.: «Piter», 2006. - 544 s.

Поступила (received) 15.06.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Березуцький Вячеслав Володимирович (Березуцкий Вячеслав Владимирович, Berezutskiy Viacheslav Vladimirovich) - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Безпека праці та навколишнього середовища" НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7318-1039>, e-mail: viaberezuc@gmail.com

Хондак Інна Іванівна (Хондак Инна Ивановна, Hondak Inna Ivanivna) – старший викладач, кафедра охорони праці ХНУРЕ, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6644-9968>, e-mail: Inna.hondak@nure.ua

Березуцька Наталія Львівна (Березуцкая Наталья Львовна, Berezutska Nataliia) – кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці ХНУРЕ, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2573-9031>, e-mail: ecoloji7@ukr.net

Халіль Вікторія Вячеславівна (Халиль Виктория Вячеславовна, Khalil Viktoriia) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0222-7519>, e-mail: viktorykh610@gmail.com

НОВИК М.А., ЮРЧИШИН О.Я.

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУСИЛЛЯ ЗАТИСКУ І КРУТНОГО МОМЕНТУ БЕЗКАМЕРНОГО ЗАТИСКНОГО ПАТРОНА

Проаналізовані різноманітні конструктивні схеми затискних патронів, які застосовуються для закріплення ріжучих інструментів (свердл, фрез) з циліндричними хвостовиками при високошвидкісній обробці матеріалів різанням. Запропонована оригінальна малогабаритна конструкція затискного патрона з регульованим зусиллям затиску-розтиску. При цьому, зусилля затиску-розтиску хвостовика і інструменту забезпечується не підводом тиску живлення в робочі камери патрона, а в робочі камери гідроциліндра (або пневмоциліндра), який не входить в структуру патрона. Запропонований патрон характеризується підвищенням крутним моментом, що унеможливує проковзування рухомої втулки відносно затискної при різкому розгоні і гальмуванні патрона. Приведені аналітичні залежності, які дають можливість розраховувати зусилля затиску-розтиску в процесі проектування як патронів з додатковою радіальною камерою, так і без неї. Використання додаткової радіальної камери дає можливість значно понизити робочий тиск живлення при збереженні заданого зусилля при затиску хвостовика ріжучого інструмента.

Ключові слова: затискний патрон; рухома затискна втулка; додаткова камера; тиск живлення; гідроциліндр.

НОВИК Н.А., ЮРЧИШИН О.Я.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИЯ ЗАЖИМА И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА БЕСКАМЕРНОГО ЗАЖИМНОГО ПАТРОНА

Проанализированы различные конструктивные схемы зажимных патронов, которые применяются для закрепления режущих инструментов (сверл, фрез) с цилиндрическими хвостовиками при высокоскоростной обработке резанием. Предложена оригинальная компактная конструкция зажимного патрона с регулируемым усилием зажима-разжима. При этом, усилие зажима-разжима хвостовика и инструмента обеспечивается не подводом давления питания в рабочие камеры патрона, а в рабочие камеры гидроцилиндра (или пневмоцилиндра), который не входит в структуру патрона. Предложенный патрон характеризуется повышенным крутящим моментом, делает невозможным проскальзывание подвижной втулки относительно зажимной при резком разгоне и торможении патрона.

Приведены аналитические зависимости, позволяющие рассчитывать усилие зажима-разжима в процессе проектирования как патронов с дополнительной радиальной камерой, так и без нее. Использование дополнительной радиальной камеры дает возможность значительно снизить рабочее давление питания при сохранении заданного усилия при зажиме хвостовика режущего инструмента.

Ключевые слова: зажимной патрон; подвижная зажимная втулка; дополнительная камера; давление питания; гидроцилиндр.

NOVIK N., YURCHYSHYN O.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE CLAMPING EFFORT AND TORQUE OF THE TUBERLESS CHUCK

Various design patterns of chucks are analyzed, which are used to secure cutting tools (drills, mills) with cylindrical shanks during high-speed machining. An original compact design of a chuck with adjustable clamp-expanding force is proposed. At the same time, the clamp-expanding force of the shank and tool is provided not by supplying pressure to the working chambers of the chuck, but into the working chambers of the hydraulic cylinder (or pneumatic cylinder), which is not included in the structure of the chuck. The proposed chuck is characterized by increased torque, makes it impossible to slip the movable sleeve relative to the clamping during sharp acceleration and braking of the chuck.

Analytical dependences are given that make it possible to calculate the clamping-expanding force during the design process of both chuck with and without an additional radial chamber. The use of an additional radial chamber makes it possible to significantly reduce the operating pressure of the supply while maintaining the specified force when clamping the shank of the cutting tool.

Keywords: chuck; movable clamping sleeve; additional camera; supply pressure; hydraulic cylinder.

1. Вступ. При обробці отворів малого діаметра на свердлильних верстатах і вузьких пазів на фрезерувальних верстатах необхідно для отримання високої якості обробки (чистоти) інструменту забезпечити високу швидкість обертання. Висока швидкість обертання інструмента (свердла, фрези) обумовлює створення малогабаритних затискних патронів, так як з підвищенням обертів значно збільшуються відцентрові сили, які понижують зусилля затиску, що в свою чергу може призвести до неякісної обробки і аварійної ситуації.

Відцентрове зусилля визначається по відомій залежності

$$F = m \cdot R \cdot \omega^2 = m \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2 R \quad (1)$$

Аналіз залежності (1) дозволяє зробити висновок, що відцентрове зусилля можна зменшувати за рахунок мінімізації параметрів затискного патрона,

тобто маси і радіальних розмірів. Найменший радіальний розмір має традиційна схема конус в конусі, але такий затиск має недоліки, які полягають в тому, що немає можливості регулювати зусилля затиску-розтиску і неможливо робити затиск деталей і інструментів з циліндричним хвостовиком [1].

В наш час, вітчизняні і закордонні фірми, які займаються високошвидкісною обробкою матеріалів різанням ведуть активну роботу в створенні і дослідженні малогабаритних затискних патронів для металорізальних та деревообробних верстатів. При цьому, в основному створення і дослідження присвячується затискним патронам, структура яких містить гіравлічні камери високого тиску. Розміщення камер затиску-розтиску безпосередньо в затискному патроні обумовлює суттєві недоліки таких пристроїв. Такі патрони складні конструктивно, вони живляться високим робочим тиском (до 100 МПа і більше), недоліком також є і те, що в процесі роботи камери затиску-розтиску заповнені горючою робочою

рідиною (мастилом). Все це значно обмежує область застосування затискних патронів, тому розробка і дослідження новітніх затискних патронів з поліпшеними технічними характеристиками є актуальною проблемою, вирішення якої дасть можливість значно підвищити як продуктивність, так і якість обробки деталей.

2. Аналіз попередніх розробок і досліджень.

В роботах [2] і [3] розглянуті відповідно патрони, у яких затиск-розтиск відбувається за рахунок теплової і силової деформації затискних елементів. Такі затискні патрони мають незначні габаритні радіальні розміри, але у них неможливе регулювання зусилля затиску – розтиску і необхідне специфічне обладнання для їх обслуговування. В роботах [4, 5] розглянуті патрони, в яких можливе регулювання зусилля затиску-розтиску в процесі експлуатації. В структуру таких патронів входять тонкостінна пружна затискна втулка, з якою рухомо в осьовому напрямку по конічній поверхні спряжена з утворенням двох герметичних камер рухомої втулки. Недоліком таких двокамерних затискних патронів є те, що вони складні конструктивно і технологічно. Технологічна складність обумовлюється тим, що дуже складно прикріпити до тонкостінної затискної втулки торцеву кришку. Зусилля затиску – розтиску в таких патронах визначається добутком ефективної площі рухомої втулки на тиск, який діє на цю площу. Тому в таких патронах виникає протиріччя: при збільшенні площі зростає радіальний габаритний розмір, що в свою чергу веде до збільшення відцентрової сили. Збільшення тиску живлення, що подається в камери, вимагає застосування мультиплікаторів і спеціальної апаратури високого тиску до 100 МПа і більше. Крім того, в процесі роботи, рідина залишається в робочих камерах затиску-розтиску, що може привести до її загорання і руйнування патрона. Тобто, в процесі експлуатації таких патронів необхідно забезпечити охолодження.

В роботах [4, 5] розглянуті конструкції трикамерних затискних патронів, які характеризуються пониженням робочого тиску живлення в порівнянні з двокамерними затискними патронами. Ефект пониження робочого тиску, що підводиться до робочих камер, обумовлюється тим, що в процесі затиску чи розтиску тиск живлення одночасно підводиться як до робочої камери, так і до камери радіального відтискування рухомої втулки від затискної. Такі патрони характеризуються пониженням робочого тиску на 40-50 відсотків, але мають такі ж недоліки як і попередньо розглянуті двокамерні патрони.

3. Постановка задачі. Задачами статті є розробка і дослідження безкамерного затискного патрона з додатковою камерою радіального відтиску і рухомою втулкою, яка забезпечує передачу крутного моменту від хвостовика патрона до затискної втулки з метою отримання аналітичних залежностей для розрахунку характеристик патронів такого типу.

4. Виклад основного матеріалу. На рис. 1 показано затискний патрон, структура якого не містить камер затиску-розтиску [8].

Затискний патрон складається із хвостовика 1, до якого гвинтом 2 прикріплена тонкостінна пружна затискна втулка 3 (або пелюсткова цанга) з кутом конусності α ($\alpha \approx 2..3^\circ$). Із затискною втулкою 3 спряжена по конічній поверхні рухомо в осьовому напрямку втулка 4.

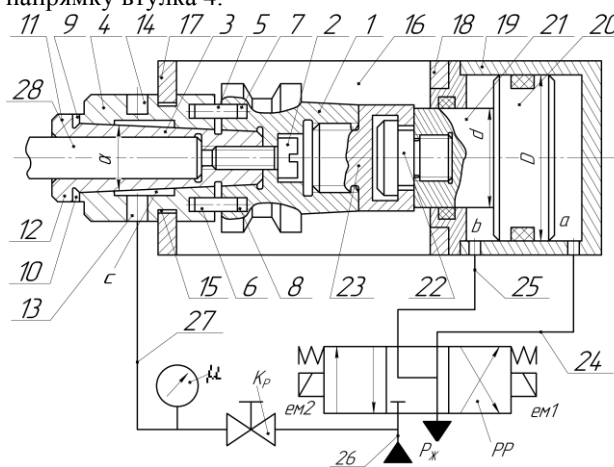


Рис. 1. Затискний патрон

У рухомій втулці 4 з одного торця закріплені діаметрально штифти 5 і 6, які з можливістю руху в осьовому напрямку розміщені в отворах 7 і 8, виконаних у хвостовику 1. З іншого торця рухомої втулки 4 виконані діаметрально протилежно пази 9 і 10, які рухомо в осьовому напрямку спряжені з буртиками 11 і 12, виконаними на торці затискної втулки 3. В рухомій втулці 4 виконана кільцева камера с з каналом живлення 13 і компенсуючим глухим отвором 14. На зовнішній циліндричній поверхні рухомої втулки 4 виконана кільцева проточка 15. Затискний патрон закріплюється в рамі, виконаній у вигляді швелера 16, при цьому кільцева проточка 15 розміщується в пазу лівої полки 17 швелера 16. До правої полки 18 швелера прикріплений гідроциліндр 19, в якому розміщений поршень 20 зі штоком 21. В шток 21 вгвинчений гвинт 22, який спряжений з байонетом 23, вгвинченим в хвостовик 1 затискного патрона. Герметичні камери а і b гідроциліндра 19 з'єднані каналами 24 і 25 з вихідними каналами реверсивного гідророзподільника РР. Канал живлення 26 з'єднаний з вхідним каналом розподільника РР і з вхідним каналом крана K_p , вихідний канал 27 якого з'єднаний з каналом 13 рухомої втулки 4. В отворі затискної втулки 3 розміщується хвостовик інструмента 28 або деталь.

Тиск живлення $P_{жс}$, що підводиться до робочих камер а і b і радіальної камери с вимірюється манометром М.

Затиск-розтиск патрона відбувається наступним чином. У вихідному положенні електромагніти $em1$ і $em2$ розподільника РР знеструмлені, а запірний кран K_p закритий. При цьому камери а і b і с з'єднані з атмосферою (зливом). Штифти 5 і 6 розміщені в отворах 7 і 8 хвостовика 1, а в пазах 9 і 10 втулки 4 розміщені буртики 11 і 12 затискної втулки 3. Для здійснення затиску інструмента 28 подається напруга

на електромагніт $em2$. При цьому, розподільник РР перемикається праворуч (за кресленням) і тиск живлення $P_{ж}$ підводиться до камери b циліндра 19, а камера з'єднується зі зливом (атмосферою). Під дією тиску $P_{ж}$ в камері b поршень 20 зі штоком 21, хвостовиком 1 і затискною втулкою 3 рухаються праворуч відносно втулки 4. Осьове зусилля, що діє на затискну втулку визначається залежністю

$$R_0 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot P_{ж} - \frac{\pi}{4} D^2 \cdot P_3 - R_{тер},$$

де D - діаметр поршня 20; d - діаметр штока 21; P_3 - тиск зливу у камері a ; $R_{тер}$ - сумарна сила тертя.

Радіальне зусилля, що діє на втулку 3 від втулки 4

$$R_0 = R_0 \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_{тер}) = \left\{ \frac{\pi}{4} [(D^2 - d^2) \cdot P_{ж} - D^2 \cdot P_3] - R_{тер} \right\} \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_{тер}),$$

де α - кут спряження втулок 3 і 4; $\varphi_{тер}$ - кут тертя.

Контактний тиск між конічними поверхнями втулок 3 і 4 при закритому крані K_p визначається по залежності

$$P_{k,3} = \frac{R_p}{F_k},$$

де F_k - площа контакту між втулками 3 і 4.

Для визначення площі контакту втулок 3 і 4 зробимо спрощену схему

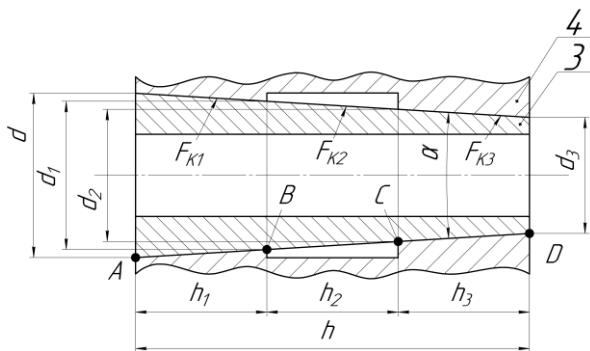


Рис. 2 – Розрахункова схема для визначення площі контакту втулок

Сумарна площа контакту втулок F_k визначається по залежності

$$F_k = F_{k1} + F_{k3} = \pi \frac{d + d_1}{2} \cdot l_1 + \pi \frac{d_2 + d_3}{2} \cdot l_3, \quad (2)$$

де d , d_1 , d_2 і d_3 - діаметри торцевих поверхонь конусів; l_1 і l_2 - довжини твірних АВ і CD конусів.

Після перетворення залежності (2) отримуємо залежність для визначення площі контакту між втулками 3 і 4 при заданих величинах d , α і висот конусів h_1 , h_2 і h_3

$$F_k = \frac{\pi}{\cos \frac{\alpha}{2}} \left[h_1 \left(d - h_1 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) + (h_1 + h_2 + h_3) \times \right. \\ \left. \times (d - (2h_1 + 2h_2 + h_3)) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right] \quad (3)$$

Для спрощення залежності 3 приймемо

$$h_1 = h_2 = h_3 = h$$

і підставивши ці значення в залежність (2) отримуємо

$$F_k = \pi \cdot 4h \left(d - 4h \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) / \cos \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

Контактний тиск між втулками 3 і 4 визначається по залежності

$$P_k = \frac{R_p}{F_k} = \frac{\left\{ \frac{\pi}{4} [(D^2 - d^2) \cdot P_{ж} - D^2 \cdot P_3] - R_{тер} \right\} \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_{тер})}{\pi \cdot 4h \left(d - 4h \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) / \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (5)$$

Розглянемо процес затиску при відкритому крані K_p , тобто коли тиск живлення одночасно подається в камери b і c . При цьому, втулка 3 рухається праворуч відносно втулки 4 і створює на неї радіальний тиск, який визначається по формулі (5). При з'єднанні камер b і c з атмосферою (зливом), радіальна сила, що діє від втулки 4 на втулку 3 збільшується на величину

$$R_{p,g} = \pi \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot h_2 \cdot P_{ж}$$

Внаслідок збільшення радіального зусилля збільшується і контактний тиск між втулками 3 і 4 на величину

$$P_{k,g} = \frac{R_{p,g}}{F_{k2}},$$

$$\text{де } F_{k2} = \pi \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot h_2.$$

Таким чином, створення додаткової радіальної камери дає можливість збільшити контактний тиск на втулку 3, що в свою чергу збільшує зусилля затиску хвостовика інструмента, розміщеного в отворі тонкостінної затискної втулки.

Крім того, передача крутного моменту від хвостовика 1 до затискної втулки 3 через штифти 5,6 і спряження 9-11 і 10-12 унеможливує прокручування втулки 4 відносно затискної втулки 3.

Розглянемо процес розтиску патрона, який може відбуватися як при з'єднанні радіальної камери c з атмосферою, так і з'єднанні її з тиском живлення $P_{ж}$. При з'єднанні камери c з атмосферою, осьове зусилля при розтиску визначається по залежності

$$R_{p,0} = \frac{\pi D^2}{4} P_{ж} - \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) P_{p,3} - R_{тер,ц} - R_{тер,b} \quad (6)$$

де $P_{p,3}$ - тиск зливу в камері b ; $R_{тер,ц}$ - зусилля тертя поршня і штока циліндра 19; $R_{тер,b}$ - зусилля тертя між втулками 3 і 4.

Підставивши в залежність (6) $R_{тер,b} = P_k \cdot F_k \cdot \cos \alpha$ і вирішивши його відносно $P_{ж}$ знаходимо:

$$P_{ж} = \frac{4 \left[R_{p,0} + \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) P_{p,3} + R_{тер,ц} + P_k \cdot F_k \cdot \cos \alpha \right]}{\pi D^2} \quad (7)$$

При подачі тиску живлення $P_{ж}$ в камеру c тиск живлення, що підводиться до камери a при розтиску визначається по залежності

$$P_{ж,б} = \frac{4 \left[R_{p,0} + \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) P_{p,з} + R_{тер,ш} + P_k \cdot \cos \alpha (F_k - F_{k2}) \right]}{\pi D^2}$$

(8)

Із аналізу залежностей (7) і (8) випливає, що із збільшенням площі F_{k2} тиск живлення, що підводиться до камер циліндра 19 зменшується при збереженні зусилля затиску хвостовика інструмента (деталі).

Після здійснення необхідного затиску інструмента патрон вилучають із пристрою і встановлюють в шпіндель, наприклад, мотор-шпіндель.

Висновки. Запропонований безкамерний затискний патрон характеризується незначними радіальними габаритними розмірами, зусилля затиску-розтиску якого регулюється в широкому діапазоні, при цьому затискний гідроциліндр (або пневмоциліндр) не входить в структуру патрона. Показано, що виконання радіальної додаткової камери дає можливість зменшити робочий тиск живлення, що підводиться до робочих камер циліндра. Отримані результати дослідження можуть бути використані спеціалістами, які розробляють або експлуатують аналогічні патрони.

Список литературы:

1. Новік М.А., Музиченко В.В. *Спосіб експериментального визначення контактних тисків на зовнішній і внутрішній поверхнях затискної втулки малогабаритного затискного патрона з регульованою силою затиску* / Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. - №1. – С.149-153.
2. Termo Grip. *Bilz Werkzeug Fabrik GmbH&Co.KG Ostfildren*. – 07.2007.68.
3. Moser S. *Werkzeugholmer Schrumpffutter auf dem Vormarsch / Produktion*. – 2006. –N31-32. – p.20.
4. Патент США №6473954. *Затискний механізм гідромеханічного патрона* / МПК В23В31/20, F16N34/12, опубл. 05.11.2002.

5. Патент України №73045. *Гідромеханічний затискний патрон* / Кузнєцов Ю.М., Гуменюк О.А., Юрчишин О.Я. / МПК В23В31/30, В23В31/10, опубл. 16.05.2005, Бюл. №5.
6. Новік М.А. Музиченко В.В. *Порівняльний аналіз гідромеханічних затискних патронів* / Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідраліка і пневматика». – 2013. - №2(40). – С.80-83.
7. Патент України №109332. *Гідромеханічний затискний патрон* / Новік М.А. Музиченко В.В. / МПК В23В31/30, опубл. 10.08.2015, Бюл. №15.
8. Патент України №132598. *Затискний патрон* / Новік М.А., Юрчишин О.Я. / МПК В23В31/30, опубл. 11.03.2019, Бюл. №5.

References (transliterated)

9. Novik M.A., Muzychenko V.V. *Sposib eksperymental'noho vyznachennya kontaktnykh tyskiv na zovnishniy i vnutrishniy po-verkhnyakh zatysknoyi vtulky malohabarytnoho zatysknoho pa-trona z rehu'ovanoyu syloyu zatysku* [Method of experimental determination of contact pressures on the outer and inner tops of the clamping sleeve of a small clamping chuck with adjustable clamping force] / Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. – 2015. - №1. – S.149-153.
10. Termo Grip. *Bilz Werkzeug Fabrik GmbH&Co.KG Ostfildren*. – 07.2007.68.
11. Moser S. *Werkzeugholmer Schrumpffutter auf dem Vormarsch / Produktion*. – 2006. –N31-32. – p.20.
12. Patent US №6473954. *Zatysknyy mekhanizm hidromekhanichnoho patrona* [The clamping mechanism of the hydromechanical chuck] / MPK V23V31/20, F16N34/12, opubl. 05.11.2002.
13. Patent UA №73045. *Hidromekhanichnyy zatysknyy patron* [Hydromechanical clamping chuck] / Kuznyetsov YU.M., Humenyuk O.A., Yurchyshyn O.Ya. / MPK V23V31/30, V23V31/10, opubl. 16.05.2005, Byul. №5.
14. Novik M.A. Muzychenko V.V. *Porivnyal'nyy analiz hidromekhanichnykh zatysknykh patroniv* [Comparative analysis of hydromechanical clamping chuck] / Vseukrayins'kyy nauko-vo-tekhnichnyy zhurnal «Promyslova hidravlika i pnevmatyka». – 2013. - №2(40). – С.80-83.
15. Patent Ukrayiny №109332. *Hidromekhanichnyy zatysknyy patron* [Hydromechanical clamping chuck] / Novik M.A., Muzychenko V.V. / MPK V23V31/30, opubl. 10.08.2015, Byul. №15.
16. Patent Ukrayiny №132598. *Zatysknyy patron* [Clamping chuck] / Novik M.A., Yurchyshyn O.YA. / MPK V23V31/30, opubl. 11.03.2019, Byul. №5.

Поступила (received) 20.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новік Микола Андрійович (Новик Николай Андреевич, Novik Nikolai) - кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, просп. Перемоги, 37, тел (044)-454-94-61, e-mail: kvn_mmi@ukr.net

Юрчишин Оксана Ярославівна (Юрчишин Оксана Ярославовна, Yurchyshyn Oksana) - кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, просп. Перемоги, 37, тел 097-796-45-23, e-mail: urchysynoks@ukr.net

СКОРКІН А.О., КОНДРАТЮК О.Л., СТАРЧЕНКО О.П., КАМЧАТНАЯ-СТЕПАНОВА Е.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ НА РІВЕНЬ ВІБРАЦІЙ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ОБРОБНОГО ЦЕНТРУ

Одним зі шляхів підвищення ефективності механообробки є застосування систем моніторингу динамічних параметрів. Вимір і аналіз динамічних параметрів у процесі обробки деталей було дотепер по технічним і економічним причинам непростим завданням, розв'язуваною для окремих випадків застосування. Істотний ріст розвитку мікропроцесорної техніки й програмного забезпечення в останні роки дозволив забезпечити розробку систем моніторингу динамічних параметрів і адаптивного керування, спрямованих на оптимізацію технологічних процесів високопродуктивної обробки й модернізацію металообробного встаткування. Фрезерна обробка пов'язана із циклічними навантаженнями в обробній системі верстата, які збільшилися за останні роки багаторазово. Збільшення кутової швидкості обертання шпинделя обробних центрів до 20 – 30 тисяч обертів у хвилину, збільшення подачі на зуб і глибини фрезерування суттєво збільшує динамічну складову сил різання. Вимір і аналіз вібраційних процесів у верстаті при обробці дозволяє вивчити динамічні явища, що виникають в обробній системі, а безперервний моніторинг сили різання і її періодичної складової (тобто вібрації) дозволить замкнути обробну систему каналом зворотного інформаційного зв'язку з метою наступного керування режимами обробки, мінімізуючи супутні коливання й вібрації. Проведено експериментальні дослідження впливу технологічних режимів фрезерування на рівень вібрації шпиндельного вузла обробного центру, які показали необхідність при реалізації технологій ВПО узгодження режимів різання з рівнем можливої вібрації шпинделя, ріжучого інструменту і деталі. Розроблена кінцево-елементна модель і проведено чисельне моделювання процесу формування форми і амплітуди періодичних збуджуючих сил різання. Дослідження коливань сил взаємодії фрези із заготовкою на динамометричному столі при підвищенні швидкості обертання шпинделя показали, що на високих частотах обертання шпинделя на ряді режимів фрезерування виникають області нестійкого різання, обумовлені динамічними характеристиками обробної системи. Це призводить до нерівномірної роботи різальних крайок фрези і погіршення якості обробки.

Ключові слова: фрезерування, коливання, обробний центр, динамічні коливання, якість обробки, продуктивність обробки.

СКОРКІН А.О., КОНДРАТЮК О.Л., СТАРЧЕНКО Е.П., КАМЧАТНА-СТЕПАНОВА К.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА УРОВЕНЬ ВИБРАЦИЙ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

Одним из путей повышения эффективности механообработки является применение систем мониторинга динамических параметров. Измерение и анализ динамических параметров в процессе обработки деталей было до сих пор по техническим и экономическим причинам непростым заданием, решаемым для отдельных случаев применения. Существенный рост развития микропроцессорной техники и программного обеспечения в последние годы позволил обеспечить разработку систем мониторинга динамических параметров и адаптивного управления, направленных на оптимизацию технологических процессов высокопроизводительной обработки и модернизацию металлообрабатывающего оборудования. Фрезерная обработка связана с циклическими нагрузками в обрабатывающей системе станка, которые увеличились за последние годы во много раз. Увеличение угловой скорости вращения шпинделя обрабатывающих центров в 20 - 30 000 оборотов в минуту, увеличение подачи на зуб и глубины фрезерования существенно увеличивает динамическую составляющую сил резания. Измерение и анализ вибрации в станке при обработке позволяет изучить динамические явления, возникающие в обрабатывающей системе, а непрерывный мониторинг силы резания и ее периодической составляющей (т.е. вибрации) позволит замкнуть обрабатывающую систему каналом обратной информационно-связи с целью последующего управления режимами обработки, минимизируя сопутствующие колебания и вибрации. Проведены экспериментальные исследования влияния технологических режимов фрезерования на уровень вибрации шпиндельного узла обрабатывающего центра, которые показали необходимость при реализации технологий ВПО согласования режимов резания с уровнем возможной вибрации шпинделя, режущего инструмента и детали. Разработана конечно-элементная модель и проведено численное моделирование процесса формирования формы и амплитуды периодических возмущающих сил резания. Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой на динамометрическом столе при повышении скорости вращения шпинделя показали, что на высоких частотах вращения шпинделя на ряде режимов фрезерования возникают области неустойчивого резки, обусловленные динамическими характеристиками обрабатывающей системы. Это приводит к неравномерной работе режущих кромок фрезы и ухудшение качества обработки.

Ключевые слова: фрезерования, колебания, обрабатывающий центр, динамические колебания, качество обработки, производительность обработки.

SKORKIN A.O., KONDRATYUK O. L., STARCHENKO E.P., KAMCHATNAYA-STEPANOVA E.V.

STUDY OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL MODES OF MILLING ON THE LEVEL OF VIBRATIONS OF THE SPINDLE ASSEMBLY PROCESSING CENTER

One of the ways to increase the efficiency of machining is the use of dynamic parameter monitoring systems. Measurement and analysis of dynamic parameters during the processing of parts has so far been for technical and economic reasons difficult tasks solved for individual applications. Significant growth in the development of microprocessor technology and software in recent years has allowed the development of monitoring systems for dynamic parameters and adaptive control aimed at optimizing technological processes of high-performance processing and modernizing metalworking equipment.

Milling processing is associated with cyclic loads in the processing system of the machine, which have increased significantly in recent years. An increase in the angular speed of rotation of the spindle of the machining centers is 20-30,000 rpm, an increase in the feed per tooth and the depth of milling significantly increases the dynamic component of the cutting forces. Measurement and analysis of vibration in the machine during processing allows you to study the dynamic phenomena that occur in the processing system, and continuous monitoring of the cutting force and its periodic component (i.e. vibration) will allow you to close the processing system with a feedback channel for the subsequent control of the modes processing, minimizing the accompanying vibrations and vibrations.

Experimental studies of the influence of technological modes of milling on the vibration level of the spinning unit of the processing center were carried out, which showed the need for the implementation of HPE technologies to coordinate cutting modes with the level of possible vibration of the spindle, cutting tool and part. A finite element model is developed and a numerical simulation of the formation of the shape and amplitude of the periodic exciting cutting forces is carried out.

The study of fluctuations in the forces of interaction between the cutter and the workpiece on a dynamometer table with an increase in the spindle rotation speed showed that at high frequencies of spindle rotation in a number of milling modes, areas of unstable cutting arise due to the

dynamic characteristics of the processing system. This leads to uneven operation of the cutting edges of the cutter and the deterioration of the quality of processing.

Key words: milling, vibrations, machining center, dynamic vibrations, machining quality, machining productivity.

1. Вступ. Сучасні обробні центри (ОЦ), володіючи широкими технологічними можливостями й значним потенціалом подальшого розвитку, є в цей час найбільш високопродуктивними й самими затребуваними типами багатофункціональних верстатів. На таких верстатах зняття припуску здійснюється інструментом, що поєднує одночасне обертання з лінійним переміщенням інструмента або заготовки. При цьому деталь закріплена на столі верстата або в спеціальному пристосуванні.

ОЦ получили широке поширення за рахунок можливості виконання на одному верстаті декількох видів операцій обробки: розточування, свердління, фрезерування, а також необхідних вимірів. Виконання різних операцій на одному обробному центрі суттєво економічніше, ніж послідовна обробка на декількох спеціалізованих верстатах. Поряд з економією часу ОЦ дозволяє скоротити інвестиційні витрати й витрати, пов'язані з кадровим забезпеченням і виробничою площею.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

При виборі способів підвищення якості й продуктивності обробки деталей важливим критерієм є їхня економічна ефективність, що забезпечує зниження собівартості готових виробів, що особливо актуально в умовах низької серійності виготовлення [2, 4, 6].

Різноманітність інструментальних систем дозволяє розширити технологічні можливості ОЦ, але також приводить до необхідності обліку динамічних характеристик елементів інструментальної системи й самого верстата [3, 5, 7].

Найбільш важливим елементом ОЦ є шпindel, саме він створює головний рух різання й забезпечує зняття стружки інструментом. ОЦ переважно оснащуються електромеханічними приводами головного руху. Електрична частина (електропривод) складається з електродвигуна постійного або змінного току й спеціальних перетворюючих і керуючих пристроїв, а механічна частина – з окремих передач (зубчасті, ремінні й ін.) [75].

До сучасних шпинделів пред'являється велика кількість технічних вимог. Так при обробці міцних і грузлих матеріалів шпindel повинен мати високий крутний момент на низькій частоті обертання, а при обробці м'яких матеріалів забезпечувати високу частоту обертання із заданим крутним моментом. Забезпечення високої частоти обертання досягається шляхом використання як опор шпинделя спеціальних керамічних і металокерамічних підшипників з меншим тепловиділенням. Однак такий тип опор дуже чутливий до динамічних навантажень, під впливом яких підшипники мають прискорене зношування, що приводить до втрати точності й передчасному виходу з ладу дорогого вузла верстата.

3. Мета дослідження. Підвищення ефективності фрезерної обробки за рахунок використання систем моніторингу динамічних характеристик.

4. Вклад основного матеріалу. Будь-яке механообробне встаткування має вузли, що переміщуються або обертові вузли, які створюють механічні коливання й вібрації, що є причиною зниження якості деталей, що випускаються, підвищеного зношування інструмента, передчасного виходу з ладу обробних верстатів. Вібрація в значній мірі визначає показники точності верстатів і характеризує стан вузлів, деталей і їх складових. На верстат, шпindel, інструмент і заготовку деталі при обробці діє складний комплекс мінливих у часі силових, інерційних і кінематичних збурювань.

Під параметрами вібрації, вимірюваної на шпинделі обробного центру, розуміються тимчасові складові (осцилограми) коливань по трьом взаємно перпендикулярним напрямкам, тобто первинні сигнали вібропришвидження, одержувані датчиками вібрації (п'єзоакселерометрами), а також результати їх обробки при аналізі [1, 7].

Підвищення частоти обертання шпинделя (до 10000 - 20000 об/хв і більш) приводить до виникнення нових негативних явищ при обробці, пов'язаних з динамічною нестабільністю процесу різання – вібраціями системи ВПЗ. При чорновій обробці масивних заготовок вібрації обумовлені коливаннями шпиндельної групи верстата, що включає властивості шпинделя і інструменту із системою його кріплення. Такі вібрації мають амплітуду порядку товщини стружки й приводять до появи «дроблення» на обробленій поверхні (Рис1). Вібрації знижують якість обробки й ведуть до передчасного руйнування інструмента й підшипників шпинделя. При виникненні вібрацій оператор верстата або технолог зменшують глибину/ширину фрезерування або подачу інструмента, що приводить до зниження продуктивності обробки не дозволяє повною мірою реалізувати потужність привода шпинделя.



Рис. 1 – Дроблення на обробленій поверхні в результаті вібрацій інструмента

Обсяг матеріалу, що віддається, $[cm^3/hv]$ визначається вираженням:

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times V_f}{10000}, \quad (1)$$

де a_p -глибина фрезерування; a_e – ширина фрезерування; V_f - подача стола;

Підвищення значень перших трьох параметрів фрезерування ($a_p \times a_e \times V_f$) приводить до росту зусиль у

При високошвидкісній обробці (частота обертання шпинделя – оборотна частота: $f_1 = n_1/60 = 330$ –500 Гц) виникають резонанси й просторові коливання механічної структури й вузлів верстата, які значно впливають на динамічні характеристики верстата і якість обробки [6, 8].

Фрезерування, як технологічний процес, характеризується переривчастим силовим впливом фрези на заготовку й викликає періодичні коливання сил різання $P(t)$ із зубцовою частотою $f_z = n_1 z / 60 = z \cdot f_1$, де n_1 – кутова швидкість обертання фрези (об/хв); z – число ріжучих крайок фрези. Такі періодичні впливи приводять до змушених коливань верстата, шпинделя, інструмента й заготовки. Коливання фрези й заготовки впливають на силу різання, що виникає між ріжучими крайками фрези й заготовкою.

При проведенні експериментів застосовувалася фреза діаметром $d = 25$ мм, із двома зубами $z = 2$. Частота обертання шпинделя $n_1 = 60f_1$ під час 16 експериментів змінювалася в діапазоні $n_1 = 12738$ - 27388 об/хв; подача на зуб S_z : 0,1 - 0,4 мм/зуб, із кроком 0,1 мм/зуб; ширина фрезерування b : 5 - 15 мм, із кроком 2,5 мм; глибина фрезерування h : 6 - 10 мм, із кроком 1 мм.

На рисунку 2 наведені осцилограми 3-х проекцій F_x , F_y , F_z сил фрезерування, отримані в програмі «Dynaware» при подачі по осі X. На рисунку 3 наведені спектри коливань сил фрезерування при тих же вимірах. В «ідеальному» випадку фрезерування крайки, що коли ріжуть, завантажені рівномірно, амплітуда складової спектра на зубцовій частоті f_z значно перевищує амплітуди інших гармонік (Рисунок 2. б).

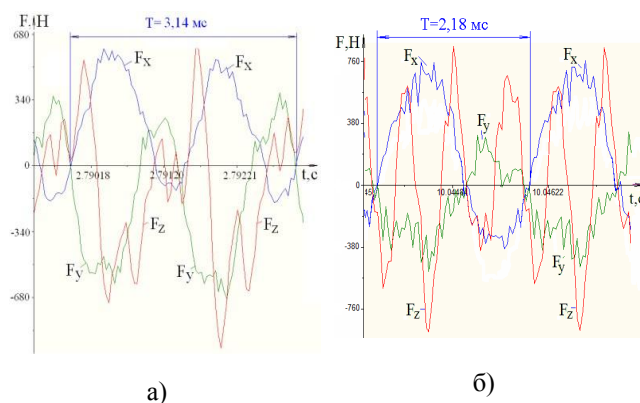
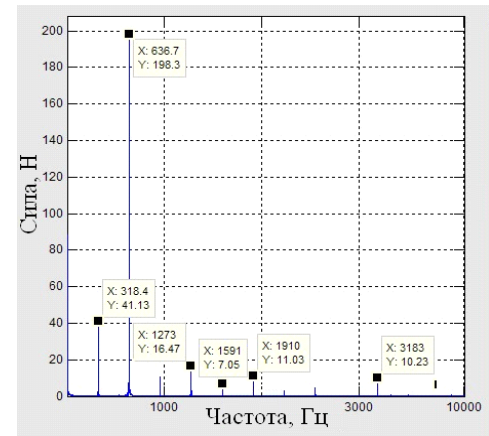
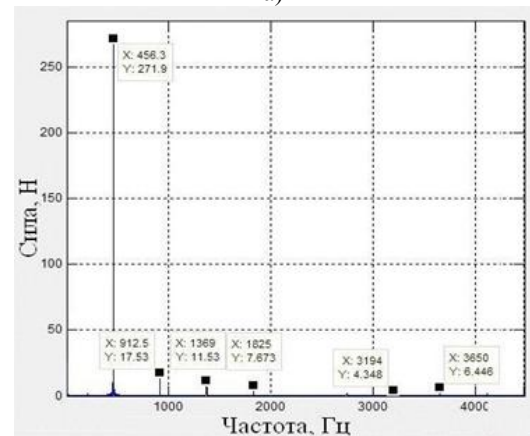


Рис 2 - Осцилограми проекцій сили фрезерування F_x , F_y , F_z

взаємодії «фреза – заготовка». Підвищення частоти обертання шпинделя (відповідне до росту швидкості різання) розширює частотний діапазон впливу сил різання на компоненти системи ВПЗ. У результаті суттєво розширюються діапазони виникнення вібрацій інструмента, закріпленого в шпинделі [14]



а)



б)

Рис. 3 - Спектри вібрацій сил фрезерування по осі подачі X

Виникаючі періодичні імпульси сил впливають на пружно - інерційну систему верстата, викликаючи в ній стаціонарні й перехідні коливальні процеси [2, 4 5]. Результуючі вібрації залежать також від власних форм коливань і динамічних характеристик ОЦ [2].

Розроблювальна динамічна модель дозволить із обліком виявлених кінцево-елементним моделюванням закономірностей змін форми силових імпульсів при різних дефектах створювати часовий ряд сигналів для їхнього наступного використання як збуджуючих впливів диференціальних рівнянь коливань, як твердого тіла (Q_x , Q_y , Q_z , Q_a , Q_b , Q_y).

Кінцево-елементне (КЕ) моделювання проведене в програмному середовищі «Abaqus». Нижче представлений приклад КЕ моделювання процесу фрезерування. Розглядалася заготовка, що має розміри 10x10x50 мм, яка обробляється кінцевою фрезою діаметром 32 мм із трьома змінними твердосплавними пластинами. Заготовка з алюмінієвого ливарного сплаву, містить у собі 69 305

тетраїдних елементів зі згущенням у зоні різання, мінімальна довжина сторони яких становить 0,1 мм.

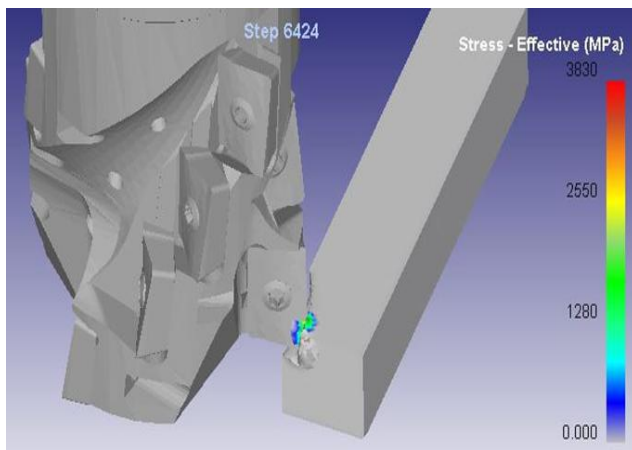
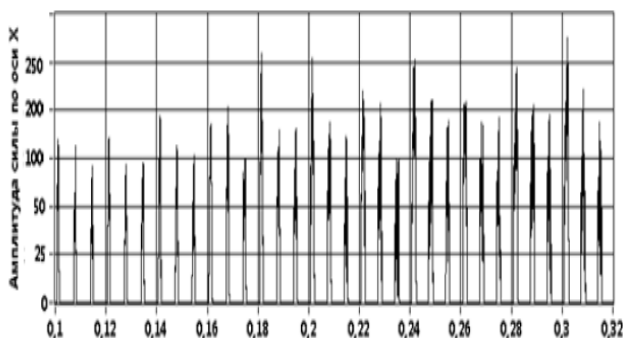
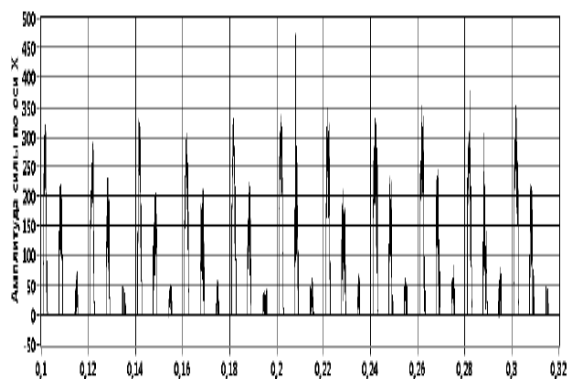


Рис. 4 - Моделювання процесу фрезерування

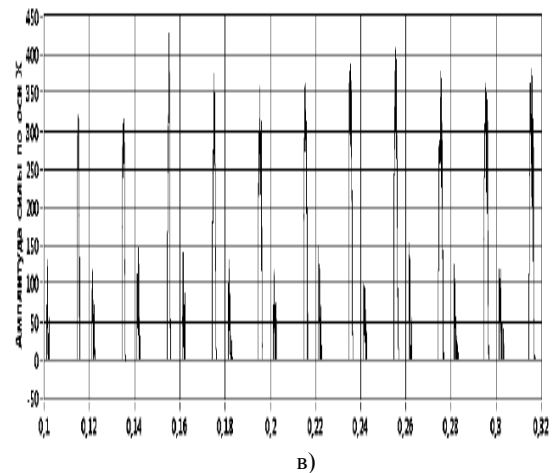
За результатами моделювання фрезерування отримані залежності сили різання в проекціях координат верстата. На рисунку 3 представлена тривимірна візуальна схема КЕ моделювання сил виникаючих при обробці заготовки за допомогою кінцевої фрези зі змінними пластинами. Тимчасові характеристики сили різання по координаті, спрямованої уздовж подачі інструмента (вісь X) для випадку відсутності зношування (4, а), і при дефектах змінних пластин (Рисунок 4, б, в).



а)



б)



в)

Рис. 4 - Тимчасові сигнали сил різання по осі X подачі заготовки при: а) відсутності дефекту, б) дефекті викрашування, в) поломці ріжучої крайки

Визначимо вираження тангенціальної й радіальної сил різання, що діють на j зуб:

$$dF_{t,j}(\varphi_j, z) = [K_{tc} \times h(\varphi_j(z)) + K_{te}] \times dz; \quad (2)$$

$$dF_{r,j}(\varphi_j, z) = [K_{rc} \times h(\varphi_j(z)) + K_{re}] \times dz,$$

де K_{tc} , K_{te} – постійні коефіцієнти тангенціальної сили різання; K_{rc} , K_{re} – постійні коефіцієнти нормальної сили різання; dz – дискретний крок по осі інструмента.

Поточна товщина шару, що зрізується, зубом j визначається по формулі:

$$h(\varphi_j(z)) = f_t \times \sin \varphi_j(z) \quad (3)$$

де f_t – це подача на зуб; $\varphi_j(z)$ – поточний кут ріжучої крайки j , щодо осі інструмента ($j = 1, \dots, n$), n – число ріжучих крайок.

Розрахунки поточного кута ріжучої крайки j виконується по формулі:

$$\varphi_j(z) = \varphi_{(j-1)} + j \times \varphi_p - \psi \quad (4)$$

де φ_p – центральний кут між ріжучими крайками інструмента, що визначається як: $\varphi_p = 2\pi/n$.

При фрезеруванні інструментом, що мають кут нахилу гвинтової лінії ріжучої крайки β , крапка на її поверхні буде відставати від крапки на попередньому кроці по осі інструмента, тобто мати запізнювання (Рис. 5).

Кут запізнювання ψ при кроці dz по осі інструмента діаметром d визначається з умови:

$$\tan(\beta) = \frac{d \times \psi}{2 \times dz}, \text{ звідси } \psi = \frac{2 \times \tan(\beta)}{d} \times dz \quad (5)$$

Проекції сил різання на осі x і y , визначаються по формулах:

$$dF_{x,j}(\varphi_j, z) = -dF_{t,j} \cos \varphi_j(z) - dF_{r,j} \sin \varphi_j(z); \quad (6)$$

$$dF_{y,j}(\varphi_j, z) = dF_{t,j} \sin \varphi_j(z) - dF_{r,j} \cos \varphi_j(z).$$

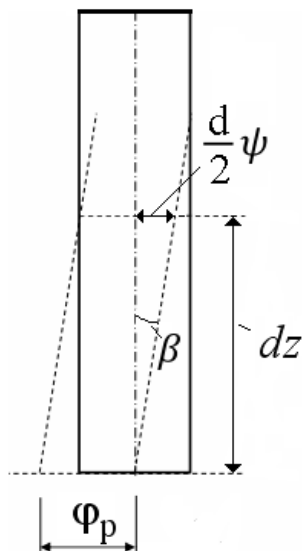


Рис. 5- Схема визначення кута запізнювання

Представлена аналітична методика використана при розробці програми динамічного моделювання сил різання при фрезеруванні в програмному середовищі Matlab. Програма робить динамічні розрахунки сил різання при різних дефектах ріжучих крайок фрези й дозволяє проводити спектральний аналіз сил різання з метою виявлення закономірностей зміни спектральних складових.

Вхідними параметрами для програми є кут нахилу гвинтової лінії, осьова глибина різання a , кількість ріжучих крайок, подача, частота обертання шпинделя, постійні коефіцієнти сили різання. У програмі проводиться розрахунок сил на кожному кроці повороту фрези $\Delta\varphi$ і осьовій відстані від вершини інструмента Δa . Вихідними параметрами програми є сили різання з урахуванням коефіцієнтів зношування інструмента і їх спектральний аналіз.

Отримані результати аналітичного розрахунку сил фрезерування з використанням програми динамічного моделювання при моделюванні різособистих дефектів ріжучих крайок кінцевої фрези показали гарну збіжність із результатами кінцево-елементного моделювання сил фрезерування при зниженні на 1-2 порядку часу розрахунку. Розроблена програма динамічного моделювання сил фрезерування при різних дефектах дозволить її використовувати в дослідженні динаміки шпинделя верстата й обліку впливу форм і власних частот коливань останнього на режими обробки й рівень вібрації системи «шпиндель – інструмент» обробки, що впливає на якість, ресурс верстата й стійкість інструмента.

Програма динамічного моделювання дозволить проводити дослідження вібродіагностичних ознак дефектів інструмента з урахуванням проходження корисного діагностичного сигналу через динамічну систему шпинделя, що дозволить вчасно розпізнавати дефекти й проводити заміну інструмента до його поломки.

Висновки. На підставі отриманих даних у результаті аналітичного розрахунку і КЕ - моделювання фрезерування, виявлене, що додатково введений коефіцієнт зношування в аналітичну модель дозволяє вірогідно відбивати фізико-механічні процеси, що відбуваються при фрезеруванні. Для багаторазового збільшення продуктивності розрахунку рекомендується використовувати при дослідженні динаміки системи «шпиндель-інструмент» запропоновану аналітичну модель і програму динамічного моделювання сил при фрезеруванні.

Список литературы:

- Altintas Y. A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills / Y. Altintas, P. Lee // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - 1998. - P. 684-692.
- Cempel C. Determination of vibration symptom limit value in diagnostics of machinery / C. Cempel // Maintenance management international. - № 5. - 1985. - P. 297-204.
- Jayaram S. Analytical stability analysis of variable spindle speed machining / S. Jayaram, S.G. Kapoor, R.E. Devor // ASME J. Eng. Indus. - 2000. - vol. 122. - pp. 391-397.
- Richard Y. Chiou Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning / Y. Chiou Richard, Y. Liang Steven // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2000. - № 40. - P. 114-118.
- Sastry S. Chatter stability analysis of the variable speed face-milling process / S. Sastry, S.G. Kapoor, R.E. Devor // ASME J.130. Eng. Indus. - 2001. - vol. - 123. pp. 753-756. Болсуновский С.А., Вермель В.Д. Методика и техническое оснащение оценки вибрационных характеристик системы «станок – приспособление – инструмент– деталь» в процессе скоростного фрезерования / С.А. Болсуновский, В.Д. Вермель // Научно-технический отчет ЦАГИ 2008 год: Сб. статей: Центральный Аэрогидродинамический Институт. Жуковский. - 2009. - 100 с. Ведмидь П.А. Программирование обработки в NX CAM / П.А. Ведмидь, А.В. Сулинов // М.: ДМК Пресс. - 2014. - 304 с..
- Нежебовський В. В. Технологічне забезпечення якості обробки зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів на операціях зубошліфування : автореф. дис. ... канд. техн. наук за спеціальністю 05.02.08 "Технологія машинобудування". – Одеса : ОНПУ, 2011.-21с.

References (transliterated)

- Altintas Y. A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills / Y. Altintas, P. Lee // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - 1998. - P. 684-692.
- Cempel C. Determination of vibration symptom limit value in diagnostics of machinery / C. Cempel // Maintenance management international. - № 5. - 1985. - P. 297-204.
- Jayaram S. Analytical stability analysis of variable spindle speed machining / S. Jayaram, S.G. Kapoor, R.E. Devor // ASME J. Eng. Indus. - 2000. - vol. 122. - pp. 391-397.
- Richard Y. Chiou Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning / Y. Chiou Richard, Y. Liang Steven // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2000. - № 40. - P. 114-118.
- Sastry S. Chatter stability analysis of the variable speed face-milling process / S. Sastry, S.G. Kapoor, R.E. Devor // ASME J.130. Eng. Indus. - 2001. - vol. - 123. pp. 753-756.
- Bolsunovskiy S.A., Vermel V.D. Metodika i tehni-cheskoe osnaschenie otsenki vibratsionnykh harakteristik sistemy «stanok – prispособlenie – instrument– detal» v protsesse skorostnogo

frezerovaniya / S.A. Bolsunovskiy, V.D. Ver-mel // Nauchno-tehnicheskii otchet TsAGI 2008 god: Sb. statey: Tsentralnyi Aerogidrodinamicheskii Institut. Zhukovskiy. - 2009. - 100 s.

7. Vedmid P.A. Programirovanie obrabotki v NX CAM / P.A. Vedmid, A.V. Sulinov // M.: DMK Press. - 2014. - 304 s..
8. Nezhebovskiy V. V. Tehnologichne zabezpechennya yakosti obrobki zubchastih kolls privodiv shahtnih konveEriv na operatsIyah zuboshlifuvannya : avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk za spetsial-

nIstyu 05.02.08 "TehnologIya mashinobuduvannya". – Odesa : ON-PU, 2011. – 21 s.

Поступила (received) 05.06.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Скоркін Антон Олегович (Скоркин Антон Олегович, Skorkin Anton Olegovich) – канд. техн. наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), м.Харків, E-mail: Andromeda862@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3032-8341>;

Кондратюк Олег Леонідович (Кондратюк Олег Леонидович, Kondratiuk Oleh Leonidovich) – канд. техн. наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), м. Харків, E-mail: kondr20071@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3263-0483>;

Старченко Олена Павлівна (Старченко Елена Павловна, Starchenko Olena Pavlovna) – заступник директора з навчальної роботи, Харківський радіотехнічний коледж, м. Харків, E-mail: Estarchenko79@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-7444-6668>;

Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна (Камчатная-Степанова Екатерина Валерьевна, Kamchatna-Stepanova Kateryna Valerevna) – інженер 1 категорії науково-дослідної частини Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: +38-067-733-4000; E-mail: katerina.ks@i.ua, ORCID: 0000-0001-7825-1238.

ШЕЛКОВОЙ А.Н., ФЕДЕНЮК Д.В., НАБОКА Е.В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВРАЩЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В статье проведен анализ подходов к механосборочному производству с низким уровнем серийности. Показано, что сборочный процесс является ключевым элементом, определяющим точность и себестоимость узла в целом. Определены задачи, которые необходимо решить для обеспечения высокоточной сборки без подгонки и селективного отбора с минимальными затратами на ее реализацию. Для реализации такого подхода необходимо синхронизировать процессы имитационного моделирования сборочного процесса с реальной сборкой и механической обработкой деталей, входящих в узел. При этом имитация сборки узла является центральной как с точки зрения формирования его свойств, так и с точки зрения формирования технологий сборки, механической обработки резанием и других технологических переделов. Предложен логико-лингвистический подход к разработке 3D модели процесса виртуальной сборки узла, основывающийся на моделировании типовых сборочных операций. В его основу положено решение задач логистики перемещений с использованием моделирования поворотов и переносов твердотельных конструкций. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о высокой схожести моделей и реальных сборочных процессов (степень расхождения по времени 3-8%, по энергозатратам 5-12%), что позволяет сделать выводы о высоком уровне адекватности моделей и методов моделирования реальной организационно-технологической среде.

Ключевые слова: мелкосерийная сборка, технологический процесс, 3D имитационное моделирование, длительность сборочного процесса.

ШЕЛКОВИЙ О.М., ФЕДЕНЮК Д.В., НАБОКА О.В.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОБЕРТАННЯ ДЕТАЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ МАШИНОБУДУВАННЯ

У статті проведено аналіз підходів до механоскладального виробництва з нижнім рівнем серійності. Показано, що складальний процес є ключовим елементом, що визначає точність і собівартість вузла в цілому. Визначено завдання, які необхідно вирішити для забезпечення високоточної збірки без підгонки та селективного відбору з мінімальними витратами на її реалізацію. Для реалізації такого підходу необхідно синхронізувати процеси імітаційного моделювання складального процесу з реальною складанням і механічною обробкою деталей, що входять в вузол. При цьому імітація складання вузла є центральною як з точки зору формування його властивостей, так і з точки зору формування технологій складання, механічної обробки різанням та інших технологічних переділів. Запропоновано логико-лінгвістичний підхід до розробки 3D моделі процесу віртуального складання вузла, який базується на моделюванні типових складальних операцій. В його основу покладено рішення задач логістики переміщень з використанням моделювання поворотів і переносів твердотільних конструкцій. Отримані результати моделювання свідчать про високу схожості моделей і реальних складальних процесів (ступінь розбіжності за часом 3-8%, за енерговитратами 5-12%), що дозволяє зробити висновки про високому рівні адекватності моделей і методів моделювання реальної організаційно-технологічного середовища.

Ключові слова: дрібносерійна збірка, технологічний процес, 3D імітаційне моделювання, тривалість складального процесу.

SHELKOVY A.N., FEDENYUK D.V., NABOKA E.V.

MATHEMATICAL MODEL OF WRAPPED DETAILS IN THE PROBLEMS OF THE IMPACT MODEL-BATHROOM OF FOLDING OPERATING MACHINE

The article conducted an analysis of the approach to the mechanical storage unit with the lowest level of service. It is shown that a folding process is a key element, and it is a sign of accuracy and a part of a plant as a whole. It's marked the beginning, as needed for the liver of a high-frequency zbirka without the selection and selective selection with a minimum window for realization. For realizing this kind of logic, you need to synchronize the process of the simulation model of the warehouse process with the real folding and mechanical processing of parts, which should be included in the unit. At the same time, the folding of the node is central to the central point of formality of power, so the point of horizontal form of technological folding, mechanical processing of the previous technology. Logged-in linguistic identification was pre-developed before the development of a 3D model for the process of virtual folding of a node, which is based on a model of typical warehouse operations. The foundation is laid on the solution of the tasks of logic logistics to the model of turning and transferring solid constructions. Discriminate the results of the model to talk about the likeness of the models and the real folding processes (step 3-8% after an hour, 5-12% after energy consumption), allowing you to select a higher model for real models. -technological environment.

Key words: other serial, technological process, 3D simulation model, trivial storage process.

1. Вступ. При випуску високоточних виробів малими партіями необхіден підхід до формування як технології складання виробу, так і до технології формоутворення деталей (ТФД), з яких воно збирається, який полягає в тому, що паралельно з формоутворенням деталей повинен реалізуватися віртуальний складальний процес виробу (ВСПВ), в якому можуть бути присутніми як реальні розміри вже виготовлених деталей, так і віртуальні розміри поверхонь деталей, які належить ще створити. ВСПВ повинен допомогти вирішити три завдання: 1) контролювати рівень збирання вузла з урахуванням розмірів поверхонь вже виготовлених деталей; 2) періодично дозволяти коригувати розмірні ланцюги з

урахуванням вже виготовлених деталей для розмірів поверхонь деталей, які збираються виробити; 3) передавати в черговий ТФД перелічені розміри у вигляді налаштованих з метою коригування керуючих програм обробних центрів або верстатів з ЧПУ.

2. Аналіз останніх досліджень й публікацій.

Проекти за CALS-технологіями на засадах імітаційного моделювання в українському машинобудуванні перебувають у стадії зародження і є найпоширенішими тільки в авіабудуванні й суднобудуванні [1]. CALS-технології в транспортному машинобудуванні застосовуються ще дуже мало. Зокрема, на ВАТ «НБК «Уралвагонзавод» немає єдиної інформаційної системи, яка б керувала

життєвим циклом виробу, хоча й існують окремофункціонуючі системи керування персоналом, виробничого планування, цехового планування й обліку. Як основу реалізації CALS-технології в роботі пропонується використовувати мультиагентне ІМ.

Необхідною умовою впровадження CALS-технологій на великих підприємствах є складання структурної схеми, на якій відображаються основні елементи досліджуваної системи й зв'язки між ними у вигляді інформаційних, матеріальних, фінансових і інших потоків, включаючи опис виробничо-технологічних, логістичних і бізнес-процесів. Уява роботи підприємства у вигляді імітаційної моделі допоможе особі, що ухвалює рішення (ОУР), провести аналіз «Що, якщо», програти різні сценарії розвитку поточної ситуації й одержати додаткову інформацію для прийняття рішень.

Для моделювання виробничих процесів існують системи ІМ, такі як Arena, eM-Plant, Simul8, AnyLogic, BPsim.MAS [1]. За основні критерії порівняння середовищ імітаційного моделювання візьмемо критерії, які запропоновані Edwin C. Valentin та Alexander Verbraeck в роботі [1] з погляду кінцевого користувача і його можливостей розробки моделі для своєї предметної області й подальшого застосування, доробки та експлуатації нових модельних конструкцій (компонент, фрагментів моделей або бібліотек користувача).

3. Ціль дослідження. З урахуванням особливостей процесів автоматизації українського машинобудування і з метою формулювання вимог до нової системи планування та технологічної підготовки виробництва, сформульовано наступні задачі:

- підтримка стандартів CALS-технологій;
- інтеграція моделей з інформаційними системами підприємства;
- аналіз завантаження устаткування;
- оптимальний розподіл ресурсів між підрозділами;
- моделювання складних ситуацій (паралельні й альтернативні маршрути виготовлення й обробки виробів);
- створення мультиагентних моделей (програмні інтелектуальні агенти потрібні для формалізації моделей ОУР, що брала участь у керуванні й плануванні виробництвом).

4. Викладення основного матеріалу.

При уявній простоті такого підходу до формування ТФД, в його реалізації є ряд труднощів:

- послідовність реальної складання виробу повинна строго збігатися з послідовністю ВСПВ, від цього залежить, в якій послідовності можна виготовляти деталі, що входять у вузол так, щоб укластися в допуск на розмір останнього у ланки складальної ланцюга;

- в складальні розмірні ланцюги входять не всі розміри деталей, а тільки їх частина; для формування цих розмірів у ТФД існують операції і переходи, якими потрібно управляти при налагодженні верстата;

- на відміну від існуючих ТФД, для яких

характерне формоутворення деталей, що входять в один вузол, паралельне без зв'язку один з одним, для ТФД з ВСПВ існує чітка ієрархія виготовлення деталей, в якій деталь, що стоїть нижче в ієрархії, не може бути виготовлена паралельно або раніше деталі, що стоїть вище за неї;

- формування ієрархії деталей, що підлягають обробці і визначення моментів часу, коли можна запускати ТФД так само є непростим завданням, в якому сходяться як технологічні, так і організаційні проблеми підвищення продуктивності обробки при збереженні 100% гарантії збирання вузла.

- розрахунок конструкторських і технологічних розмірних ланцюгів перетворюється не в одноразовий акт, а повторюється в міру формування реальних розмірів деталей, при цьому можливо їх коригування в залежності від результатів обробки в попередніх ТФД.

Складальні операції машинобудівного виробництва представляють собою дуже складний об'єкт для вивчення, аналізу та моделювання. Це пов'язано з тим, що складальні операції на підприємстві передбачають рішення цілого комплексу проблем, що погано піддаються строгому математичному опису організаційного, економічного, технічного, соціально-психологічного характеру. У таких умовах перспективним методом рішення задач представляє використання методів імітаційного моделювання. [1]

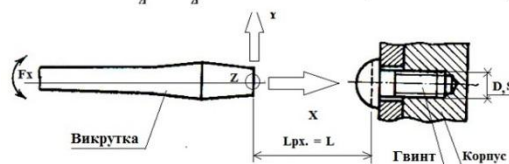
Метод імітаційного моделювання – це один з найбільш ефективних методів вивчення функціонуючих і знову створюваних об'єктів будь-якої природи й ступеня складності. Сутність цього методу полягає в побудові імітаційної моделі досліджуваного об'єкта, й у цілеспрямованому експериментуванні із цією моделлю для вивчення поведінки в різних умовах.

Розглянемо побудову бази знань про взаємодії в системі складання при виконанні основних (рис. 1) і допоміжних операцій (рис. 2).

Типовий складальний технологічний перехід

Завинтити винт діаметром <...> мм. с різьбою шагом <...> мм. отверткой на длине <...> мм.

$$\begin{aligned} \exists_{\substack{u_1 \\ A}} \exists_{\substack{u_2 \\ A}} [(u_1 \xrightarrow{b} u_2) \Rightarrow (u_1 \prec u_2)] \\ \exists_{\substack{u_1 \\ A}} \exists_{\substack{u_2 \\ A}} [(u_2 \text{ — } (u_1) \Rightarrow (u_1 \prec u_2)] \end{aligned}$$



Макрос:

Завинтити Отверткой
Винт с резьбой S= <S> мм,
на длине L= <L> мм.,
диаметром D= <D> мм.

Програмовий блок:

Привязка, Винт, Отвертка
Одновременно, 2
Сдвиг, Отвертка, <L>, 0, 0, V=f(D,S), N=f(D,S)
Поворот, Отвертка, <L/S>, 0, 0, V=f(D,S), N=f(D,S)
Привязка, Винт, Корпус

Рис. 1. Приклад запису співвідношення між предикативним описом основного переходу "Загвинчування гвинта" і його лінгвістичним віддзеркаленням у вигляді макросу

Це дозволяє сформувати бібліотеку знань про характеристики і способи взаємодії елементів системи складання. Для вирішення цього завдання необхідно розробити лінгвістичні засоби відображення в інтерфейсах програмної системи логічних тверджень.

Математична модель системи тривимірного імітаційного моделювання виробничих систем складання вузлів. Передусім, система була побудована на тривимірному зображенні взаємодії її

елементів. Для цього необхідно було сформувати опис:

- тривимірних твердотілих моделей елементів СДС;
- систем координат елементів модельованої системи;
- параметрів кольору елементів моделі;
- приналежності елементу до спільної структури моделі.

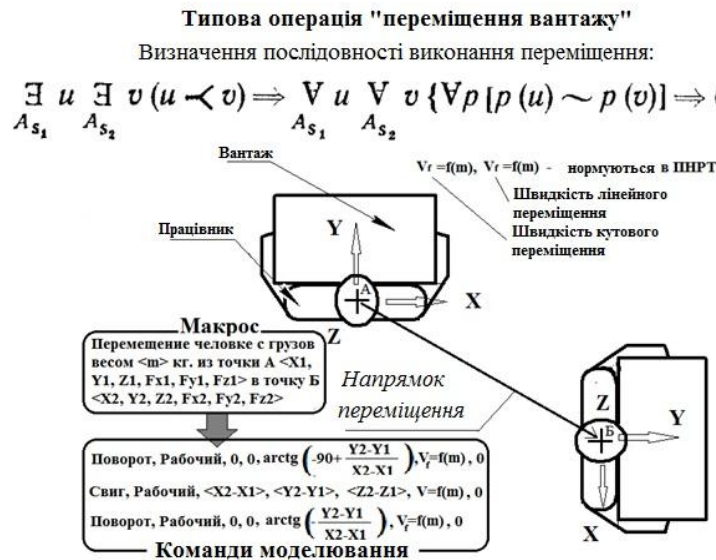


Рис. 2. Приклад запису співвідношення між предикативним описом допоміжного переходу "Переміщення вантажу" та його лінгвістичним відображенням у вигляді макросу

Імітаційне моделювання є універсальним методом, який забезпечує як точний аналіз, так і візуальне представлення альтернативних варіантів управлінської поведінки.

Для побудови інформаційної моделі процесу складання вузлів, розглядаються будь-які впорядковані пари деталей. Інформаційні моделі представляють собою задачі проектування у вигляді послідовності математичних задач проектування інформації із зазначенням для кожного завдання початкових і кінцевих даних у великих кількостях. Інформаційна модель дозволяє розглянути порядок перетворення інформації при рішенні задач. Кожен етап перетворення в інформаційній моделі представляє декартові добутки, що означає необхідність визначення умов (функцій, процедур) формування підмножин з елементів розглянутих декартових добутків.

Інформаційна модель дозволяє виявити основні математичні категорії задач (множини й наявність відносин). Таким чином, інформаційна модель стає необхідним етапом для побудови формальної схеми

розв'язку поставленої задачі. Задача узгодження алгоритмів роботи окремих складальних ділянок з урахуванням тимчасових співвідношень, що характеризують їхню реалізацію в системі складування, у моделі вирішена за допомогою введення проміжних станів обладнання, тривалості переходів між якими існує та сама величина відрізка часу для всіх елементів системи складання.

Для розв'язку задачі переміщення й обертання виробів на кожному етапі складання й визначення кінцевої точки положення виробу в тривимірному просторі використовуються рівняння кватерніонів (рис. 3).

Кватерніони були вперше введені в 1849 році. Вільямом Гамільтоном. Кватерніони є розширенням комплексних чисел (які, у свою чергу, є розширенням речовинних чисел). Як відомо, довільне комплексне число $c \in \mathbb{C}$ складається з дійсної й уявної частин:

$$c = x + iy.$$

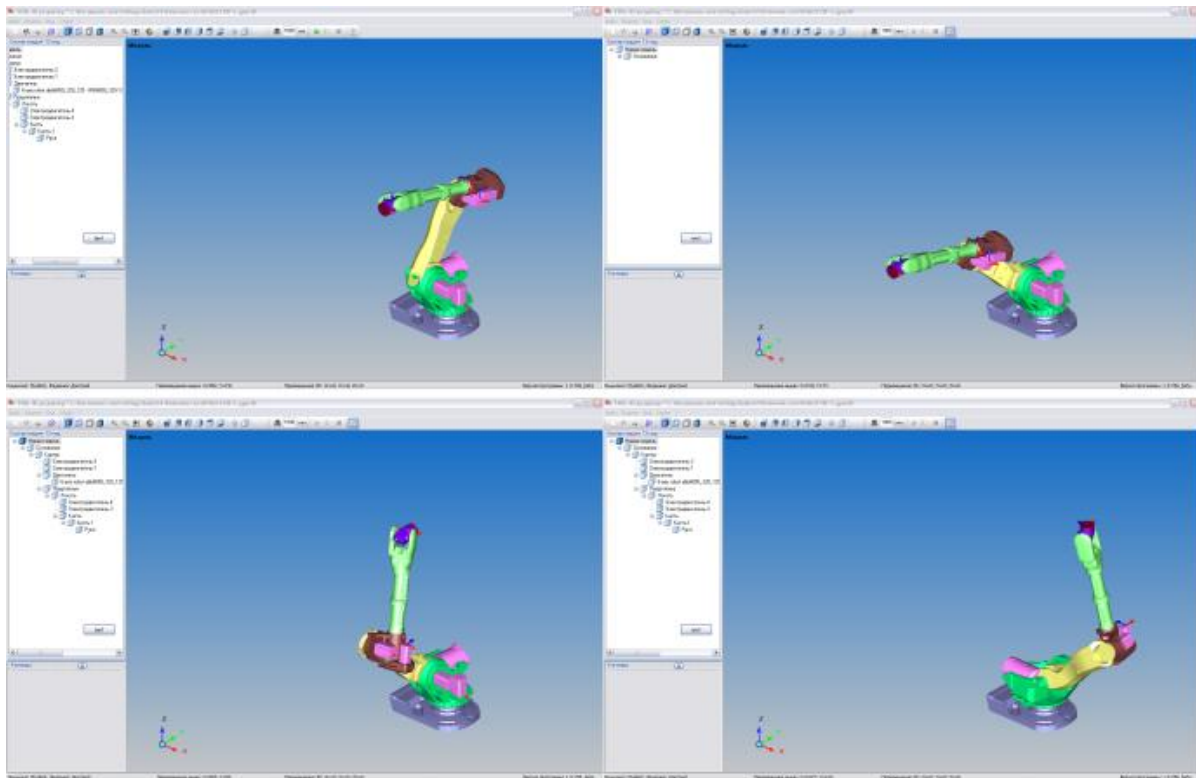


Рис. 3. Послідовність обертів на основі кватерніонів

Тут через i позначена так звана уявна одиниця – число, квадрат якого рівний -1 (тобто $i^2 = -1$). Комплексні числа є розширенням безлічі речовинних чисел, і довільний багаточлен ступені n має рівно n комплексного корінь (з урахуванням кратності). Так, багаточлен $z^2 + 1$ не має жодного речовинного кореня, але два комплексні – i та $-i$. Три, позначувані як i , j та k . Тим самим довільний кватерніон (що також складається з дійсної й уявної частин) може бути представлений у наступному виді:

$$q = w + ix + jy + kz.$$

Тут w – це дійсна частина кватерніона, а x , y , z – його уявна частина.

Послідовне застосування обертів, що задаються одиничними кватерніонами q_1 і q_2 , відповідає повороту за допомогою кватерніона, що виявляє добутком q_1 і q_2 :

$$q_2 \cdot (q_1 \cdot [0, p]) \cdot q_1^{-1} \cdot q_2^{-1} = (q_2 \cdot q_1) \cdot [0, p] \cdot (q_2, q_1)^{-1}.$$

Для одиничного кватерніона q виходить відповідна йому матриця повороту:

$$R(q) = \begin{pmatrix} 1 - 2(y^2 + z^2) & 2(xy - wz) & 2(xz + wy) \\ 2(xy + wz) & 1 - 2(x^2 + z^2) & 2(yz - wx) \\ 2(xz - wy) & 2(yz + wx) & 1 - 2(x^2 + y^2) \end{pmatrix}.$$

Імітаційне моделювання процесу складання

виробів машинобудування здійснюється в системі GPS 3D.

Обертання виробів (моделей) у просторі побудоване на рівняннях кватерніонів. Послідовність перетворень обертів має вигляд (мал.1):

$$R(q_1) \cdot R(q_2) \cdot \dots \cdot R(q_n).$$

У такий спосіб застосування рівнянь кватерніонів у задачах складання виробів машинобудування, дозволяють визначити кінцеве положення виробу в тривимірному просторі, при різноманітних обертах проміжних вузлів.

Висновки. При випуску високоточних виробів малими партіями необхіден підхід до формування як технології складання виробу, так і до технологій формоутворення деталей (ТФД), з яких воно збирається, який полягає в тому, що паралельно з формоутворенням деталей повинен реалізуватися віртуальний складальний процес виробу (ВСПВ), в якому можуть бути присутні як реальні розміри вже виготовлених деталей, так і віртуальні розміри поверхонь деталей, які належить ще створити. Проекти за CALS-технологіями на засадах імітаційного моделювання в українському машинобудуванні перебувають у стадії зародження і є найпоширенішими тільки в авіабудуванні й суднобудуванні. Необхідною умовою впровадження CALS-технологій на великих підприємствах є складання структурної схеми, на якій відображаються основні елементи досліджуваної системи й зв'язки між ними у вигляді інформаційних, матеріальних,

фінансових і інших потоків, включаючи опис виробничо-технологічних, логістичних і бізнес-процесів. З урахуванням особливостей процесів автоматизації українського машинобудування і з метою формулювання вимог до нової системи планування та технологічної підготовки виробництва, в статті сформульовано низку задач імітаційного моделювання складальних процесів. Визначені види моделей віртуального виробництва і запропоновані способи їхньої реалізації. Це дозволило створити віртуальне інтегроване середовище, в якому з великою точністю можна відтворити та дослідити різні за своїм характером складальні процеси.

Список літератури:

1. Шелковой А., Ключко А., Набока Е. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства / Авторы: Шелковой А., Ключко А., Набока Е. - Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528 с.
2. Боресков А. В. Программирование компьютерной графики. Современный OpenGL. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 211 с.
3. Kuipers, Jack B., Quaternions and rotation sequences : a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality, 1999. - 321 с.
4. Шелковий О.М., Феденюк Д.В. Постановка задачі підвищення ефективності систем механо-складального виробництва на основі тривимірного моделювання // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2010. - №24. - С.95 -111.
5. Соломенцев Ю. М. Моделирование технологической среды машиностроения / Ю. М. Соломенцев, В. В. Павлов. – М. : МГТУ «Станкин», 1994. – 104 с.
6. Ямпольский Л. С. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах / Л. С. Ямпольский, М. Н. Полищук. – Киев : Техника, 1988. – 175 с.
7. Соломенцев Ю. М. Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, В. В. Павлов, Л. В. Рыбаков. – М. : Наука, 2003. – 292 с.
8. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления / Д. А. Поспелов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 232 с.
9. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахаха. – М. : Мир, 1973. – 344 с.
10. Маливицкий В. И. Система имитационного моделирования дискретных процессов / В. И. Маливицкий, Е.М. Сурхов. – Київ : Вища шк., 1981. – 96 с.
17. . Shelkovej A., Klochko A., Naboka E. Imitacionnoe modelirovanie v zadachakh mekhanosborochного proizvodstva /Avtory: Shelkovej A., Klochko A., Naboka E. - Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528 s.
18. Borekov A. V. Programirovanie komp'yuternoy grafiki. Sovremennyy OpenGL. – M.: DMK Press, 2019. – 211 s.
19. Kuipers, Jack B., Quaternions and rotation sequences : a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality, 1999. – 321 s.
20. Shelkovij O.M., Fedenyuk D.V. Postanovka zadachi`pi`dvishheniya effektivnosti` sistem mekhanoskladalnogo virobnicztva na osnovi`trivim`rnogo modelyuvannya //Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhnichnogo uni`versitetu "Kharki`vs`kij poli`tekhnichnij i`nstitut": Zbi`rka naukovikh pracz`.. - Kharki`v: NTU "KhPI". - 2010. - #24. - S.95 -111.
21. Solomenczev Yu. M. Modelirovanie tekhnologicheskoy sredy` mashinostroeniya / Yu. M. Solomenczev, V. V. Pavlov. – M. : MGTU «Stankin», 1994. – 104 s.
22. Yampol'skij L. S. Optimizaciya tekhnologicheskikh processov v gibkikh proizvodstvenny`kh sistemakh / L. S. Yampol'skij, M. N. Polishhuk. – Kiev: Tekhnika, 1988. – 175 s.
23. Solomenczev Yu. M. Informacionno-vy`chislitel`ny`e sistemy` v mashinostroenii CALS-tekhnologii / Yu. M. Solomenczev, V. G. Mitrofanov, V. V. Pavlov, L. V. Ry`bakov. – M. : Nauka, 2003.
24. Pospelov D. A. Logiko-lingvisticheskie modeli v sistemakh upravleniya / D. A. Pospelov. – M. : E`nergoizdat, 1981. – 232 s.
25. Mesarovich M. Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevny`kh sistem / M. Mesarovich, D. Mako, I. Takakhara. – M. : Mir, 1973. – 344 s.
26. Maloviczkij V. I. Sistema imitacionnogo modelirovaniya diskretny`kh processov / V. I. Maloviczkij, E.M. Surkhov. – Kiyiv : Vishha shk., 1981. – 96 s.

References (transliterated)

Поступила (received) 05.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шелковий Олександр Миколайович – доктор технічних наук, завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування імені М.Ф. Семка, верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-096-92-34-980; e-mail: alnikshelk@gmail.com, ORCID iD 0000-0002-7414-4854

Феденюк Дмитро Віталійович (Феденюк Дмитрій Витальєвич, Fedenyuk Dmitry Vitalievich) – зам. начальника цеху Павлоградського хімічного заводу, м. Павлоград; тел.: +38-096-92-34-980; e-mail: alnikshelk@gmail.com

Набока Олена (Набока Олена Володимирівна, Набока Елена Владимировна) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (050) 986-50-27; e-mail: namirauza@gmail.com, ORCID iD 0000-0003-3997-5481.

ЗМІСТ

<i>Гасанов М.И., Волошин А.И., Клочко А.А., Бабенко М.В.</i> Влияние технологического воздействия на обеспечение эксплуатационных свойств восстановленных крупно модульных зубчатых колес на основе применения комплексных параметров их состояния	3
<i>Новиков Ф. В., Полянский В. И.</i> Закономерности управления тепловыми процессами при механической обработке	12
<i>Сергеев А. С.</i> Обоснование эффективности применения абразивной обработки для уменьшения шероховатости поверхности.....	19
<i>Мироненко Е.В., Ковалев В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В.</i> Технологическая система механической обработки блочно-модульным инструментом	25
<i>Березовський Д.О., Клочко Ю.О., Грущин С.С., Колесник М.Е.</i> Управління за результатами як ефективна концепція розвитку менеджменту машинобудування в Україні.....	31
<i>Іванова Л. П.</i> Аналіз теплового стану технологічних рідин металорізальних верстатів.....	36
<i>Фесенко А.В., Ушаков А.Н., Евсюкова, Ф.М., Слипченко С.Е.</i> Выбор усилия резания при получении заданных параметров шлифования	41
<i>Березуцкий В. В., Хондак И. И., Березуцкая Н. Л., Халиль В. В.</i> Анализ вентиляции при сварке с использованием электродов с основным типом покрытия	49
<i>Новік М.А., Юрчишин О.Я.</i> Розробка і дослідження зусилля затиску і крутного моменту безкамерного затискного патрона	55
<i>Скоркін А.О., Кондратюк О.Л., Старченко О.П. Камчатная-Степанова Е.В.</i> Дослідження впливу технологічних режимів фрезування на рівень вібрації шпиндельного вузла обробного центру	59
<i>Шелковой А.Н., Феденюк Д.В., Набока Е.В.</i> Математическая модель вращения деталей в задачах имитационного моделирования сборочны... операций машиностроения	65

CONTENTS

Hasanov M.I., Voloshin A.I., Klochko A.A., Babenko M.V. The influence of technological impact on ensuring the operational properties of restored large-modular gears based on the use of complex parameters of their condition	3
Novikov F. V., Polyansky V. I. Patterns of control of thermal processes during machining	12
Sergeev A. S. Justification of the effectiveness of the use of abrasive treatment to reduce surface roughness	19
Mironenko E.V., Kovalev V.D., Vasilchenko Y. V., Shapovalov M.V. The technological system of machining block-modular tool.....	25
Berezovsky D.O., Klochko Y.O., Grushchin S.S. Results management as an effective concept for the development of mechanical engineering management in Ukraine	31
Ivanova L.P. Analysis of the thermal state of technological fluids of metal-cutting machines	36
Fesenko A.V., Ushakov A.N., Evsyukova, F.M., Slipchenko S.E. The choice of cutting force when obtaining the specified grinding parameters.....	42
Berezutsky V.V., Hondak I.I., Berezutskaya N.L., Khalil V.V. Analysis of ventilation during welding using electrodes with the main type of coating	49
Novik M.A., Yurchyshyn O.Y. Development and research of clamping force and torque of tubeless chuck	55
Corkin A.O., Kondratyuk O.L., Starchenko O.P., Kamchatnay-Stepanova E.V. Investigation of the influence of technological milling modes on the vibration level of the spindle assembly of the machining center	59
Shelkovoy A.N., Fedenyuk D.V., Naboka E.V. A mathematical model of the rotation of parts in the problems of simulation of assembly operations of mechanical engineering.....	65

ДЛЯ НОТАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

Збірник наукових праць

№ 1 '2020

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: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра технології машинобудування та металорізальні верстати
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: oleksandr.klochko@khpі.edu.ua

Підп. до друку 22.06.2020 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. № 23.
Ціна договірна.

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