

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(5)'2022

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

No. 1(5)'2022

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2022

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2022

**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», 2022 — № 1(5). — 94 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.

**Свідчення 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* включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», категорія «Б» (наказ МОН України № 409 від 17.03.2022 р.).

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

Дмитриєв 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

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 философии,  
Технический университет Кошице, Словакия

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 «Політех»,  
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

Klochko O.O., prof. NTU "KhPI", Ukraine

Kovalov V.D., professor, DDMA, Ukraine

Larshin V.P., prof., ONPU, Ukraine

Mironenko E.V., professor, DDMA, Ukraine

Naboka O.V., Ph.D. sciences, NTU "KhPI", Ukraine

Michel Ballol, Associate Professor, Doctor of Philosophy,  
Technical University of Kosice, Slovakia

Pasichnik V.A., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Stalinsky D.V., prof., DP UkrSTC

ENERGOSTAL, Ukraine

Stepanov M.S., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Stupnitsky V.V., prof., Lvivska Politeha, Ukraine

Fadeev V.A., professor, PAT "FED", Ukraine

Khavin G.L., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 3 від 29 квітня 2022р.

**КЛИМЕНКО С.А., МАНОХІН А.С., ЧУМАК А.О., КЛИМЕНКО С.Ан.,  
КОПЕЙКІНА М.Ю., САЛЕНКО О.Ф.**

### **МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ЗОНИ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ**

У статті розглядаються результати моделювання напружено-деформованого та теплового стану зони різання при торцевому фрезеруванні загартованої сталі інструментом, оснащеним полікристалічним надтвердим композитом на основі кубічного нітриду бору. Показано вплив зміцнення поверхневого шару обробленого матеріалу, характерний для різних проходів різального інструменту, на сили різання, усадку стружки, довжину контакту стружки з передньою поверхнею інструменту. Досліджено зв'язок нестационарного характеру обробки з візнаннями кожного з лез інструменту та виходом з зони різання з наявністю періодів наростання температури різання та охолодження різального інструменту.

**Ключеві слова:** торцеве фрезерування, PcBN, загартована сталь, напружено-деформований та тепловий стан зони різання.

**KLIMENKO S.A., MANOKHIN A.S., CHUMAK A.O., KLIMENKO S.An., KOPEIKINA M.YU, SALENKO O.F.  
SIMULATION OF THE STATE OF THE CHIP FORMATION ZONE DURING FACE MILLING OF HARDENED STEEL**

The article considers the results of modeling the stress-strain and thermal state of the cutting zone during face milling of hardened steel with a tool equipped with polycrystalline superhard composite based on cubic boron nitride. The influence of strengthening the surface layer of the processed material, characteristic for different passes of different tools, on the cutting forces, shrinkage of chips, the length of contact of chips with the front surface of the tool is shown. The connection of non-stationary nature of machining with incisions of each of the tool blades and exit from the cutting zone with the presence of periods of increase in cutting temperature and cooling of the cutting tool has been studied.

**Keywords:** face milling, PcBN, hardened steel, stress-strain and thermal state of the cutting zone.

**Вступ.** Фрези з різальними елементами з [1] є другим за вживаності типом інструменту, який ефективно використовується для обробки сталей високої твердості [2].

Кінематика процесу фрезерування обумовлює особливості контактної взаємодії в зоні різання між робочими ділянками передньої та задньої поверхонь інструменту, стружкою та поверхнею різання на виробі, що оброблюється.

В зоні різання має місце циклічне термобаричне навантаження інструменту, що обумовлює досить значний термін часу до виходу системи на стабільну роботу.

Це пов'язане зі зміною механічних властивостей оброблюваного матеріалу під дією термобаричного навантаження, яке циклічно їх змінює, що обумовлює поступове зростання як сил різання, так і температури різання при переході від робочого елемента фрези, який працює

у конкретний момент часу, до наступного робочого елемента інструменту. Відмічене обумовлює відмінності у напружено-деформованому та тепловому стані зони різання та інструменту, його працездатності та вихідних показниках процесу обробки.

При цьому, потрібно відмітити, що значний вплив на кількісні показники, що характеризують контактні процеси у зоні обробки, мають властивості матеріалу, яким оснащений різальний інструмент.

Метою даної роботи було дослідження стану зони стружкоутворення при фрезеруванні загартованої сталі інструментом, оснащеним PcBN, з різними умовами тертя між матеріалами оброблюваного виробу та інструменту.

**Методика досліджень.** Дослідження виконувались шляхом кінцево-елементного моделювання з використанням багатопільового кінцево-елементного розрахункового пакету Deform-2D.

При моделюванні використана поширена модель Джонсона-Кука, яка описує поведінку матеріалу, що деформується:

$$\sigma_s = \left( A + B \cdot (\varepsilon^p)^n \right) \cdot \left( 1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^p \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right]$$

де  $\sigma_s$  – поточна величина межі плинності;  $\varepsilon^p$  – величина інтенсивності пластичних деформацій;  $\dot{\varepsilon}^p$  – інтенсивність швидкості пластичних деформацій;  $T$ ,  $T_m$ ,  $T_r$  – поточна температура, температура плавлення і температур навколишнього середовища відповідно;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$ ,  $m$  – емпіричні коефіцієнти.

Для завдання коефіцієнтів визначального рівняння використано дані роботи [3] для сталі AISI 52100 (53 HRC), яка за хімічним складом і твердості відповідає загартованій сталі ШХ15:  $A = 821,9$  МПа;  $B = -72,1$  МПа;  $C = 0,13$ ;  $n = -0,419$ ;  $m = 1,13$  (коефіцієнти отримані інтерполяцією даних, що надані в базі матеріалів Deform-2D).

При вирішенні пов'язаної термомеханічної завдання граничні умови склалися в жорсткому закріпленні опорної поверхні заготовки і переміщенні абсолютно-жорсткого інструменту уздовж осі X заготовки з постійною швидкістю  $v$ , глибиною різання (в даному випадку дорівнює товщині зрізу) і шириною зрізу.

В ході розрахунку вирішується термомеханическая завдання з урахуванням теплопровідності матеріалів інструменту і заготовки. Довжина шляху різання – 0,75 мм.

Умови обробки, теплофізичні та механічні характеристики матеріалів представлені в табл. 1, 2. Схема процесу різання та адаптивна розбивка моделі оброблюваного зразка та інструменту на елементи в зоні контакту наведено на рис. 1.

Моделювання здійснюється при умові припущення про плоско-деформований стан, умовна ширина моделі (ширина зрізу) є одиничною і дорівнює 1 мм.

Геометричні розміри модельованих тел вибиралися пропорційно товщині зрізу. Моделювання виконувалося в 2D постановці з абсолютно жорстким інструментом, довжина моделі заготовки – 0,13 мм; висота – 0,15 мм;

Табл. 1 – Умови обробки

Інструмент	$v$ , м/мин	$a$ , мм	$t$ , мм	$\gamma$	$\alpha$	$r$ , мкм	К-т тертя з обр. матеріалом
PcBN	200	0,02	1	0°	10°	10	0,5

Табл. 2 – Теплофізичні та механічні властивості матеріалів

Матеріал	$T_{пл}$ , °C	$C_m$ , Дж/кг·K	$\lambda$ , Вт/м·K	$E$ , ГПа	$\nu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
PcBN	–	720	100	780	0,17	3400
Сталь ШХ15	1480	642	40	204	0,3	7800

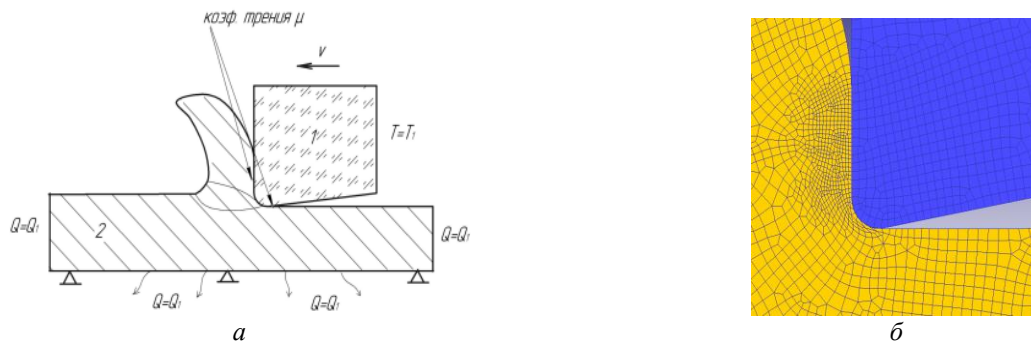


Рис. 1 – Схема процесу різання (а), розбивка моделі оброблюваного зразка та інструменту на елементи в зоні контакту (б)

Параметри моделі різця: довжина – 1,0 мм; висота – 0,24 мм; характерний розмір мінімальних елементів моделі різця 0,024 мм (в області різальної кромці розбивка дрібніша – 0,0038 мм); характерний розмір мінімальних елементів моделі заготовки: 0,022 мм (0,0012 в зоні контакту) (рис. 1, б).

**Результати досліджень.** На першому етапі досліджень вивчався вплив попередньої деформації зрізуваного шару оброблюваного матеріалу на характеристики пластичної деформації, напруження в поверхневому шарі оброблюваного зразка та сили різання. Вказане обумовлено тим, що середня товщина зрізуваного шару при випадку фрезерування, що розглядається, мала (10–20 мкм) і глибина, на яку розповсюджуються залишкові напруження при великих силах різання суттєво вище (до 100 мкм). Для урахування даного фактору модель передбачає реалізацію трьох послідовних проходів, на кожному з яких зрізується шар товщиною 20 мкм і після кожного проходу інструмент переміщується на товщину зрізу по осі Y. Для імітації імпульсного навантаження з наявністю проміжку часу  $\Delta t$  між врізаннями леза при фрезеруванні, довжина кожного проходу дорівнює подвоєній довжині заготовки.

При опису процесу різання прийнята модель тертя  $f_s = \min(\mu \cdot p, k \cdot m)$  (где  $k$  – межа плинності матеріалу на зсув;  $p$  – тиск;  $m$  – довільний коефіцієнт, для врахування інтенсивності фікційної взаємодії), яка найбільш наближена до реальності, і використовувалась в пропонованій серії чисельних експериментів при  $m = 0,6$  та  $\mu = 0,5$ , що пов'язано з необхідністю порівняння результатів розрахунку та експериментальних даних, а також оцінкою впливу на контактні характеристики моделі коефіцієнту тертя, як окремого фактору, трактуючи його в якості усередненої величини коефіцієнтів внутрішнього та зовнішнього тертя на ділянках пластичного та пружного контакту.

Як видно, границя плинності оброблюваного матеріалу  $\sigma_t$  інтенсивно зростає при збільшенні ступеню деформації оброблюваної сталі в межах від 0 до 1 при подальшій стабілізації цієї залежності. Температура різання і відповідно, розігріву зрізуваного шару зменшує границю плинності. Цей вплив найбільш помітний при високих температурах (700–1000 °C).

Границя плинності оброблюваного матеріалу з ростом ступеня його деформації, відповідно до моделі, що описує криву плинності, зростає. Найбільш інтенсивне зростання характерне для низьких температур. При підвищених температурах це проявляється в значно меншій мірі. Характерне зменшення межі плинності в діапазоні температур від 20 до 600 °С складає для ступеню деформації  $\epsilon$  від 1700 до 1150 МПа. Зростання цього параметру для температури 600 °С, що спостерігається при збільшенні ступеню деформації від 0 до 0,5, знаходиться в межах 740–1100 МПа.

Параметром який демонструє зміну умов різання, стан інструменту або при постійності цих параметрів, зміну властивостей оброблюваного матеріалу є величина складових сили різання. Визначимо дані показники в залежності від часу. З рис. 2 видно, що при врізанні інструменту спостерігається всплеск сили різання на рівні 10–11%, що відповідає перехідному процесу стружкоутворення з наростанням довжини контакту стружки з інструментом, на етапі, коли переміщення стружки вздовж передньої поверхні ще відсутнє.

В перші мілісекунди різання довжина контакту та усадка стружки вища у порівнянні зі квазісталім процесом обробки. Така закономірність спостерігається на кожному з проходів, при цьому на першому проході величини складових сили різання відрізняються від цих параметрів, визначених для проходів 2 та 3. Середні значення  $P_z$  на першому проході складає 78 Н, на подальших – 68 Н;  $P_y$  – 38 Н та 40 Н відповідно. Пояснення причин цього явища буде надано нижче при розгляді інших параметрів контактних явищ та характеристик деформації оброблюваного матеріалу.

Розглянемо такий параметр контактної взаємодії як усадка стружки  $\zeta$ , який характеризує деформацію в зоні зсуву та є одним з показників впливу коефіцієнту тертя на процес різання. На рис. 3 зображено корні стружок, які мають місце для різних проходів. Як і в попередньому випадку, дана контактна характеристика на першому проході ( $\zeta = 2,12$ ) суттєво відрізняється від подальших ітерацій процесу ( $\zeta = 1,78$ ) при товщині стружок відповідно 0,042 мм та 0,035 мм. Кут зсуву при цьому змінюється з  $25^\circ 10'$  до  $29^\circ 15'$ .

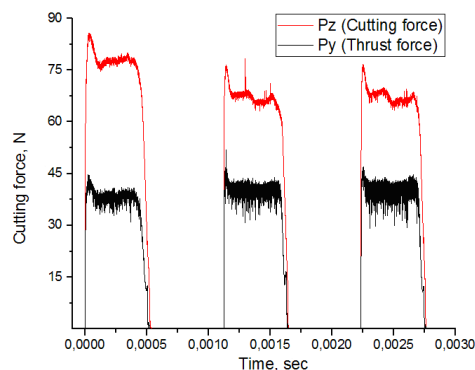


Рис. 2 – Складові сили різання, отримані у дослідженнях

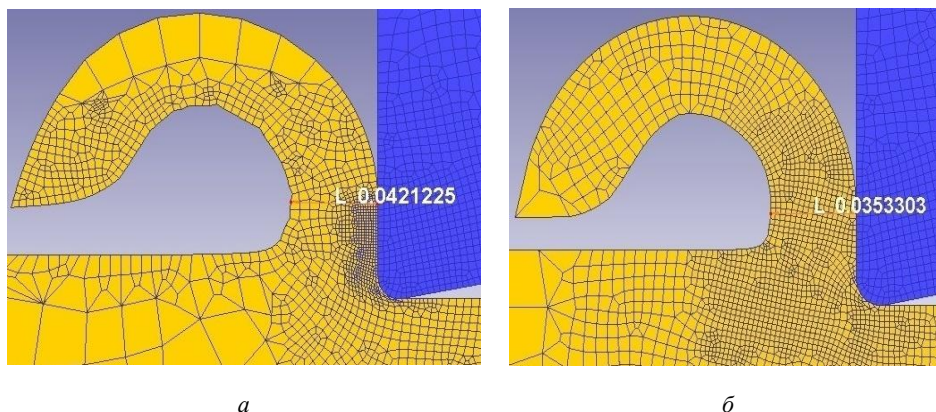


Рис. 3 – Корні стружок для першого (а) та третього (б) проходів

Довжина контакту стружки з передньою поверхнею різця змінюється при цьому дуже суттєво – від 0,034 мм до 0,023 мм після першого проходження інструменту. Розподіл величин контактних напружень вздовж робочої ділянки на передній поверхні за межами округленої частини різальної кромки приведено на рис. 4.

По відношенню нормальних та тангенційних напружень визначено залежність коефіцієнту тертя від відстані від різальної кромки. Як видно з аналізу графіків, коефіцієнт тертя не змінюється суттєво, хоча спостерігається зростання величин нормальних та тангенційних контактних напружень з 1,9 до 2,15 та з 0,8 до 1,06 ГПа відповідно.

Ступінь зміцнення оброблюваної поверхні будемо характеризувати ефективною деформацією матеріалу, яку визначимо в вертикальному перетині на відстані 0,1 мм за різальною кромкою різця на кожному з проходів. Вихідна деформація відсутня. Після першого та другого проходів ступінь деформації на поверхні (максимальній) дорівнює 0,36, збільшуючись до 0,48 після третього проходу. Зона, на яку розповсюджуюється суттєве зміцнення по глибині, зростає з кожним проходом, досягаючи на третьому проході величини 0,2 мм. При встановленні для моделювання товщини зрізу 20 мкм, для першого проходу глибина, що відповідає  $\varepsilon = 0,2$  складає 36 мкм, після другого та третього – 42 та 60 мкм. Зміцнення поверхневого шару обробленого матеріалу є причиною зміни величин сил різання, як це показано на рис. 5.

Оскільки глибина зміцнення достатньо висока, весь шар матеріалу, що зрізується після першого проходу вже має механічні властивості, що відрізняються від вихідних механічних характеристик поверхневого шару оброблюваної сталі. Так при ступені ефективної деформації 0,5, границя міцності сталі зростає з 770 до 1100 МПа. Вказане приводить до зростання ефективних напружень в матеріалі, що деформується в зоні різання, що вочевидь повинно було б збільшувати сили різання. На практиці, як вже відмічалось, спостерігається зниження величин даного параметру. Пояснення цього факту полягає в тому, що при зміцненні та зменшенні пластичності оброблюваного матеріалу зростає кут зсуву та суттєво зменшується усадка стружки, при цьому вплив зміцнення менш інтенсивний у порівнянні з впливом збільшення кута зсуву, що супроводжується зменшенням довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструменту.

Надати характеристику зміцненню можна також у горизонтальному перетині на рівні 10 мкм від поверхні (середина товщини зрізу) (рис. 6). Наростання ступеню деформації відбувається в зоні опережаючої волни деформації на відстані 60 мкм, на відстані 30 мкм  $\varepsilon$  вже дорівнює 0,35, досягаючи 1,2 та 1,8 в зоні зсуву та в приконтактній зоні (рис. 6, а). Характеристика деформації підповерхневого шару після третього проходу на цій глибині складає  $\varepsilon = 0,27$  (рис. 6, б). Нестационарний характер обробки з врізаннями кожного з лез інструменту та виходом з зони різання обумовлює наявність періодів наростання температури різання та охолодження різального інструменту. Характер імпульсів температурного навантаження на лезо інструменту, які характеризують термічні удари, зображено на рис. 7.

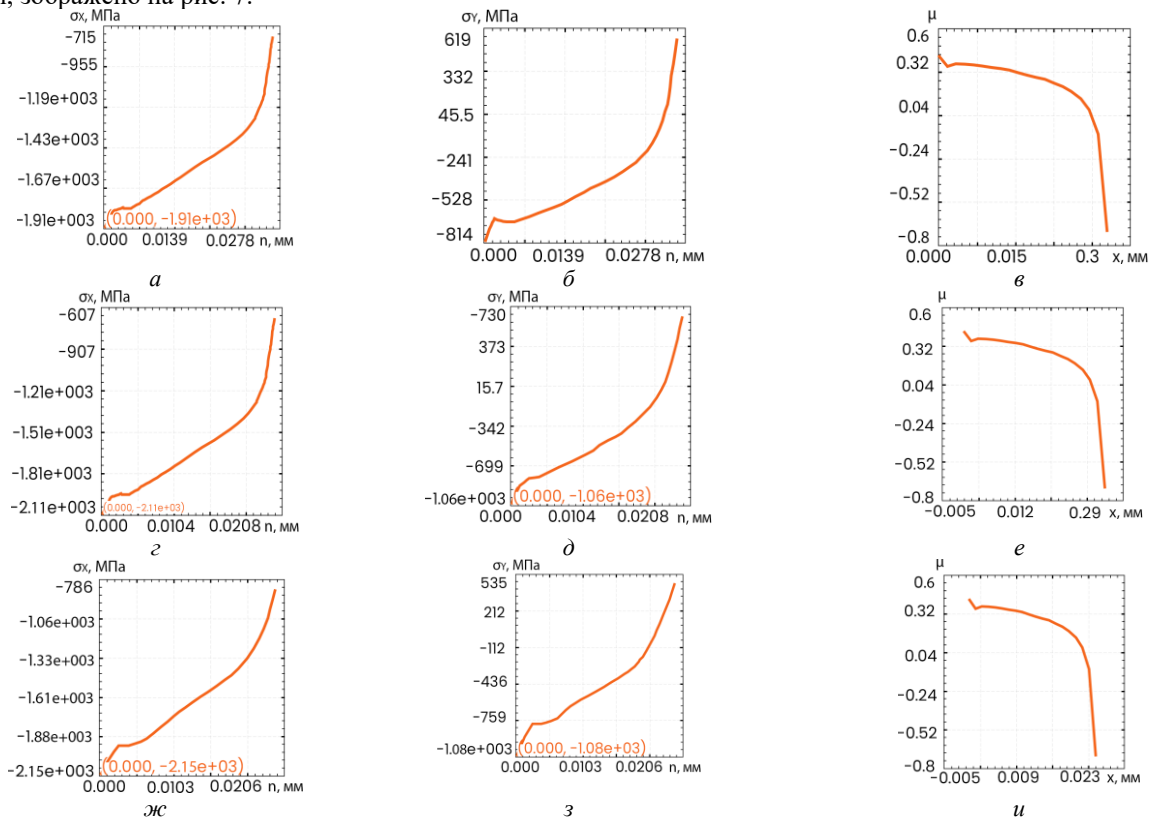


Рис. 4 – Контактні нормальні (а, з, ж) та тангенційні (б, д, з) напруження, коефіцієнт тертя (в, е, и) в залежності від координати на передній поверхні різця на кожному з проходів

Точка вимірювання температури на вершині різального інструменту позначена на рис. 7, а. Порівняно низькі для умов обробки загартованої сталі температури (300–380 °С) пов'язані з тим, що у процесі моделювання враховано лише початковий етап різання, а точка виміру температури розташована на інструменті, який прогрівається за більший період часу у порівнянні з оброблюваним матеріалом, що обумовлено наявністю термічного опору на границі розділу стружка-передня поверхня різального інструменту.

Розподіл контактної температура вздовж лінії контакту зі сторони передньої поверхні зображено на рис. 8. Як можна бачити величина температури в даному випадку значно вища і досягає 600 °С. При наростанні часу обробки величина температури різання буде збільшуватися, а значення температури, виміряне в інструменті, буде наближатися до максимальної температури в оброблюваному матеріалі.

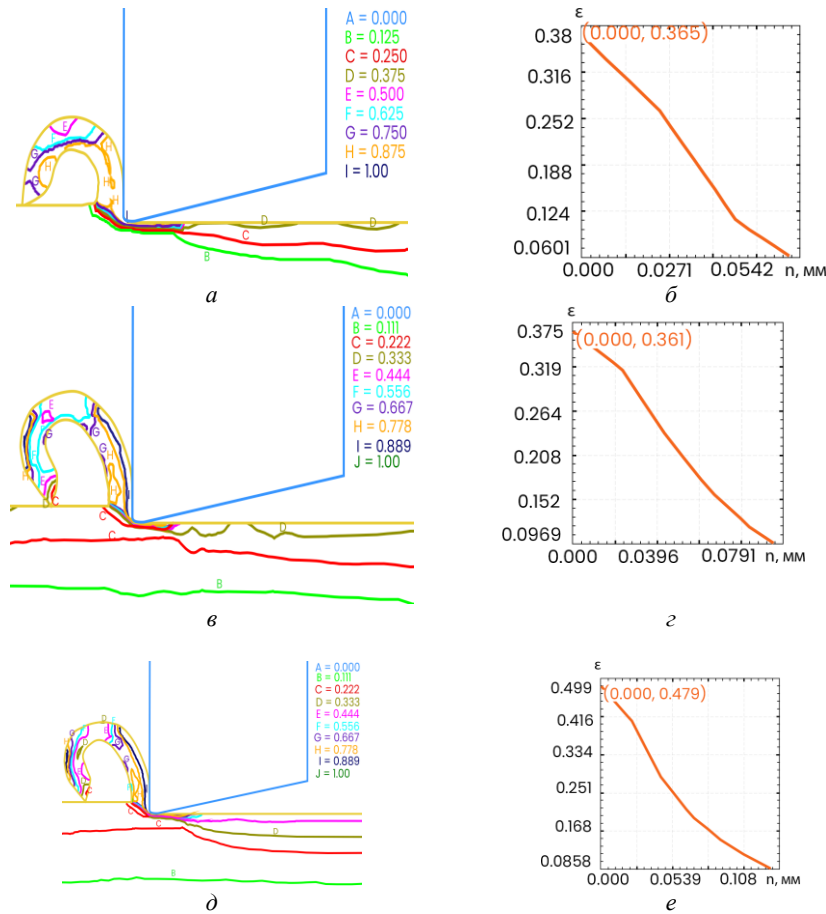


Рис. 5 – Ступінь деформації оброблюваного матеріалу в залежності від глибини вимірювання на кожному з проходів

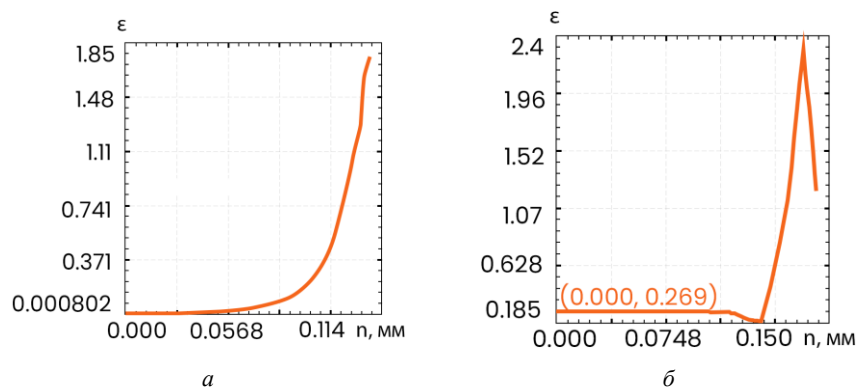


Рис. 6 – Залежність ступеня деформації від відстані від різальної кромки у напрямку швидкості різання

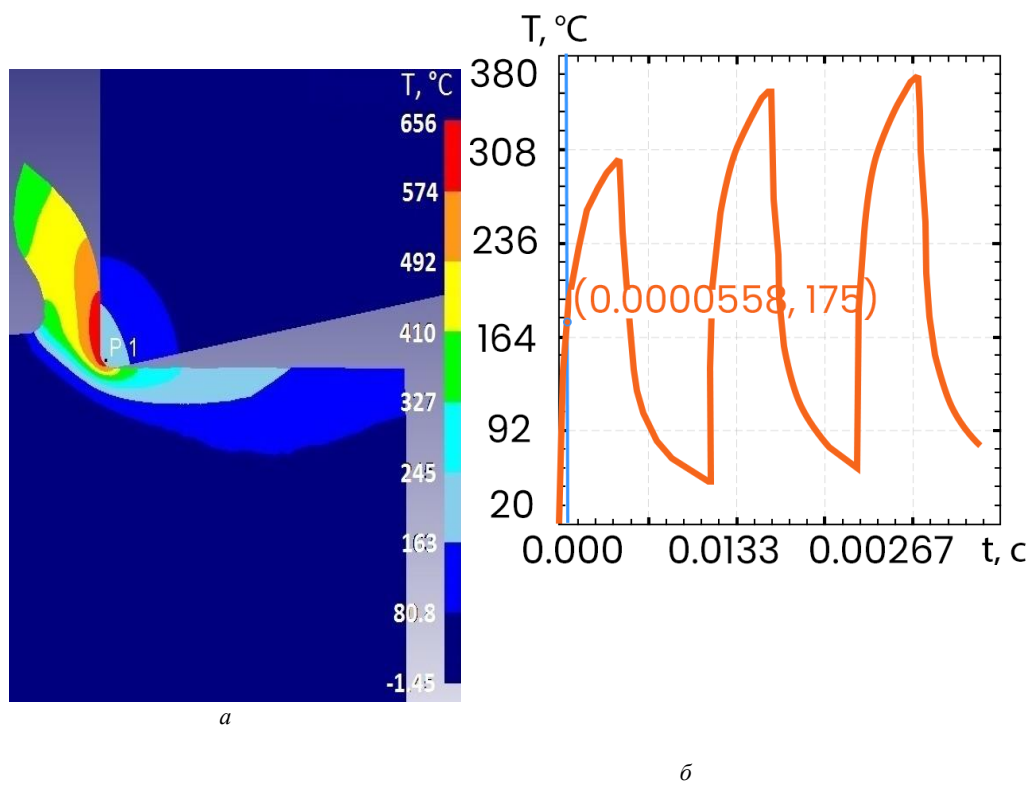


Рис. 7 – Точка виміру температури в інструменті та динаміка наростання температури на кожному з проходів

**Висновки.** Встановлено, що для умов торцевого фрезерування сталі високої твердості інструментом, робоча частина якого оснащена PcBN, характерно наступне:

– границя плинності оброблюваного матеріалу інтенсивно зростає при збільшенні ступеню деформації оброблюваної сталі (при подальшій стабілізації цієї залежності);

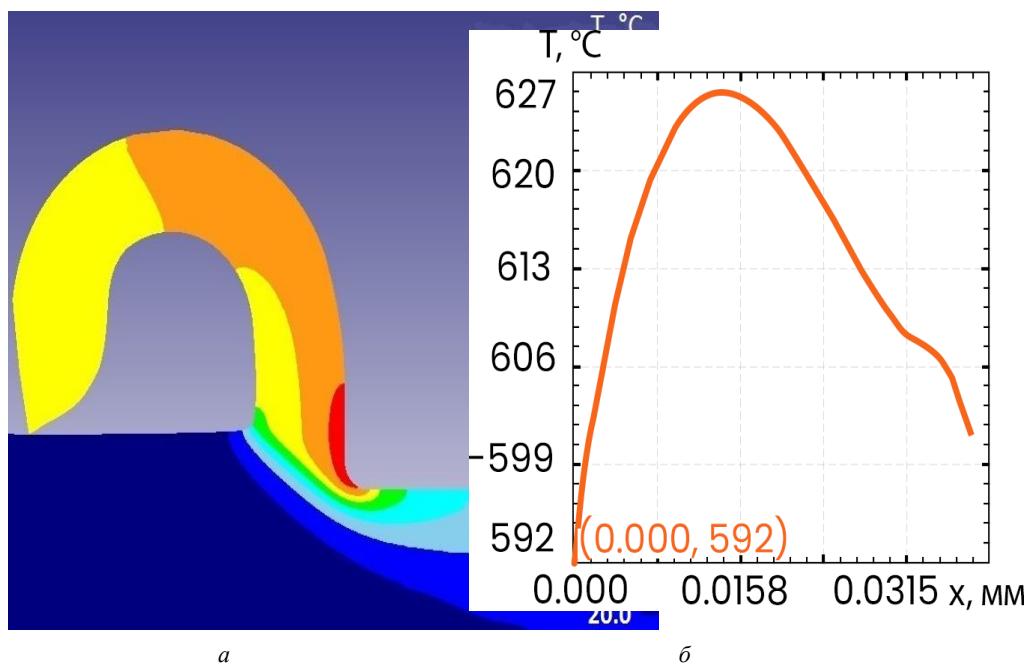


Рис. 8 – Розподіл температурних полів в оброблюваному матеріалі (а) та епока температурного навантаження на передній поверхні інструменту на першому проході (б)



- при врізанні інструменту в оброблюваний матеріал спостерігається всплеск сили різання, що відповідає перехідному процесу стружкоутворення з наростанням довжини контакту стружки з інструментом;
- в перші мілісекунди різання довжина контакту та усадка стружки вища у порівнянні зі квазісталом процесом обробки;
- усадка стружки на першому проході є більшою у порівнянні з отриманою при подальших проходах інструменту;
- коефіцієнт тертя суттєво не змінюється, хоча спостерігається зростання величин нормальних та тангенціальних контактних напружень на поверхнях інструменту;
- ефективна деформація матеріалу в зоні різання після наступних проходів інструменту збільшується, що обумовлює зростання ефективних напружень;
- нестационарний характер обробки з врізаннями кожного з лез інструменту та виходом з зони різання обумовлює наявність періодів наростання температури різання та охолодження різального інструменту.

#### Список літератури:

1. Синтез и спекание сверхтвердых материалов для производства инструментов / под общ. ред. П. А. Витязя, В. З. Туркевича – Минск : Беларуская навука, 2021. – 337, [1] с.;
2. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н. В. Новикова, С. А. Клименко. – Москва : Машиностроение, 2014. – 608 с.;
3. Huang, Y. Predictive Modeling of Tool Wear Rate with Applications to CBN Hard Turning : PhD Dissertation / Y. Huang. – Georgia : Georgia Institute of Technology, 2002.

#### References (transliterated)

1. *Sintez i spekanie sverkhkhtverdy`kh materialov dlya proizvodstva instrumentov* / pod obshh. red. P. A. Vityazy, V. Z. Turkevicha – Minsk : Belapusk`a navuka, 2021. – 337, [1] s.;
2. *Instrumenty` iz sverkhkhtverdy`kh ma-terialov* / pod red. N. V. Novikova, S. A. Klivenko. – Moskva : Mashinostroenie, 2014. – 608 s.;
3. *Huang, Y. Predictive Modeling of Tool Wear Rate with Applications to CBN Hard Turning* : PhD Dissertation / Y. Huang. – Georgia : Georgia Institute of Technology, 2002.

*Поступила (received) 10.03.2022*

#### *Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Клименко Сергій Анатолійович (Klivenko Sergiy Anatoliyovich)** – заступник директора з наукової роботи, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, чл.-кор. НАН України, доктор технічних наук, професор, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22, <https://orcid.org/.org/0000-0003-1464-3771>

**Манохін Андрій Сергійович (Manokhin Andriy Sergiyovich)** – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший дослідник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22, <https://orcid.org/.0000-0003-1479-8482>

**Чумак Анатолій Олександрович (Chumak Anatoly Oleksandrovitch)** – мл. наук. співробітник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22, <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>

**Клименко Сергій Анатолійович (Klivenko Sergiy Anatoliyovich)** – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22, <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>

**Копейкіна Марина Юрїївна (Koruyikina Marina Yuriivna)** – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. +38050 331-19-22, <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>

**Саленко Олександр Федорович (Salenko Oleksandr Fedorovich)** – професор, доктор технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», 03056, м. Київ, пр.Т. Перемоги, 37. +38068 659-47-95, <https://orcid.org/0000-0002-5685-6225>

**КЛОЧКО О.О., ГАСАНОВ М.І., ЗАКОВОРOTНИЙ О.Ю., МАЙБОРОДА В.С., ОХРИМЕНКО О.О., ФЕДОРЕНКО В.С.**

## **ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДЕФОРМАЦІЇ І РУШЕННЯ ЗРІЗУЄМОГО ШАРУ ПРИ ШВИДКІСНОМУ ЗУБОФРЕЗУВАННІ ЗАГАРТОВАНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛІС НА ОСНОВІ АТОМНОГО ПІДХІДУ**

Наукові основи технологічного регламенту вибору та призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні базуються на основоположних теоретичних положеннях теорії про тертя, технологію машинобудування та теорію різання. Вперше науково обґрунтовано кут ковзання при пластичному відтисканні (передформування) матеріалу, коли матеріал обтікає індентор (інструмент) без відокремлення від основної маси. Визначення мінімальних кутів ковзання при обробці зубчастих великомодульних коліс методом фрезерування, виходячи з фізико-хімічних процесів механіки тертя, дозволяє значно підвищити ефективність процесу формування зубів та експлуатаційні властивості їх поверхонь. Викладено атомний підхід до процесів деформації та руйнування стружки при різанні. Опір пластичної деформації шару, що зрізається, залежить від типу кристалічної решітки оброблюваного матеріалу, його енергії дефекту упаковки та наявності домішок на межах зерен. Вплив цих факторів проявляється через види диссипативних структур, що формуються в процесі деформації шару, що зрізається і визначають її локалізацію.

**Ключові слова:** швидкісне зубофрезерування, кут ковзання, радіуса заокруглення ріжучої кромки лезового інструменту, режими різання, атомна структура металів, дислокації, різання, деформація

### **KLOCHKO O.O., GASANOV M.I., ZAKOVOROTNY O.Yu., MAIBORODA V.S., OKHRIMENKO O.O., FEDORENKO V.S. TECHNOLOGICAL PREREQUISITES FOR DEFORMATION AND FAULT OF THE CUT LAYER DURING THE SPEED GEAR MILLING OF HARDENED CYLINDRICAL GEARS ON THE BASIS OF THE ATOMIC APPROACH**

The scientific foundations of the technological regulation for the selection and assignment of processing parameters during gear milling are based on the fundamental theoretical provisions of the friction theory, mechanical engineering technology and cutting theory. For the first time, the sliding angle was scientifically substantiated during plastic displacement (pre-deformation) of the material, when the material flows around the indenter (tool) without separation from the main mass. Determination of the minimum sliding angles during the processing of large-module gear wheels by milling, based on the physicochemical processes of friction mechanics, can significantly increase the efficiency of the tooth shaping process and the operational properties of their surfaces. An atomic approach to the processes of deformation and destruction of chips during cutting is presented. The resistance to plastic deformation of the cut layer depends on the type of crystal lattice of the processed material, its stacking fault energy, and the presence of impurities at the grain boundaries. The influence of these factors is manifested through the types of dissipative structures that are formed in the process of deformation of the cut layer and determine its localization.

**Key words:** high-speed hobbing, slip angle, rounding radius of the cutting edge of the blade tool, cutting conditions, atomic structure of metals, dislocations, cutting, deformation

**Вступ.** Технологічний регламент вибору та призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні з урахуванням забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару зубчастих коліс встановлює оптимальні умови різання, за яких забезпечується повна участь у зніманні припуску при зубофрезеруванні всіх зубів фрези [1, 2, 12, 13].

Технологічний регламент вибору та призначення параметрів обробки поширюється для зубофрезерування циліндричних дрібно модульних і великомодульних звичайної твердості 220...320HB та загартованих HRC46...63 зубчастих коліс [3, 4, 6, 22, 23]. Дослідження пластичної деформації на атомному рівні опір зсуву при різанні, з параметрами, що визначають механізми деформації різних типів кристалічних ґрат запропоновано враховувати радіус округлення ріжучої кромки  $\rho$ .

Регламент встановлює геометричні параметри черв'ячних модульних та спеціальних швидкісних немодульних дискових фрез у взаємозв'язку з технологічними режимами різання та параметрами поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс [5, 7, 8, 11, 21].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Підвищення ефективності процесів при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом обумовлює необхідність поглиблених досліджень фізичних закономірностей, що супроводжують відокремлення шару від заготовлі.

При швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом процес пластичної деформації реалізується за схемою стиснення та простого зсуву [6, 9, 10, 14]. При цьому численними дослідженнями показано, що на верхньому кордоні (Рис. 1) зони стружкоутворення і в зоні вторинної деформації окремі зерна узгоджено формозмінюються і вишиковуються в ланцюжок у площині зсуву, утворюючи так звану текстуру (на рис. 1 видно зерно - Тита витягнуті вздовж площини зсуву).

Експериментально встановлено, що опір пластичному деформуванню в умовній площині зсуву  $\tau_{сдв}$  при обробці сталей залишається постійним, що пов'язане з деформаційним насиченням, тобто з досягненням граничного рівня деформації (зміцнення).

Зі зростанням швидкості при обробці сталей відбувається послідовна зміна виду стружки: від елементної до зливної, а далі до сегментної (суглобової). Одним із перших механізм утворення сегментної стружки при високих швидкостях різання досліджував М.І. Клушин [1, 7, 15, 20], який пов'язав це з адіабатичними умовами деформацій, тобто з температурним розміщенням, не встигає піти.

Відповідно до роботи [6, 17, 19], при високих швидкостях різання умови деформування в зоні стружкоутворення такі, що теплота від деформації в зоні локалізованого зсуву тобто дифузійні процеси не можуть реалізуватися і опір зсуву тєдв знижується.

Можливість реалізації адіабатичного зсуву [7, 18, 22] при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом пов'язана, перш за все, з низькими значеннями тепло- та температуропровідності. Внаслідок цього припускають, що нижчі значення опору зсуву титанового сплаву порівняно з  $\square$ сдв сталей, одержувані при їх різанні, обумовлені цією обставиною.

**Мета дослідження.** Дослідження технологічних умов деформації та руйнування зрізаного шару при швидкісному зубофрезеруванні загартованих циліндричних зубчастих коліс на основі атомного підходу з урахуванням обліку радіуса округлення ріжучої кромки  $\rho$ .

Традиційний розгляд пластичної деформації [6, 7] передбачає початок пластичного перебігу при напрузі плинності та враховує лише деформаційне зміцнення. Це помилкове опис є наслідком те, що теоретично градієнтів не враховані напруги пластичного течії.

**Основна частина.** Локалізація деформації та текстура в зоні стружкоутворення при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом сталі 34ХНМ на різних швидкостях:  $v = 0,5$  м/с;  $v = 4$  м/с при моделюванні формоутворення глибини залягання залишкової напруги поверхневого шару  $h_s$  враховується з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки  $\rho$  і сходу стружки при швидкісному зубофрезеруванні ( $\rho=0,300$  мм) залежно від кута ковзання  $\Psi_c$ .

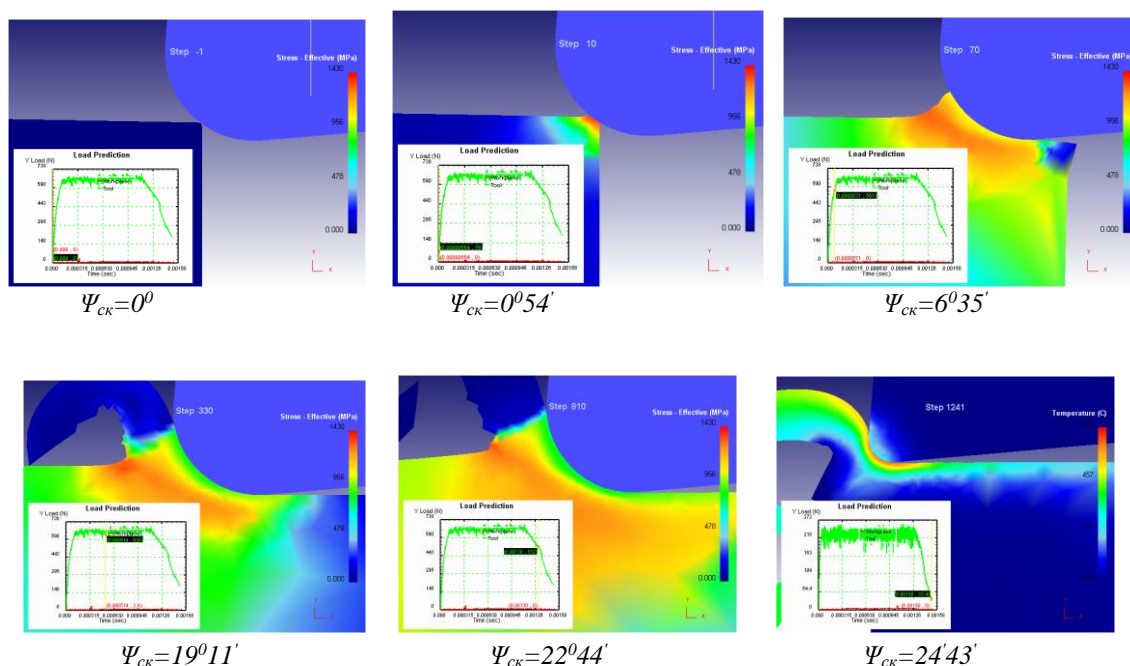


Рис. 1 – Локалізація деформації та текстура в зоні стружкоутворення при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом сталі 34ХНМ на різних швидкостях:  $v = 0,5$  м/с;  $v = 4$  м/с при моделюванні формоутворення глибини залягання залишкової напруги поверхневого шару  $h_s$  і сходу стружки при швидкісному зубофрезеруванні ( $\rho=0,300$  мм) залежно від кута ковзання  $\Psi_c$

Неоднорідність напруженого стану в кристалі, що деформується, обумовлює релаксаційний характер пластичного перебігу. Гідростатичні тиски сприяють релаксації пружної напруги на межах зерен. У разі високої енергії дефекту упаковки (ЕДУ) матеріалу зерно при деформуванні повертається як ціле [6, 17]. В основі цього явища лежать відносно висока рухливість зернограничних дислокацій та виникнення у навантаженому полікристалі моментних напруг. Цей ефект залежить від оброблюваного матеріалу та стану меж зерен. Поворотні моменти, що обумовлюють поворот зерен (реалізацію ротаційної моди деформації), сприяють формуванню ланцюжка зерен, витягнутих уздовж верхньої межі стружкоутворення. У роботі [6, 12] показано, що процеси, що стримують зсувну

деформацію зерен, стримують і ковзання за межами зерен. В результаті відбувається зсув великої кількості атомних площин ковзання.

Утворення текстури свідчить про те, що в умовах специфічного напруженого стану в зоні стружкоутворення реалізується ефективна релаксація концентраторів напруг у стиках зерен, що повертаються. В результаті досягаються високі ступеня деформації [2, 6, 10] та значне внутрішньозеренне зміцнення. Отже, в таких умовах робота джерел деформації стає скорельованою і самоорганізованою, що обумовлює самовстановлення кута ковзання (зсуву) [4] і мінімум енергії, що витрачається.

Відомо, що з початковому врізанні зуба фрези в поверхневого шарі з'являється текстура (рис. 2), напрям якої збігається з головною віссю деформації розтягування. Якщо врахувати, що в безпосередній близькості від ріжучої кромки цей напрям зберігається і в поверхневого шарі, то знак залишкової напруги буде пов'язаний і з кутом текстури  $\Phi_2$ , так як  $\omega = 90^\circ - \Phi_2$ . Звідси випливає, що за  $\Phi_2 < 45^\circ$  слід очікувати залишкові напруги стиснення (рис. 3), а при  $\Phi_2 > 45^\circ$  - залишкові напруги розтягування. Наведені в таблиці результати експериментів підтверджують це положення.

У поверхневого шарі формується поле залишкової напруги, головні осі якого також не збігаються з напрямками формотворчих рухів (рис. 4).

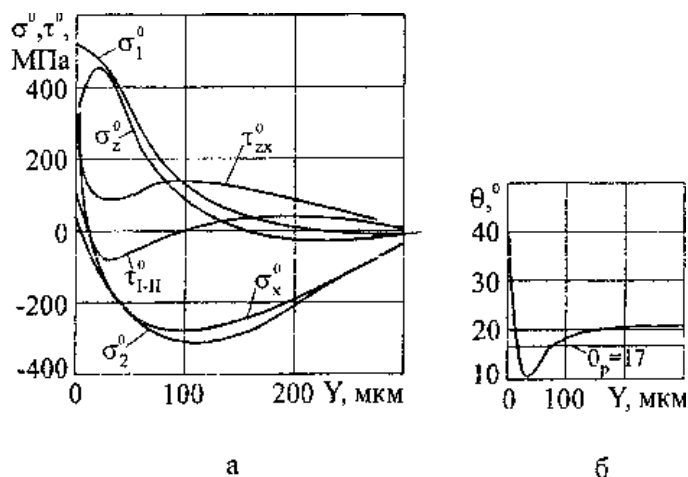


Рис. 2 – Характеристики залишкового напруженого стану  
 а - епюри головних  $\sigma_1^0$  і  $\sigma_2^0$ , нормальних (тангенціальних  $\sigma_z^0$  і осевих  $\sigma_x^0$ ) і дотичних  $\tau_{zx}^0$  залишкових напруг; б - кут відхилення головних осей  $\Theta$  за товщиною поверхневого шару ( $\theta_p$ -середнє інтегральне напрямом).  
 Швидкісне зубофрезерування сталі 34ХНМ: припуск на бік  $t = 0,8$  мм;  $S_{min} = 140$  мм/хв;  $v = 3,00$  м/с;  $\rho = 0,08$  мм

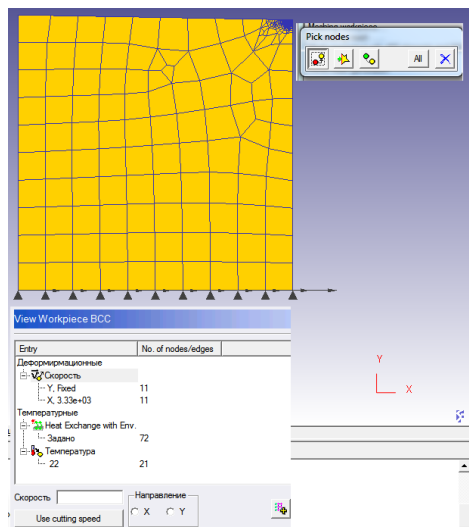


Рис. 3 – Залишкові напруження стиснення при початковому врізанні зуба фрези з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом сталі 34ХНМ

Через війну з цих напрямках поруч із нормальними компонентами утворюється і дотична. Дотичні залишкові напруги, як і нормальні (тангенціальні та осьові) можуть бути і позитивними, так і негативними (табл. 1), а їх величина, природно, тим більша, чим більший кут відхилення головних осей від напрямку формоутворюючих рухів на вугіллі ковзання зуба фрези  $\Psi_{ск}$ .

Таблиця 1 – Знаки тангенціальної залишкової напруги, визначені по куту текстури стружки та експериментально при швидкісному зубофрезеруванні сталі 34ХНМ

Швидкість різання, м/с	Найбільша товщина зрізу а, мм	Радіус заокруглення ріжучої кромки зубів	Кут текстури	Знак залишкової напруги	
				за текстурою	експерим,
0,2	0,73	0,08	54	+	+
	0,44	0,12	48	+	+
	0,6	0,14	57	+	+
	0,15	0,16	51	+	+
1,0	0,31	0,14	51	+	+
	0,36	0,16	58	+	+
2,0	0,27	0,16	66	+	+
	0,23	0,18	56	+	+
	0,24	0,30	48	+	+
3,0	0,34	0,35	61	+	+
	0,32	0,40	52	+	+
	0,12	0,45	49	+	+

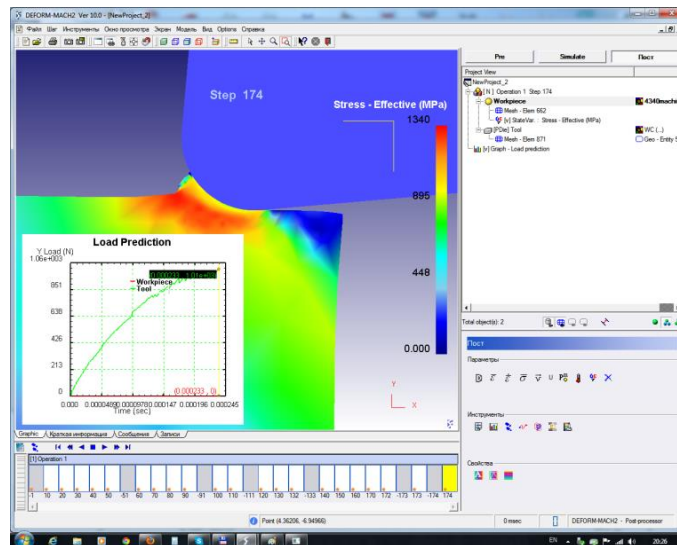


Рис. 4 – Залишкова напруга при початковому врізанні зуба фрези з урахуванням радуса округлення ріжучої кромки  $\rho$  на вугіллі ковзання  $\Psi_{ск}$  при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом сталі 34ХНМ

Примітно, що, як встановлено експериментально, на вугіллі ковзання зуба фрези при врізанні утворюються значні напруги, що розтягують, в поверхневому шарі відхилення і в міру збільшення кута ковзання при переході пружних деформацій в пластичні-зменшуються.

Безпосередній зв'язок між напругами, що виникають у зоні стружкообразования, і залишковими напругами може бути показаний при їх представленні інтенсивністю напруги, що характеризує напружений стан в узагальненому вигляді. Цей зв'язок виявляється чіткіше, якщо залишкові напруги оцінювати площею активної

частини їх епюр. Відбувається згладжування похибок визначення залишкових напруг, наявність яких неминуче через складність експерименту.

Пластична деформація може виникнути, якщо через кристал пройдуть не тільки дислокації (вихідна структура вже має певну кількість дислокацій), але й знову утворені. Напруги, необхідні для початку пластичної деформації (без дислокацій), тобто для розриву міжатомних зв'язків, становлять близько 10 % від модуля зсуву.

Наприклад, для заліза міжатомна відстань становить 2,48 Å, енергія дислокації на цю відстань — ~6 eВ, а міцність міжатомного зв'язку Fe-Fe — 4,290 eВ. Енергія дислокації перевищує міцність міжатомних зв'язків Fe-Fe, тому рух дислокацій супроводжуватиметься деформацією кристала, тобто розривом зв'язків. Для розриву великої кількості атомних зв'язків необхідний механізм безперервного генерування дислокацій, наприклад, джерело Франка-Ріда [1, 6, 18], дія якого пов'язана з утворенням дислокаційних петель діаметром у кілька міжатомних відстаней. У кристалі енергія деформації становить близько 0,1В на одну міжатомну відстань, а вздовж лінії дислокації. Площина ковзання для дислокації визначають як площину, в якій лежать вектор Бюргерса дислокації, і лінія дислокації. При русі крайової дислокації площиною ковзання від одного вузла грати до іншого атома ядра дислокації здійснюють переміщення. Через війну дислокація переміщається однією міжатомне відстань  $a$ . Гвинтова дислокація може переміщатися з однієї площини до іншої. Важливою особливістю всіх видів дислокацій є те, що сильні спотворення кристалічних ґрат зосереджені в безпосередній близькості від дислокаційної лінії та в ядрі дислокації, що має свою атомну структуру [1, 7, 12].

Дислокаційні уявлення у різанні металів викладено у ряді робіт, наприклад, у [8]. Сучасні методи дослідження дислокаційної структури виконують за допомогою високовольтної електронної мікроскопії тонких фольг.

На рис. 5 представлені мікрофотографії дислокаційної структури сталі 34ХНМ при швидкісному зубофрезерованні лезовим інструментом поблизу нижньої (а) і верхньої (б) меж зони стружкоутворення (15000) з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки  $\rho$ .

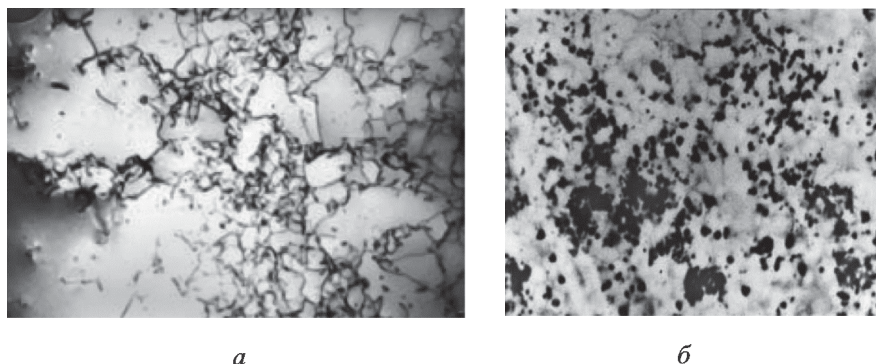


Рис. 5 – Дислокаційна структура сталі 34ХНМ при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом поблизу нижньої (а) та верхньої (б) меж зони стружкоутворення (15000) з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки  $\rho$

Дослідники відзначають незначний вплив швидкості деформування на опір зсуву  $\tau_{сдв}$  при обробці металів [1, 6]. Це значною мірою пов'язано як із здатністю дислокацій до фрагментації та відмінністю їх дислокацій, так і електронну структуру. На нижньому кордоні електронна структура оброблюваного матеріалу деформується пружно (без розриву міжатомних зв'язків). У міру деформації шару, що зрізається, відбувається зростання щільності дислокацій і розрив міжатомних зв'язків, тобто оброблюваний матеріал зазнає деформаційного зміцнення. Таким чином, розмір комірчастої структури виявляється запрограмованим вже на межі пружності. У зв'язку з цим при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом виявляється і залежність від межі пружності.

Схильність оброблюваних матеріалів до деформаційного зміцнення залежить від їхньої електронної та дислокаційної структури, наявності домішок, швидкості деформування, температури, типу кристалічної решітки, радіуса заокруглення ріжучої кромки  $\rho$ , а також від швидкості перебігу процесів розміцнення.

У вуглецевих сталях основною домішкою є вуглець, який, розташовуючись на межах зерен, може сприяти їхньому хрущенню. Зі зростанням температури дифузійна рухливість вуглецю зростає, що полегшує прослизання зерен, збільшує та змінює форму стружки. Як зазначалося, дислокації не підтверджено термічної активації, тому ступінь деформації

Сі збільшенням швидкості, отже, і температури формується зливна стружка. Цьому сприяють дифузійні процеси на межах зерен, що полегшують поворот зерен та міжзеренну деформацію. При цьому ступінь пластичної деформації стружки знижується.

При подальшому зростанні швидкості різання формування елементарної стружки пов'язане із запізненням

пластичних деформацій.

Як зазначалося, при високих швидкостях різання відбувається запізнення пластичних деформацій і деформований стан перестає відповідати їх напруженому стану [6]. Але з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом сталі 34ХНМ створюються технологічні умови для управління процесами обробки.

Наукові основи технологічного регламенту вибору та призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні базуються на основоположних теоретичних положеннях теорії про тертя, технологію машинобудування та теорію різання [7, 8, 12, 14].

Процес зубофрезерування при врзанні першого зуба фрези (Рис. 6) відбувається ковзанні зуба фрези і температура в зоні різання різко зростає, що є однією з причин підвищеного зношування фрез по задніх поверхнях. Після досягнення певної товщини шару  $a_i$  на куті ковзання  $\Psi_{ск}$  процес пластичної деформації переходить у різання.

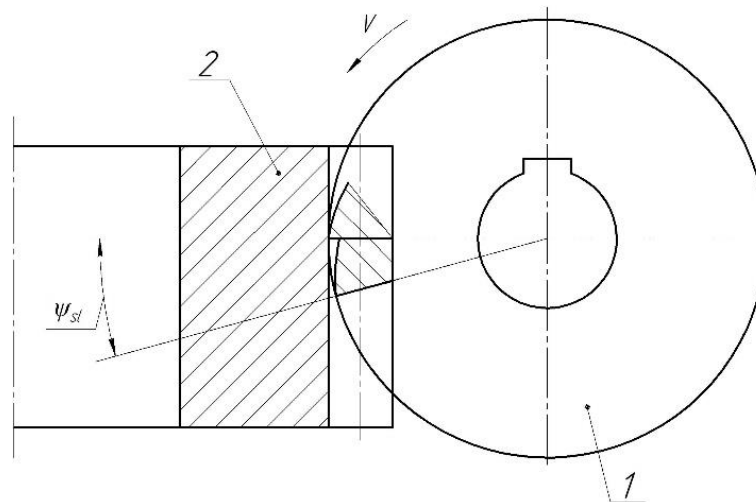


Рис. 6 – Схема зубофрезерування зубчастих коліс

У процесі зняття стружки деформація шарів оброблюваного матеріалу виникає у області площині сколювання стружки, а й попереду зуба фрези і під площиною різання.

Метал, підмінний різальним лезом, у стружку не переходить. Деформований шар після проходження різального леза визначає глибину наклепу ( $h_{np}$ ).

Тертя поверхневих шарів матеріалів, що труться, має двоїсту молекулярно-механічну природу. Тертя обумовлено об'ємним деформуванням матеріалу і подолання міжмолекулярних зв'язків, що виникають між зближеними ділянками поверхонь, що труться.

Якщо розглядати елемент, що впровадився, - індентор, який, переміщуючись у тангенціальному напрямку, деформує нижчележачий матеріал як ріжуче лезо з радіусом  $\rho$  (Рис. 7), а глибину впровадження як  $a_i$ . то глибина щодо застосування може бути представлена у вигляді (1).

Кут ковзання  $\Psi_{ск}$  відповідає пластичному відтисненню (переддеформування) матеріалу, коли матеріал обтікає індентор (інструмент) без відокремлення від основної маси.

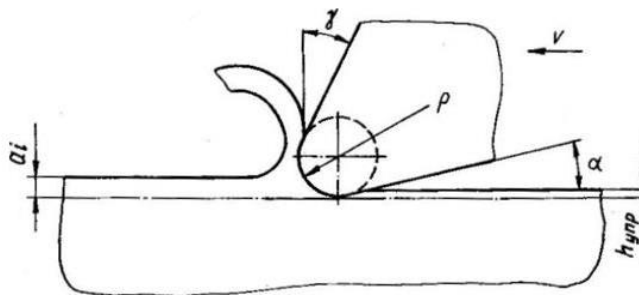


Рис. 7– Схема врзання зуба фрези при зубофрезеруванні зубчастих коліс

При поглибленні сфери в матеріал настає момент, коли відтіснення матеріалу змінюється загальмовуванням щодо індентора, що призводить до нагрівання матеріалу [1, 9, 16].

Розглянута теорія пластичності про ковзання жорсткого сферичного індентора, що впроваджується в пластично деформований простір, на межі між якими діє адгезійний зв'язок, що має міцність на зріз, визначає умови переходу пластичного відтіснення на різання:

$$\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot \tau}{\sigma_s}\right), \text{ т.е. } \frac{a_i}{\rho} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot \tau}{\sigma_s}\right) \quad (1)$$

де  $h_i = a_i$  - товщина шару, що зрізається, мм;  $R = \rho$  - радіус ріжучого леза, мм;  $\tau$  - міцність на зріз адгезійного зв'язку, н/м<sup>2</sup>;  $\sigma_s$  - межа плинності матеріалу, н/м<sup>2</sup>.

Як випливає з (2), при  $\sigma_s \leq 2 \cdot \tau$  зовнішнє тертя неможливе за будь-якого відносного впровадження; воно також неможливе при  $h_i/R = a_i/\rho \geq 0,5$  навіть за умови нульової міцності адгезійного зв'язку на зріз [2, 4, 15, 18].

При змащуванні граничним буде відносне використання

$$h_i/R = a_i/\rho \geq 0.31$$

При порушенні зовнішнього тертя у разі  $\tau = 0$  і за наявності мастильної плівки на поверхні розділу коефіцієнт тертя залежно від відношення  $h_i/R = a_i/\rho$  визначається з молекулярно-механічної теорії тертя:

$$f = \frac{\tau_o}{p_r} + \beta + 0,4 \cdot a_r \cdot \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (2)$$

де  $\tau_o$  питома зсувна міцність молекулярних зв'язків;  $\beta$ -коефіцієнт зміцнення молекулярних зв'язків під дією стискаючих напруг;  $a_r$  - коефіцієнт гістерезисних втрат при ковзанні;  $p_r$  - тиск на фактичних майданчиках контакту.

Для нашого випадку

$$f = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{a_i}{\rho}} \quad (3)$$

Підставляючи (3) значення  $a_i/\rho = 0.31$ , при якому неможливо зовнішнє тертя, отримаємо  $f = 0,22$ . Ця величина є граничним значенням деформаційної складової коефіцієнта тертя. При переході критичного значення, тобто. при  $f \geq 0,22$  спостерігаються стрибки стикається поверхні та індентора.

При різанні із застосуванням поверхнево та хімічно активних мастильно-охолоджуючих рідин адгезійна взаємодія між стружкою та інструментом відсутня, адгезійна складова дорівнює нулю та середній коефіцієнт тертя стає постійним, що не залежить від умов різання, тобто. при  $\tau/\sigma = f_2 \rightarrow 0: f = f_1 + f_2 \rightarrow f_1$ ,

де  $f_1$  - коефіцієнт тертя, що залежить від молекулярно-атомної шорсткості поверхонь.

Таким чином, глибина відносного впровадження, що приводить до різання, без застосування мастила відповідає: з мастилом .

Враховуючи, що початкова товщина шару, що зрізається, при формоутворенні зубів зубчастих виробів визначається як  $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ck} \cdot \sin \varphi$ ,

де  $S_z$  – подача на зуб;  $\Psi_{ck}$  - кут ковзання, при якому починається різання;  $\varphi$  - кут профілю фрези в точці, що розглядається.

Задаючись конкретними значеннями  $\rho$  та  $S_z$ . визначається мінімальне значення кутів ковзання без мастила та з МОР по формулам (4) і (5):

$$\text{без МОР: } \Psi_{ck} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi} \quad (4)$$

$$\text{з МОР: } \Psi_{ck} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi} \quad (5)$$



Зміна товщини шару, що зрізається при досягненні мінімального кута ковзання  $\Psi_{скмін}$  змінює коефіцієнт тертя за наявності обов'язкового сплеску (стрибка) (Рис. 8 а, б), що несприятливо позначається на динаміку різання і якість обробленої поверхні.

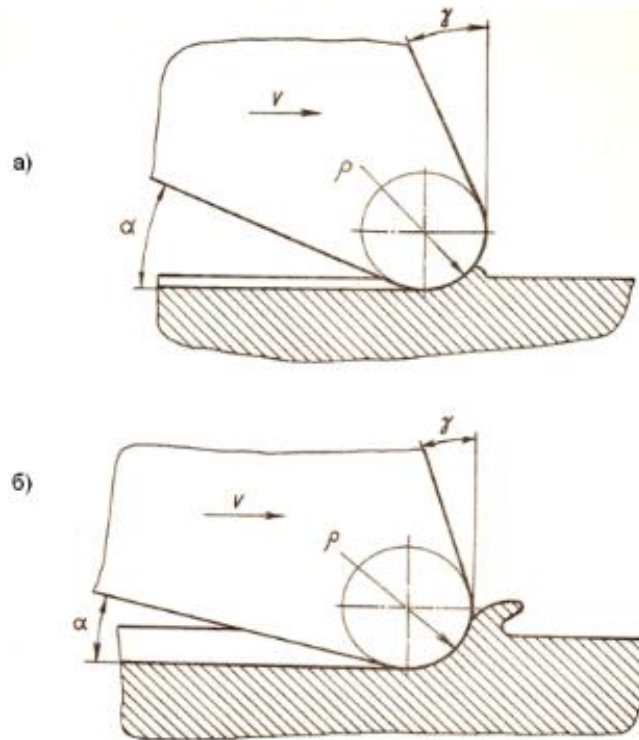


Рис. 8 – Переміщення індентора:  
а) – у разі відтіснення матеріалу; б) – переміщення індентора у разі різання

При зустрічному фрезеруванні товщина шару, що зрізається  $a_i$  визначається як відстань між двома послідовними траєкторіями точки леза, вимірюваною в напрямку радіуса фрези і визначає миттєве положення кута контакту [1, 17, 22, 23]. Товщина зрізу спрощено визначається за формулою:

$$a_i = S_{zmin} \cdot \sin \Psi_{ск} \cdot \sin \varphi, \quad (6)$$

де  $S_{zmin}$  – мінімальна подача на зуб, при якій починається процес різання.

**Обговорення.** Таким чином, початок різання при мастилі починається при  $a_i > 0.31\rho$  Тоді, задаючись значенням  $S_{zmin}$ , визначається кут ковзання  $\psi_{ск}$ .

Ковзання відбувається на певному вугіллі ковзання  $\psi$  до тих пір, поки пластичні деформації не перейдуть з мікрорізання безпосередньо до різання, тобто. коли товщина зрізу не досягне певного значення глибини щодо впровадження ріжучим інструментом, що має радіус округлення ріжучої кромки  $\rho$ .

Таким чином, підвищення якості поверхневого шару зубчастих виробів, зниження величини шорсткості, значне збільшення продуктивності та регламентованої стійкості інструменту забезпечується за рахунок встановлення фіксованої величини подачі, при якій відношення початкової товщини зрізу до радіусу округлення ріжучої кромки фрези відповідає найменшому значенню кута.

Використання розробленого технологічного регламенту на вибір та призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні з урахуванням забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару зубчастих коліс встановлює оптимальні умови різання, за яких забезпечується повна участь у зніманні припуску всіх зубів фрези.

Визначення мінімальних кутів ковзання при обробці зубчастих великомодульних коліс методом фрезерування, виходячи з фізико-хімічних процесів механіки тертя, дозволяє значно підвищити ефективність процесу формування зубів та експлуатаційні властивості їх поверхонь

**Висновки.** 1. Встановлена зв'язок  $K_p$  з основними параметрами поверхневого шару, період стійкості  $T$  інструменту визначається глибиною різання  $t$ , подачею  $S_0$ , швидкістю  $V$  та радіусом округлення ріжучої кромки зубів фрез  $r$ , тобто. параметрами режиму різання та умовами формування з урахуванням параметра функціонального формування поверхневого шару при зубофрезеруванні  $K_p = f(a/r, R_z, t_m, (k)H_{\mu 0}, \sigma_0, h_{\mu})$ .

2. Змодельовано процес визначення мінімального значення кута ковзання  $\Psi_{ск}$ , або отримання максимального значення (без застосування  $MOP$  і з  $MOP$ ), при якому процес різання відсутній з урахуванням варіювання змінних параметрів режимів різання ( $S_{мін}$ ,  $V$ ) та геометричних параметрів зуборізних фрез ( $r$ ,  $d_{фр}$ ,  $Z$ ).

3. Встановлено співвідношення між кутом ковзання  $\Psi_{ск}$  та найбільшим кутом контакту зуба фрези  $\Psi_{тах}$  з оброблюваною поверхнею дозволяє встановити ефективність процесу формування через коефіцієнт  $K_p$  (без застосування  $COЖ$  та  $COЖ$ ).

4. Показано, що сталість опору пластичному деформуванню при зсуві елемента стружки зумовлено досягненням у площині зсуву граничної щільності дислокацій, що спричиняють аморфізацію обсягів, що деформуються.

5. Основним фактором, що визначає характер залишкового напруженого стану поверхневого шару виробу, є поле напруги, створюване передньою поверхнею інструменту з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки зубів фрези  $r$ .

5. Орієнтація траєкторій головних деформацій, що йдуть від зони стружкоутворення за лінію зрізу, визначає знак залишкових напруг, що утворюються, а інтенсивність напруг у зоні стружкоутворення - інтенсивність залишкових напруг і ступінь зміцнення поверхневого шару. Тим самим зумовлюється взаємозв'язок між залишковою напругою та показниками зміцнення.

#### Список літератури

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н. В. Новикова, С. А. Клименко. – Москва : Машиностроение, 2014. – 608 с.;
2. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko 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.
3. Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А. А. Ключко [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667-3.
4. Исследование процессов зубофрезерования закаленных шевронных зубчатых колес / А.А. Ключко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова, С.Ю. Палашек, А.Л. Невмержицкий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 90–101.
5. Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Кретинин О.В., Лаптев И.Л., Власов Е.Е., Кузьмишина А.М. Компьютерное моделирование и исследование наноструктур в процессах обра- ботки резанием на основе квантово-механических расчетов. Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. 119 с.
6. Кабалдин Ю.Г., Олейников А.И., Шпилев А.М., Бурков А.А. Математическое модели- рование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки ре- занием. Владивосток, Дальнаука, 2000. 194 с.
7. Шаповалов В.Ф., Печеный В.И., Ключко А.А., Пермяков А.А., Шелковой А.Н., Гасанов М.И., Анцыферова О.А. Повышение качества поверхностного слоя зубьев изношенных и восстанавливаемых крупногабаритных зубчатых колес поверхностным пластическим деформированием // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 42. – С. 91–102.
8. Гасанов М.И., Ключко 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.
9. Гасанов М.И., Ключко О.О., Заковоротный О.Ю., Перминов С.В. Технологичний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107–112. – ISSN 2079–004X.
10. Шелковой А.Н. Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, А.А. Ключко, М.И. Гасанов // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. – Севастополь : ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2017. – Вип. 8. – С. 61–70.
11. Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / О.М. Шелковий, О.О. Ключко, М.И. Гасанов, Д.О. Кравченко, О.О. Анцыферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079–004X.
12. Ключко А.А., Гасанов М.И., Басова Е.В. Регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079–004X.
13. Опыт создания современных технологий изготовления нежестких деталей с применением передовых CAD/CAM/CAE систем / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, М.И. Гасанов, Р.В. Головатый, С.А. Гаков, С.С. Гнучих // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 4(1113). – С. 37–40.
14. Ключко А.А. Технологическое обеспечение трения качения и трения скольжения в зубчатых передачах / А.А. Ключко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 40 (1149). С. 102–107. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079–004X
15. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. International Journal of Simulation Modelling, 17(1), 92-104.

7. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicki Vjesnik*, 25(2), 643-648.
- 16 M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, *ASME J. Tribol.* 139 (2017) 021402–1-11.
17. L. Chang, Y.R. Jeng, P.Y. Huang, Modeling and analysis of the meshing losses of involute spur gears in high-speed and high-load conditions, *ASME J. Tribol.* 135 (1) (2013) 1–11 Art. no. 011504.
18. A. Diez-Ibarbia, A. Fernandez-Del-Rincon, P. Garcia, A. De-Juan, Assessment of load dependent friction coefficients and their influence on spur gear efficiency, *Meccanica* 53 (1–2) (2018) 425–445.
19. A. Clarke, H.U. Jamali, K.J. Shariff, H.P. Evans, B. Shaw, Effects of profile errors on lubrication performance of helical gears, *Tribol. Int.* 111 (2017) 184–191
- 20 J. Moss, A. Kahraman, C. Wink, An experimental study of influence of lubrication methods on efficiency and contact fatigue life of spur gears, *ASME J. Tribol.* 140 (2018) Art. no. 0511031–11.
- 21 A. Arana, J. Larranaga, I. Ulacia, Partial friction coefficient model to predict power losses in cylindrical gears, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* 233 (2) (2019) 229–255
22. Shapovalov V., Klochko A., Gasanov M., Antsyferova O., Belovol A. Optimizing the technology of reconditioning large high precision gear rims. The current state of scientific research and technology in the industry. – Kharkiv. 2018. – № 3 (3). – P. 59–70.
23. Fesenko, A., Basova, Y., Ivanov, V., Ivanova, M., Yevsiukova, F., Gasanov, M. "Increasing of Equipment Efficiency by Intensification of Technological Processes", *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.3311/PPme.13198>.

#### References (transliterated):

- Instrumenty` iz sverkhtrverdny`kh ma-terialov / pod red. N. V. Novikova, S. A. Klimenko. – Moskva : Mashinostroenie, 2014. – 608 s.;
- Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko 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. – R. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
- Tekhnologicheskie osnovy` zuboobrabotki zakalenny`kh krupnomodul`ny`kh zubchaty`kh koles: monografiya / A. A. Klochko [i dr.]. – Kramatorsk : DGMA, 2014. – 479 s. ISBN 978-966-379-667-3.
- Issledovanie prozessov zubofrezzerovaniya zakalenny`kh shevronny`kh zubchaty`kh koles / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova, S.Yu. Palashek, A.L. Nevmerzichkij // Nadi`jni`st` i`nstrumentu ta optimi`zaczi`ya tekhnologi`chnikh sistem: zb.nauk. pr. – Kramators`k : DDMA, 2017. – Vip. 40. – S. 90–101.
- Kabal'din Yu.G., Sery`j S.V., Kretinin O.V., Laptev I.L., Vlasov E.E., Kuz`mishina A.M. Komp`yuternoe modelirovanie i issledovanie nanostruktur v prozessakh obra- botki rezaniem na osnove kvantovo-mekhanicheskikh raschetov. N. Novgorod, NGTU im. R.E. Alekseeva, 2014. 119 s.
- Kabal'din Yu.G., Olejnikov A.I., Shpilev A.M., Burkov A.A. Matematicheskoe modeli- rovanie samoorganizuyushhikh prozessov v tekhnologicheskikh sistemakh obrabotki re- zaniem. Vladivostok, Dal`nauka, 2000. 194 s.
- Shapovalov V.F., Pecheny`j V.I., Klochko A.A., Permyakov A.A., Shelkovej A.N., Gasanov M.I., Anczy`ferova O.A. Povy`shenie kachestva poverkhnostnogo sloya zub`ev iznoshenny`kh i vosstanavlivaemy`kh krupnogabaritny`kh zubchaty`kh koles poverkhnostny`m plasticheskim deformirovaniem // Nadi`jni`st` i`nstrumentu ta optimi`zaczi`ya tekhnologi`chnikh sistem: zb. nauk. pr. – Kramators`k : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 91–102.
- Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashina G.I., Perminov E.F. Gruppyvye marshrutny`e tekhnologicheskie prozessy` vosstanovleniya krupnogabaritny`kh zubchaty`kh koles na osnove imitacionogo modelirovaniya s uchetom progressiruyushhikh vidov iznosa // Nadi`jni`st` i`nstrumentu ta optimi`zaczi`ya tekhnologi`chnikh sistem: zb.nauk. pr. – Kramators`k : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 28–36.
- Gasanov M.I., Klochko O.O., Zakovorotnij O.Yu., Permi`nov Ye.V. Tekhnologi`chnij reglament optimi`zaczi`yi sistem vi`dnovlennaya funkci`onal`nikh vlastivostej velikogabaritnikh vi`dkritikh zubchatikh peredach // Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhnicheskogo uni`versitetu «KhPI». Seri`ya: Tekhnologi`yi v mashinobuduvanni` – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Naczi`onal`nij tekhnicheskij uni`versitet «Kharkiv`skij poli`tekhnicheskij i`nstitut». – Kharkiv` : NTU «KhPI», 2018. – # 6 (1282) 2018. – S. 107–112. – ISSN 2079–004Kh.
- Shelkovej A.N. Obespechenie e`kspluatacionny`kh svojstv zakalenny`kh zubchaty`kh koles / A.N. Shelkovej, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Vestnik sovremenny`kh tekhnologii: sb. nauch. tr. – Sevastopol` : FGAOU VO «Sevastopol`skij gosudarstvenny`j universitet», 2017. – Vy`p. 8. – S. 61–70.
- Funkcional`ny`e aspekty` imitacionnogo matematicheskogo modelirovaniya geometricheskikh parametrov prozessa zubofrezzerovaniya / O.M. Shelkovej, O.O. Klochko, M.F. Gasanov, D.O. Kravchenko, O.O. Ancziferova // Vi`snik NTU «KhPI». Seri`ya: Tekhnologi`yi v mashinobuduvanni`. – Kharkiv` : NTU «KhPI», 2017. – # 26 (1248). – S. 66–74. – Bi`bliogr.: 6 nazv. – ISSN 2079–004Kh.
- Klochko A.A., Gasanov M.I., Basova E.V. Reglament vy`bora i naznacheniya parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya zakalenny`kh zubchaty`kh koles. Vi`snik NTU «KhPI». Seri`ya: Tekhnologi`yi v mashinobuduvanni`. – Kharkiv` : NTU «KhPI», 2016. – # 33 (1205). – S. 145–157. – Bi`bliogr.: 7 nazv. – ISSN 2079–004Kh.
- Opy`t sozdaniya sovremenny`kh tekhnologii` izgotovleniya nezhestkikh detalej s primeneniem peredovy`kh CAD/CAM/CAE sistem / S.S. Dobrotvorskij, E.V. Basova, M.I. Gasanov, R.V. Golovaty`j, S.A. Gakov, S.S. Gnuchikh // Vi`snik NTU «KhPI». Zbi`rnik naukovikh prac`. Tematichnij vipusk: Tekhnologi`yi v mashinobuduvanni` – Kharkiv` : NTU «KhPI», 2015. – # 4(1113). – S. 37–40.
- Klochko A.A. Tekhnologicheskoe obespechenie treniya kacheniya i treniya skol`zheniya v zubchaty`kh peredachakh / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova // Vi`snik NTU «KhPI». Seri`ya: Tekhnologi`yi v mashinobuduvanni`. – Kh.: NTU «KhPI», 2015. – # 40 (1149). S. 102–107. – Bi`bli`ogr.: 8 nazv. – ISSN 2079–004X
- Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92-104.
- Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicki Vjesnik*, 25(2), 643-648.
- M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, *ASME J. Tribol.* 139 (2017) 021402–1-11.
- L. Chang, Y.R. Jeng, P.Y. Huang, Modeling and analysis of the meshing losses of involute spur gears in high-speed and high-load conditions, *ASME J. Tribol.* 135 (1) (2013) 1–11 Art. no. 011504.
- A. Diez-Ibarbia, A. Fernandez-Del-Rincon, P. Garcia, A. De-Juan, Assessment of load dependent friction coefficients and their influence on spur gear efficiency, *Meccanica* 53 (1–2) (2018) 425–445.
- A. Clarke, H.U. Jamali, K.J. Shariff, H.P. Evans, B. Shaw, Effects of profile errors on lubrication performance of helical gears, *Tribol. Int.* 111 (2017) 184–191
- J. Moss, A. Kahraman, C. Wink, An experimental study of influence of lubrication methods on efficiency and contact fatigue life of spur gears, *ASME J. Tribol.* 140 (2018) Art. no. 0511031–11.
- A. Arana, J. Larranaga, I. Ulacia, Partial friction coefficient model to predict power losses in cylindrical gears, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* 233 (2) (2019) 229–255дж

22. Shapovalov V., Klochko A., Gasanov M., Antsyferova O., Belovol A. Optimizing the technology of reconditioning large high precision gear rims. The current state of scientific research and technology in the industry. – Kharkiv. 2018. – # 3 (3). – R. 59–70.

23. Fesenko, A., Basova, Y., Ivanov, V., Ivanova, M., Yevsiukova, F., Gasanov, M. "Increasing of Equipment Efficiency by Intensification of Technological Processes", Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 2018. <https://doi.org/10.3311/PPme.13198>

*Поступила (received) 14.02.2022*

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38067-936-36-64, e-mail: [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-2841-9455>;

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

**Заковоротній Олександр Юрійович (Zakovorotniy Alexander Yuryevich)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-3271, e-mail: [arcade@i.ua](mailto:arcade@i.ua);

**Майборода Віктор Станіславович (Maiboroda Viktor Stanislavovych)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: [maiborodavs@gmail.com](mailto:maiborodavs@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>;

**Охріменко Олександр Анатолійович (Ohrimenko Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (067) 267-69-43; e-mail: [alexhobs77@gmail.com](mailto:alexhobs77@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>;

**Федоренко Віталій Сергійович (Fedorenko Vitaly)** – аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (095) 9159688–mail: [19fws98@gmail.com](mailto:19fws98@gmail.com).

**YAKOVENKO I.E., PERMYAKOV A.A., KHARCHENKO O.S.**

## **DEVELOPMENT OF THE COMPONENT BASE OF UNIFIED ASSEMBLY AND PARTS OF INSTALLATION CLAMPING DEVICES**

The issues of unification of units and elements of special equipment were further developed in the work. Issues of a theoretical approach to the creation of an element base of unified assemblies and parts for existing layout schemes for mounting and clamping devices of equipment built on the principles of aggregation are considered. In order to subsequently minimize the cost of design and production. The authors propose a two-stage methodology for unifying fixture elements in order to create a reference and regulatory framework for such elements. At the first stage, based on the analysis of the functional purpose of the structural elements of various layout schemes of devices, a list of parts is established, the unification of which is possible and expedient. At the second stage, based on the strength analysis of the selected elements and the analysis of statistical information on the geometric parameters of the installed workpieces for various layout schemes of fixtures, the number of standard sizes and geometric parameters of these parts are determined. This approach allows you to create a constantly updated and edited database of unified fixture elements, which can be used in the process of computer-aided design.

**Keywords:** aggregated equipment, mounting fixture, unification, layout, strength analysis, elements, standard size

**ЯКОВЕНКО І.Є., ПЕРМЯКОВ О.А., ХАРЧЕНКО О.С.**

## **РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ УНІФІКОВАНИХ ВУЗЛІВ І ДЕТАЛЕЙ УСТАНОВКОВО ЗАТИСКОВИХ ВИКОРИСТАНЬ**

У роботі отримали подальший розвиток питання уніфікації вузлів та елементів спеціального обладнання. Розглянуто питання теоретичного підходу до створення елементної бази уніфікованих вузлів та деталей для існуючих компоувальних схем настановно затискних пристроїв обладнання, побудованого на принципах агрегування, з метою подальшої мінімізації витрат на проектування та виробництво. Авторами пропонується двоетапна методика проведення уніфікації елементів пристроїв з метою створення довідково-нормативної бази таких елементів. На першому етапі на підставі аналізу функціонального призначення структурних елементів різних компоновочних схем пристроїв встановлюється перелік деталей, уніфікація яких можлива та доцільна. На другому етапі на підставі аналізу міцності обраних елементів і аналізу статистичної інформації за геометричними параметрами встановлюваних заготовок для різних компоновочних схем пристосувань встановлюється кількість типорозмірів і геометричні параметри цих деталей. Такий підхід дозволяє створити постійно поповнювану та редаговану базу уніфікованих елементів пристроїв, яка може бути використана у процесі автоматизованого проектування.

**Ключові слова:** агрегатоване обладнання, установочно-затискний пристрій, уніфікація, компоновка, аналіз міцності, елементи, типорозмір

**ЯКОВЕНКО И.Э., ПЕРМЯКОВ А.А., ХАРЧЕНКО А.С.**

## **РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ УНИФИЦИРОВАННЫХ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ УСТАНОВОЧНО ЗАЖИМНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ**

В работе получили дальнейшее развитие вопросы унификации узлов и элементов специального оборудования. Рассмотрены вопросы теоретического подхода к созданию элементной базы унифицированных узлов и деталей для существующих компоновочных схем установочно зажимных приспособлений оборудования, построенного на принципах агрегатирования, с целью последующей минимизации затрат на проектирование и производство. Авторами предлагается двухэтапная методика проведения унификации элементов приспособлений с целью создания справочно-нормативной базы таких элементов. На первом этапе на основании анализа функционального назначения структурных элементов различных компоновочных схем приспособлений устанавливается перечень деталей, унификация которых возможна и целесообразна. На втором этапе на основании прочностного анализа выбранных элементов и анализа статистической информации по геометрическим параметрам устанавливаемых заготовок для различных компоновочных схем приспособлений устанавливается количество типоразмеров и геометрические параметры этих деталей. Такой подход позволяет создать постоянно пополняемую и редактируемую базу унифицированных элементов приспособлений, которая может быть использована в процессе автоматизированного проектирования.

**Ключевые слова:** агрегированное оборудование, установочно зажимное приспособление, унификация, компоновка, прочностной анализ, элементы, типоразмер

**Introduction.** One of the ways to increase the efficiency of technological preparation of production is to increase the level of use of standardized equipment and, first of all, machine tools, taking into account the subsequent specialization of production. This is especially true when using special equipment, which is created on the principles of aggregation. In this case, as a result of unification and standardization, designs are created that correspond to the most complete and efficient use of high-performance equipment, as well as designs that provide the minimum time for design and technological preparation for the production of equipment of this type, due to the use of CAD/CAM systems in the design process.

**Analysis of the main achievements and literature.** In research [1, 2] the issues of increasing the level of unification of machine tools are considered, a generalized criterion is given that can be used as the basis for the development of unified machine tools. The criterion is a typical installation diagram for machine tools. However, the implementation of work on the unification of machine tools in full should solve not only the issues of unification of basic devices, but also individual structural elements. In [1], the concept of unification is opposed to the mathematical concept of "sets". The description of unification processes by the methods of mathematical set theory makes it possible to clearly formulate a number of basic provisions and develop a calculation apparatus for solving practical problems of unification of machine tools. In papers [3],

a method for selecting machine fixtures based on classifiers of parts and assemblies is described, which can be used at the stage of designing the design of fixtures. However, part classifiers based on the principle of naming (cases, bushings, etc.) do not give a clear idea of the setting elements that should be used when orienting workpieces.

In papers [4,5], the unification of positioning clamping fixture (PCF) for processing the same type of parts of hydraulic fittings on multi-position modular machines was carried out, but there are no general recommendations for creating devices for processing parts of other classes. The papers [6, 7] consider the general issues of creating unified layout diagrams of PCF for specialized equipment, which is built on the principles of aggregation in order to subsequently minimize the costs of their design and production. The unification of layout schemes is based on the analysis of the designs of existing mounting fixtures, as well as the functional purpose of the structural elements and parts of the main fixture systems. However, the unification of individual elements and parts of the mechanisms of the considered layout schemes was not carried out. The article [8] describes a fixture design method based on the analysis of the power characteristics of the machining process and minimizes the deflection of the object under the action of external loads, this approach in the future makes it possible to develop parametric series of unified parts and elements of the PCF.

The works [9,10] laid the foundations for automating the design of fixtures for metal-cutting machine tools, which made it possible to create a number of real software systems. However, specific elements of the unification of structures were not covered. Further development of the principles of automation of various stages of fixture design (Computer-aided fixture design, CAFD-system) and analysis of the design decisions made are considered in [11-14]. So, in [12], a process-oriented model of the fixture design process was developed, which provides analysis of the workpiece manufacturing, synthesis and optimization of the fixture configuration, verification of the mechanical system "device - product" for given production conditions, functional relationships, and data flows between stages are determined, which allows implement an integrated approach to automated tooling design in multi-product production.

On the basis of the proposed conceptual solutions, in papers [15] specific issues of choosing the installation elements of the basing as a stage in the design of the layout of machine tools for a specific type of parts and the layout of the device are considered. Based on the developed algorithm, a reasonable choice of setting elements for blanks of body parts is implemented when implementing the basing scheme in three planes. The sequence of formation of a set of solutions is given when choosing the functional elements of a machine tool from the database, taking into account the design and technological characteristics of the workpiece.

**The purpose of the study, statement of the problem.** The aim of the study is the classification and subsequent unification of elements and parts of aggregated equipment fixtures for the implementation of an automated approach to the design process, increasing the serial production and possible readjustment of the PCF.

To achieve this goal, it is necessary:

- on the basis of the classification of layout diagrams of the PCF of aggregated equipment, perform the unification of the element base;
- to develop a set of standardized parts and assemblies that implement typical layout diagrams of PCF, the use of which reduces the complexity of design and manufacture, and also allows re-arrangement when changing processing objects.

**Research materials.** The unification of machine tools applies to types, designs, main dimensions and parameters of devices, their components, as well as materials, accuracy standards, etc. Unifications are subject to:

- parts of fixtures that have a specific functional purpose and have similar dimensions (body plates, clamping collets, annular and horn membranes, cassettes for multiple milling fixtures);
- assembly elements (assemblies) that perform functions of the same nature with slightly different working dimensions and dimensions (built-in double-acting pneumatic cylinders, pneumatic-hydraulic amplifiers, eccentric clamping mechanisms acting on two clamps, dividing mechanisms, etc.);
- fixtures for equipping typical operations, if their designs are similar to schemes, dimensions, operating conditions.

Unified designs of parts and assembly units should ensure optimal repeatability in fixtures or in arrangements of several parts, and unified fixtures should equip the optimal number of operations. Unified elements must have unified base and connecting places with a range of sizes from the required parametric range.

The structural layout schemes considered in [7] made it possible to identify the main units and elements of the PCF, which are characteristic of absolutely all layout options. These include:

- housing elements ( housings with various additional and connecting elements for basing and fixing the rest of the PCF units);
- power unit (drive);
- elements of workpiece basing and auxiliary devices;
- clamping unit.

As the analysis of the PCF layout solutions has shown, for each of the considered layout schemes, its own set of details is correct.

The elements of the PCF case are mostly original. As shown by the analysis of the layout diagrams of the housings, that the actually unified element of the housing is the sole, the dimensions of which are regulated and determined by the diameter of the faceplate and the number of positions of the rotary dividing table. The design and geometrical parameters of the housing are directly determined by the parameters of the workpiece, the layout of the device, the type of functional elements and their relative position.

The energy unit is practically independent of the adopted layout scheme, since in most cases unified hydraulic or pneumatic drives are used. Only in some cases, to minimize the dimensions of the device, original body designs and unified elements of the rod and piston group are used. Therefore, for the elements of this assembly, the unification was carried out on the basis of the normalized size ranges of the drive elements, depending on the need to provide the required clamping force, without the use of additional studies.

The locating node is determined primarily by the technological locating scheme and the geometric parameters of the workpiece. When considering the layout schemes, almost all typical basing schemes were considered using mounting pins, conventional and self-centering prisms, strips, etc. All these elements have a clear functional purpose and design elements. In the general case, the surfaces that are in contact with the workpiece are original, so the unification was carried out only in relation to the design of the base element, and the geometric parameters are determined depending on the parameters of the workpiece and the layout of the device. The exception is the special elements for basing jig devices, which are implemented in the form of two standard pins: cylindrical (Fig. 1a) and rhombic (Fig. 1b).

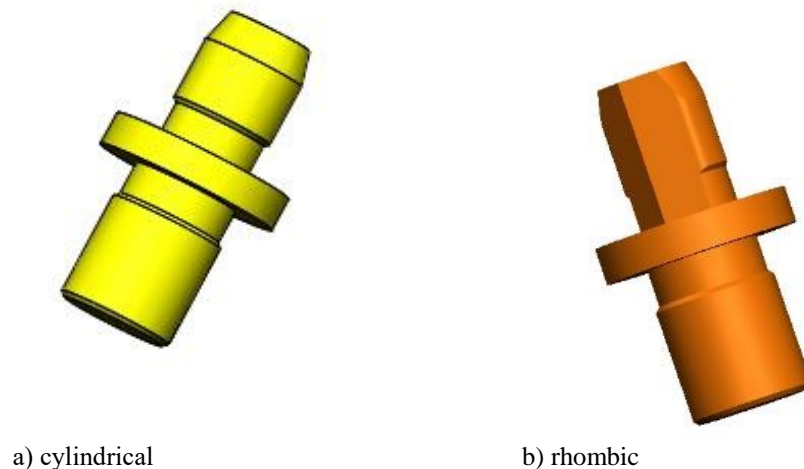


Fig.1 – Positioning pins

Particular attention during the unification was paid to the clamp assembly, as the most specified element of the fixture. Despite the variety of options for layout schemes and their parametric implementation, for each option it is possible to establish a clear list of details and elements that provide the technical implementation of the selected scheme. All considered elements perform well-defined functional tasks, have a certain kinematics of movement and, accordingly, design features, therefore, they can be considered as elements of unification.

In the process of research for each layout scheme of the USP at the first stage, using the simplification method, the authors established the necessary and sufficient list of parts that implement the corresponding scheme (Figure 2 shows an example of detailing the direct-action clamping mechanism with a lever-type clamp for further unification, similarly, and other options, such as a clamping mechanism with a traverse). As the analysis showed, part of the details (25-35% depending on the layout scheme of the PCF) are standard and do not require unification, but are included in the assembly specification in the section of standard elements.

At the second stage, a 3D model of the mechanism is created and a strength analysis of the mechanism is carried out in order to identify the main most loaded element, which determines the strength of the entire structure and is the basis for determining the parametric characteristics of this element itself and the assembly parts mating with it. In the example (Fig. 3), the limiting element is a groove on the thrust shaft, while the proposed diameter provides a 3-fold margin of safety of the element, which is sufficient for such a mechanical design. Using the range of realizable loads, taking into account the necessary margin of safety, as well as the value of the working stroke of the main element for the layout scheme under consideration, a parametric series of geometric dimensions of the element and, accordingly, the parts mating with it, is formed. The basis for the formation of parametric series are tables of preferred sizes.

Subsequently, elements and parts of the same type of design and the same functional purpose were identified for various layout schemes and mechanisms, and parametric series were adjusted for unified parts.

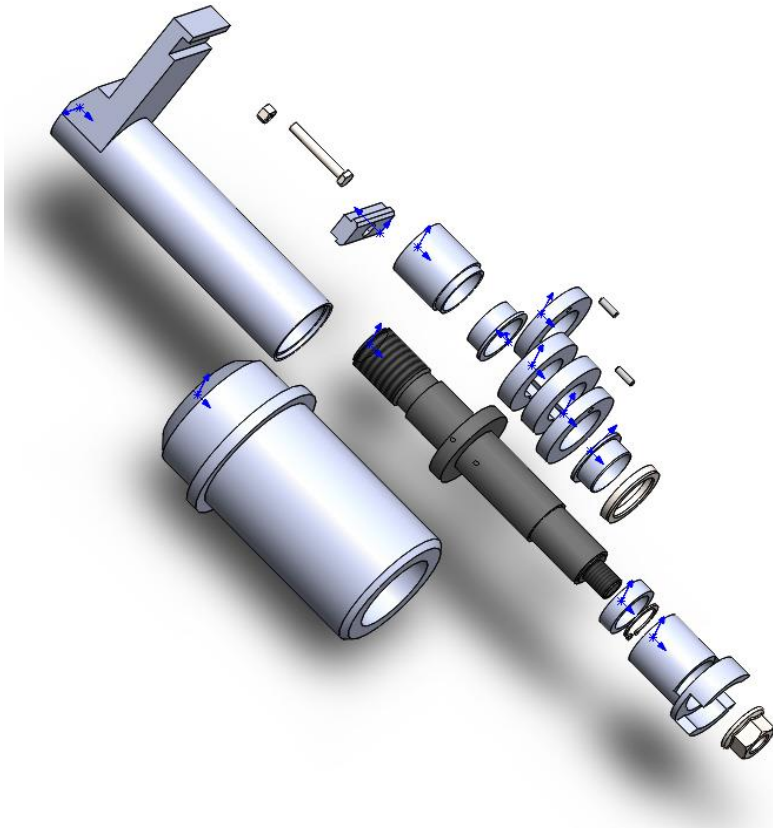


Fig. 2 – Tack elements subject to unification

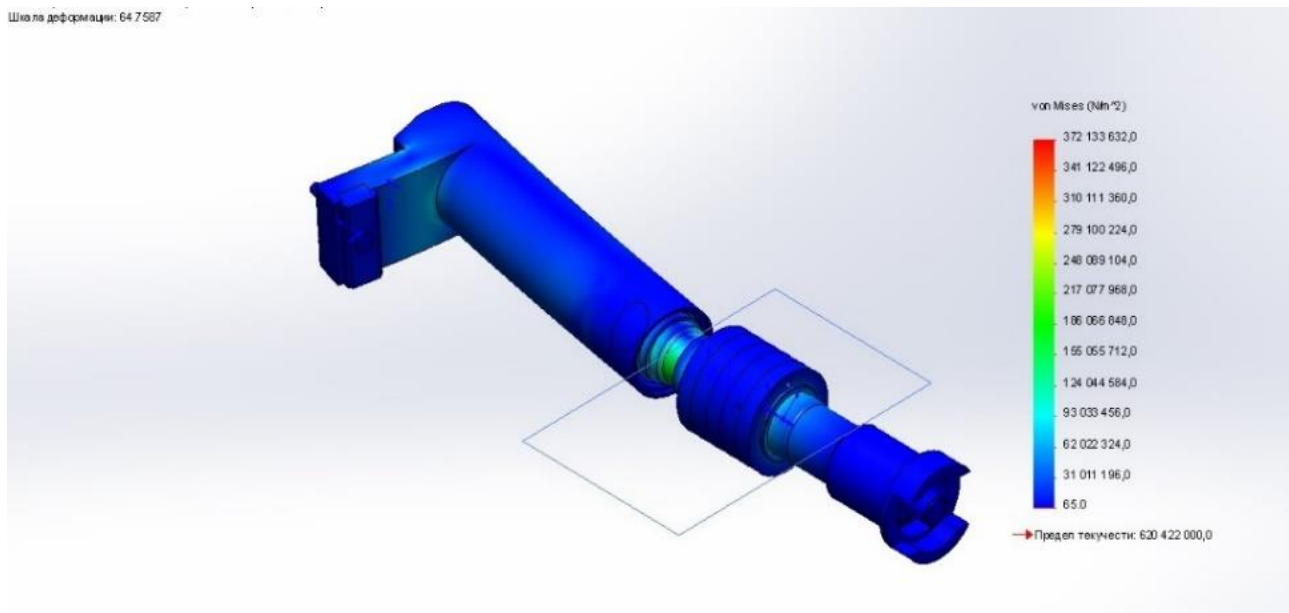


Fig. 3 – Load diagram of the clamping mechanism to adapt the layout scheme of direct action

This approach made it possible to create a database of 3D models of unified elements and parts for ultrasonic devices of equipment, which is built according to the aggregate principle (a fragment for the above example of the ultrasonic device layout diagram is shown in Table 1).



Table 1 – A set of standard PCF elements for a structural layout diagram of direct action

Element	Element	Element
 Bolt Standard element ISO 4014	 Screw Standard element GOST 11644-75	 Nut Standard element ISO 4034
 Retaining Ring Standard element GOST 13942-86	 Pin Standard element GOST 3129-70	 Cuff Standard element GOST 678-72
 Sleeve Unified element 6 Size	 Bronze Sleeve Unified element 6 Size	 Special Nut Unified element 6 Size
 Spacer Sleeve Unified element 6 Size	 Ring Unified element 2 Size	 Double Ring Unified element 6 Size
 Hole Ring Unified element 3 Size	 Hull Unified element 6 Size	 Half-coupling Unified element 6 Size
 Tack Unified element 6 Size	 Rod Unified element 2 Size	 Strip Unified element 1 Size

**Conclusion.** On the basis of the conducted research of the layout diagrams of the PCF for aggregated equipment, a method for unifying the elements and parts of the main units has been developed. The proposed method takes into account the functional purpose of parts and elements when choosing a structure, and the assignment of parametric characteristics of geometric dimensions is performed on the basis of a strength analysis of the structure's operability and general engineering recommendations of preferred sizes.

The proposed technique was implemented when creating a database of unified parts of the PCF for aggregated equipment. The developed database was the information support for automating the design process of the PCF, which made it possible to select and maximize the use of unified elements of the assembly kit in the development of the device.

The method proposed by the authors allows expanding and correcting the base of unified devices when considering new layout diagrams of the PCF both for modular machines and for other equipment that uses the principles of unification and aggregation.

**Список литературы:**

1. Кузнецов Ю.Н. Унификация и стандартизация станочных приспособлений. Основные требования. – М.: Изд.стандартов, 1976. – 100 с.
2. Методика унификации и стандартизации станочных приспособлений. Основные требования. – М.: Изд.стандартов, 1976. – 100 с.
3. Соколов Е.В. Выбор станочных приспособлений на основе классификаторов деталей и оснастки. – М.: Машиностроение, 1986. – 43 с.
4. Пермяков А.А., Яковенко И.Э., Фадеев А.В. О моделировании компоновок УЗП многопозиционных агрегатных станков //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. - №6. – С.148-152.

5. *Пермяков А.А., Тимофеев Ю.В., Яковенко И.Э.* Оптимизация проектирования и производства УЗП на основе унификации компоновочных решений. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 2000. - Вып.110. - С.70-74.
6. *М.А. Терехов, И.Э. Яковенко.* К вопросу унификации установочно – зажимных приспособлений в серийном производстве.// VIII Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (22–24 квітня 2014 року: матеріали конференції: у 3-х ч. – Ч. 1 / оргкомітет: Л.Л. Товажнянський (голова) та ін. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014.
7. *Пермяков А.А., Яковенко И.Э.* К вопросу об унификации установочно зажимных приспособлений агрегатированного оборудования //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 33 (1205). – 166 с. –с.38-43.
8. *Q. Lin, J. W. Burdick, E. Rimon* (Member IEEE) Constructing Minimum Deflection Fixture Arrangements Using Frame Invariant Norms. //IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING, VOL. 3, NO. 3, JULY 2006, pp.272-286.
9. *Ракович А.Г.* Автоматизация проектирования технологической оснастки. – Киев, 1987. – 135 с.
10. *Ракович А.Г.* Основы автоматизации проектирования технологических приспособлений / Под ред. Е.А.Стародетко.- Мн.: Наука и техника, 1985.- 285 с..
11. *Wang H., Rong Y., Li H., Price S.* Computer-aided fixture design: recent research and trends. J. Comp.-Aided Des. 42 (12), 1085-1094 (2010).
12. *Ivanov V.* Process-oriented approach to fixture design /Advances in Design, Simulation and Manufacturing: Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018, June 12-15, 2018, Sumy, Ukraine. pp.42-49.
13. *Іванов В.О.* Структурно-функціональне моделювання процесу проектування верстатних пристроїв. / В.О. Іванов, В.Є. Карпусь, С.М. Ващенко, Й. Заяць, А.І. Кармаза// Вісник НТУ «ХПІ». Серія Технології в машинобудуванні. – Х.:НТУ «ХПІ», 2017. -№ 17 (1239). С. 30-37.
14. *Ivanov V., Vaschenko S., Rong Y.* Information of the Computer Aided Fixture Design System. Proc of 12<sup>th</sup> Int.Conf ICTERI'2016, Kyiv, Ukraine, June 21-24, 2016, CEUR-WS.org, /Vol-1614, pp.73-86.
15. *В.О. Іванов , В.О. Залоза , Є.В. Басова , В.С. Капанайко.* Алгоритм вибору установлювальних елементів верстатних пристроїв. //Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ". Луцьк, 2018. Випуск № 64, с. 65-72.

#### Bibliography (transliterated):

1. *Kuznetsov YU.N.* Unifikatsiya i standartizatsiya stanochnykh prispособlenij. Osnovnye trebovaniya. – М.: Izd.standartov, 1976. – 100 s.
2. *Metodika unifikatsii i standartizatsii stanochnykh prispособlenij. Osnovnye trebovaniya.* – М.: Izd.standartov, 1976. – 100 s.
3. *Sokolov E.V.* Vybory stanochnykh prispособlenij na osnove klassifikatorov detalej i osnastki. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 43 s.
4. *Permyakov A.A., Yakovenko I.E., Fadeev A.V.* O modelirovanii komponovok UZP mnogopozitsionnykh agregatnykh stankov //Vіsник Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPІ». – Kharkiv: NTU «KHPІ». – 2003. - №6. – S.148-152.
5. *Permyakov A.A., Timofeev YU.V., Yakovenko I.E.* Optimizatsiya proektirovaniya i proizvodstva UZP na osnove unifikatsii komponovochnykh reshenij. // Vestnik KHGPU. - Khar'kov: KHGPU. - 2000. - Vyp.110. - S.70-74.
6. *М.А. Терехов, И.Э. Яковенко.* К вопросу унификации установочно – зажимных приспособлений в серийном производстве.// VIII Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (22–24 квітня 2014 року: матеріали конференції: у 3-х ч. – Ч. 1 / оргкомітет: Л.Л. Товажнянський (голова) та ін. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014.
7. *Permyakov A.A., Yakovenko I.E.* K voprosu ob unifikatsii ustanovochno zazhimnykh prispособlenij agregatirovannogo oborudovaniya //Vіsник Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPІ». Zbirnik naukovikh prac'. Seriya: Tekhnologii v mashinobuduvanni. – KH. : NTU «KHPІ». – 2016. – № 33 (1205). – 166 s. –s.38-43.
8. *Q. Lin, J. W. Burdick, E. Rimon* (Member IEEE) Constructing Minimum Deflection Fixture Arrangements Using Frame Invariant Norms. // IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING, VOL. 3, NO. 3, JULY 2006, pp.272-286.
9. *Rakovich A.G.* Avtomatizatsiya proektirovaniya tekhnologicheskoy osnastki. – Kiev, 1987. – 135 s.
10. *Rakovich A.G.* Osnovy avtomatizatsii proektirovaniya tekhnologicheskikh prispособlenij / Pod red. E.A.Starodetko.- Мн.: Наука і техніка, 1985.- 285 s..
11. *Wang H., Rong Y., Li H., Price S.* Computer-aided fixture design: recent research and trends. J. Comp.-Aided Des. 42 (12), 1085-1094 (2010).
12. *Ivanov V.* Process-oriented approach to fixture design /Advances in Design, Simulation and Manufacturing: Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018, June 12-15, 2018, Sumy, Ukraine. pp.42-49.
13. *Іванов В.О.* Структурно-функціональне моделювання процесу проектування верстатних пристроїв. / В.О. Іванов, В.Є. Карпусь, С.М. Ващенко, Й. Заяць, А.І. Кармаза// Вісник НТУ «ХПІ». Серія Технології в машинобудуванні. – Х.:НТУ «ХПІ», 2017. -№ 17 (1239). С. 30-37.
14. *Ivanov V., Vaschenko S., Rong Y.* Information of the Computer Aided Fixture Design System. Proc of 12<sup>th</sup> Int.Conf ICTERI'2016, Kyiv, Ukraine, June 21-24, 2016, CEUR-WS.org, /Vol-1614, pp.73-86.
15. *V.O. Ivanov, V.O. Zalozha , E.V. Basova , V.S. Kapanaiko.* Algoritm voboru ustanovlyval'nikh elementiv verstatnikh pristroiv. //Mizhvuziv'skij zbimik "NAUKOVI NOTATKI". Luc'k, 2018. Vipusk № 64, s. 65-72.

*Поступила (received) 15.03.2022*

#### *Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Яковенко Ігор Едуардович (Яковенко Игорь Эдуардович, Yakovenko Ihor Eduardovich)** – кандидат технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Національного Технічного Університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: [igor.dych59@gmail.com](mailto:igor.dych59@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-8344-996X>

**Пермяков Олександр Анатолійович (Пермяков Александр Анатольевич, Permyakov Alexandr Anatolievich)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Національного Технічного Університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: [perm\\_a@i.ua](mailto:perm_a@i.ua), <https://orcid.org/0000-0002-9589-0194>

**Харченко Олександр Сергійович (Харченко Александр Сергеевич, Kharchenko Oleksandr Serhyyovych)** – аспірант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Національного Технічного Університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +380994819448; e-mail: [alexandr743@gmail.com](mailto:alexandr743@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7415-6169>

**СТЕПАНОВ М.С., ЛІТОВЧЕНКО П.І., ІВАНОВА Л.П., ІВАНОВА М.С.**

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РОБОЧОЇ РІДИНИ В ПІДШИПНИКАХ ШПИНДЕЛЯ КРУГЛОШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

Виконано експериментальні дослідження температури робочої рідини в підшипниках шпинделя шліфувальної бабки круглошліфувальних верстатів різних моделей. Описано умови виконаних експериментальних досліджень. Розглянуто вплив температури навколишнього середовища та конструктивних параметрів деталей шліфувальних бабок на зміну температури робочої рідини в передньому і задньому підшипниках шпинделя. Експериментально доведено, що різниця температур рідини в передньому і задньому підшипниках залежить від часу роботи верстата. Встановлено часовий інтервал роботи верстата, коли настає теплова рівновага.

**Ключові слова:** круглошліфувальний верстат, передній і задній підшипники шліфувальної бабки, температура рідини, температура навколишнього середовища.

**STEPANOV M.S., LITOVCHENKO P.I., IVANOVA L.P., IVANOVA M.S.**

## **EXPERIMENTAL STUDIES OF WORKING FLUID TEMPERATURE IN SPINDLE BEARINGS OF CYLINDRICAL GRINDING MACHINES**

Experimental studies of the temperature of the working fluid in the spindle bearings of the grinding head of circular grinding machines of different models have been performed. The conditions of the performed experimental researches are described. The influence of ambient temperature and design parameters of grinding head parts on the change of working fluid temperature in the front and rear spindle bearings is considered. It is experimentally proven that the difference in fluid temperatures in the front and rear bearings depends on the operating time of the machine. The time interval of machine operation when thermal equilibrium occurs is set.

**Keywords:** cylindrical grinding machine, front and rear grinder bearings, fluid temperature, ambient temperature.

**1. Вступ.** В загальному балансі теплових деформацій переважають деформації шпиндельної бабки [1, 2]. Нерівномірний нагрів стінок шліфувальної бабки з розташованими в ній підшипниками шпинделя обумовлює його перекіс, а отже, похибки форми оброблених поверхонь [3]. Для усунення цих похибок важливо знати тепловий стан робочої рідини у підшипниках і визначити його вплив на похибки обробки.

**2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Раніше робилися спроби модернізації підшипникових вузлів, які забезпечували зниження температури корпусу шліфувальної бабки на 25% [4]. Пропонувалися конструктивні схеми охолодження, що забезпечували прогнозовану поведінку шпиндельних вузлів [5, 6]. Розроблено принципово нові способи охолодження шпиндельних вузлів [7]. Нові, підвищені вимоги до точності обробки диктують потребу у більш детальному вивченні теплового стану технологічних рідин шліфувальних верстатів.

**3. Мета дослідження.** Отримання фактичних кількісних значень температур робочої рідини в підшипниках шпинделя шліфувальних верстатів і дослідження зміни температури робочої рідини під час роботи верстата.

**4. Викладення основного матеріалу.** Застосовувалися наступні умови проведення експериментальних досліджень.

Час проведення експериментів від 0 до 360 хв. Температуру робочої рідини у підшипниках і температуру навколишнього середовища фіксували одночасно. Температуру робочої рідини фіксували при обертанні шпинделя на холостому ходу, тому що за даними [8] зміна навантаження на верстат практично не впливає на величину теплових деформацій технологічної системи.

При вимірюванні температури шліфувальна бабка знаходилася у нерухомому стані. Подача МОР у зону різання була відсутня. Експерименти проводили на верстатах ЗБ151 і ЗБ161 (оброблялися деталі, які не відрізнялися за конструкцією) і ін.

Температурне поле досліджували за допомогою термопар, розміщених на поверхнях корпусу шліфувальної бабки. Крім того, термопари розташовували в резервуарі гідросистеми (бак для змащування підшипників шпинделя).

Перед початком вимірювань переконувалися, щоб температури деталей і вузлів верстата була ідентична температурі навколишнього середовища. Для виконання цієї вимоги верстат повинен не працювати протягом 12 годин.

Встановлено (рис. 1), що наприкінці робочого дня (через 360 хв. після включення) температура рідини в підшипниках максимальна і може досягати 60 °С, що критично не допустимо.

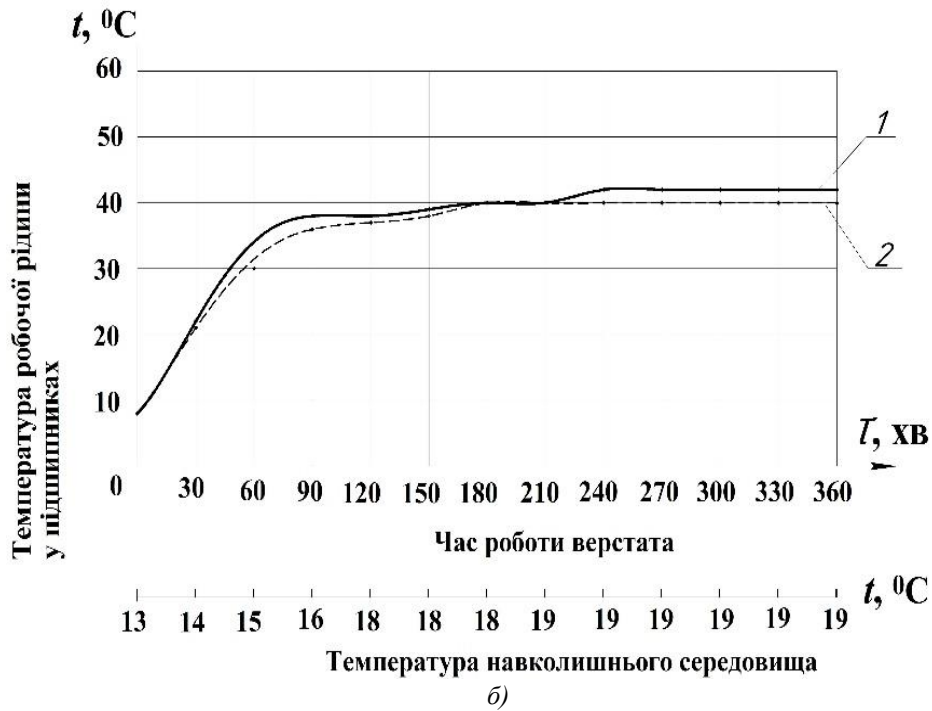
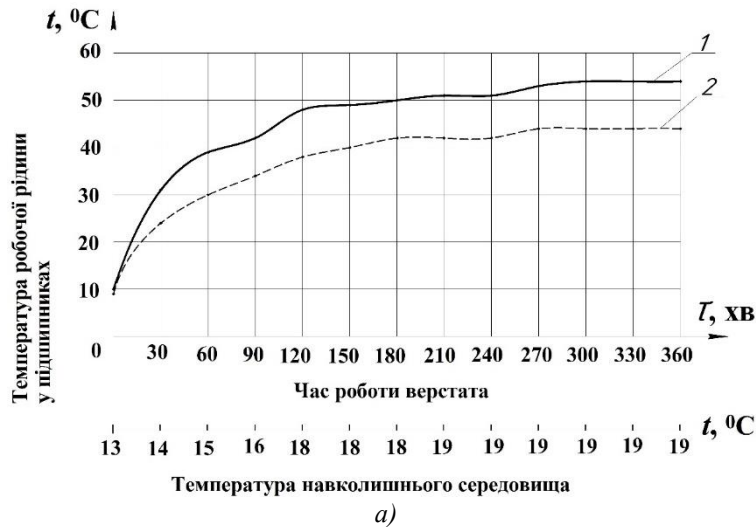


Рис. 1 – Вплив часу роботи круглошліфувального верстата 3Б151 на температуру робочої рідини у підшипниках шпинделя: 1, 2 – передній і задній підшипники, відповідно; а, б – варіанти впливу температурного і технологічного факторів

Як правило температура робочої рідини в передньому підшипнику (лівому у шліфувального круга) вище, ніж у задньому (біля шківів пасової передачі).

Максимальна температура робочої рідини у підшипниках встановлюється для різних верстатів у інтервалі 200...300 хв. роботи верстатів (рис. 1, а, б). Стабілізація температури рідин (повна теплова рівновага) встановлюється через 150...180 хв. роботи верстата.

Температура робочої рідини у підшипниках в початковий момент часу коливалася від 8 до 10 °С і визначалася температурою навколишнього середовища.

Температура робочої рідини в опорах різна. В передній опорі вона вища, ніж у задній. Різниця спостерігається протягом всього робочого дня і складає від 2 до 11 °С. Причому на одних верстатах різниця носить постійний характер, а на інших – різниця з часом збільшується. Підвищення якості опорних вузлів (в тому числі підшипників шпинделя) є одним з ефективних напрямків підвищення точності шліфувальних верстатів. Для цього в опорах

рідинного тертя зменшують теплоутворення, яке визначається тепловим станом рідин, що застосовуються. Нагрів опор призводить до зміни зазору у підшипниках і, в результаті, до теплового зміщення кінця шпинделя. В залежності від класу точності верстата допускаються наступні значення температури опор (табл.1).

Таблиця 1 – Допустима температура опор шпинделя шліфувального верстата

Клас точності верстата	Н	П	В	А	С
Допустима температура в опорах шпинделя, °С	60	50...55	40...45	36...40	28...30

Підшипники ковзання шпинделя шліфувальної бабки повинні забезпечувати радіальну і кутову жорсткість мастильного шару і надійність опор в екстремальних умовах нагріву. Температура нагріву робочої рідини у підшипниках особливо важлива для верстатів підвищеної точності. Для її визначення, як правило, розраховують тиск мастильного шару на поверхні ковзання при сумісному рішенні рівнянь балансу витрат рідини і рівняння Рейнольдса для врівноваженого опорного вузла при дії певних навантажень та моменту.

Джерелом теплоутворення у підшипнику є тертя між його деталями. Момент тертя залежить від конструкції підшипника, а також, точності його виготовлення і монтажу у бабці.

Працездатність підшипників ковзання залежить від правильності конструктивного виконання, ефективності системи мащення, і якості робочої рідини, що застосовується. Експерименти показали значну відмінність фактичної температури нагріву опор шпинделів від розрахункової. Це свідчить про вплив технологічних параметрів, зокрема точності, на теплоутворення у підшипникових вузлах.

Досліджували вплив конструктивних параметрів деталей круглошліфувальних верстатів на температуру робочої рідини у підшипниках шпинделя.

Експерименти проводили на верстатах 3А164 та 3174, у яких ширина лицьової частини шліфувальних бабок більше у 1,5 рази ніж у верстатів 3М151, 3А151, 3Б151, 3А161.

Як показали експерименти (рис. 3), температура робочої рідини у підшипниках шпинделя, як у раніш досліджуваних верстатів, залежить від часу роботи. За робочу зміну вказана температура може підійнятися від початкової на 20...33 °С і залежить, у тому числі, від температури навколишнього середовища.

Різниця температури робочої рідини в підшипниках не перевищує 1,5...2 °С, причому, як правило, більш висока температура спостерігається у рідині в передньому (лівому) підшипнику. У початковий період роботи верстату (перші 30 хвилин) різниця температури практично відсутня.

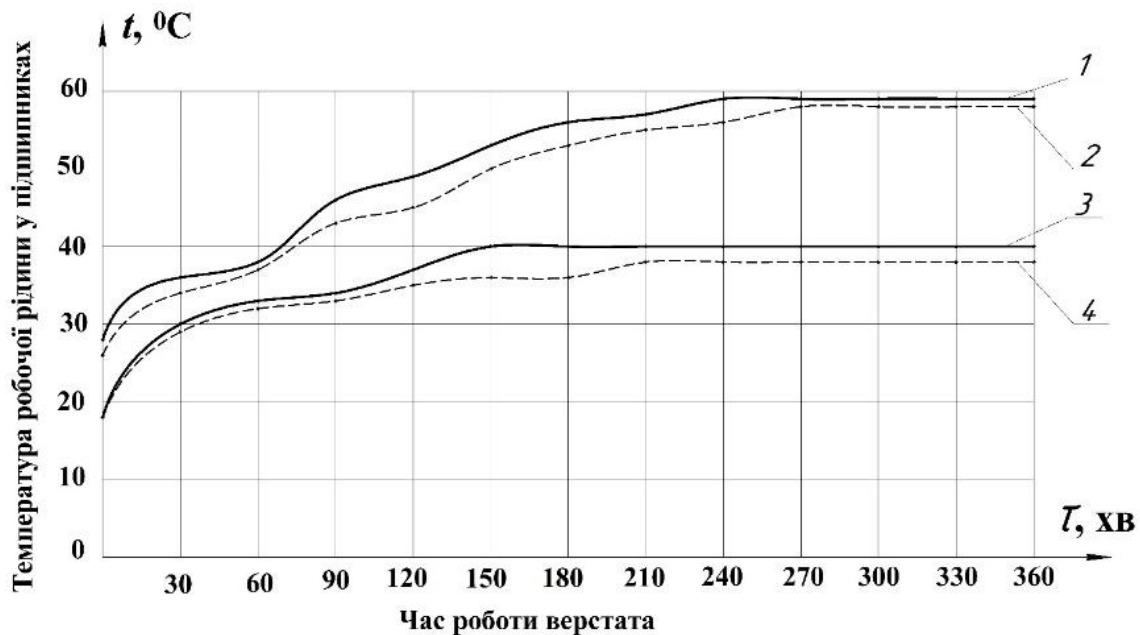


Рис. 2 – Вплив часу роботи круглошліфувального верстата на температуру робочої рідини у підшипниках шпинделя: 1, 2 – передній і задній підшипники, відповідно, при температурі навколишнього середовища 26-27 °С; 3, 4 – передній і задній підшипники, відповідно, при температурі навколишнього середовища 17-18 °С

Протягом робочого дня температура навколишнього середовища може змінюватися в широких межах (рис. 3). В ході проведення експериментів діапазон зміни температури знаходився в межах від 13 °С до 23 °С. Характер змін спостерігався різний.

У зв'язку з цим досліджували вплив середньої температури навколишнього середовища на середню температуру робочої рідини в підшипниках шпинделя шліфувальної бабки (рис. 4).

Як показують графіки, при збільшенні значення середньої температури навколишнього середовища протягом робочого дня з 15 °С до 23 °С (протягом робочої зміни) середня температура робочої рідини у передній опорі збільшується з 34 °С до 45 °С, тобто, на 11 °С. Температура ж робочої рідини у задньому підшипнику збільшується з 33 °С до 37 °С і, навіть, 40 °С.

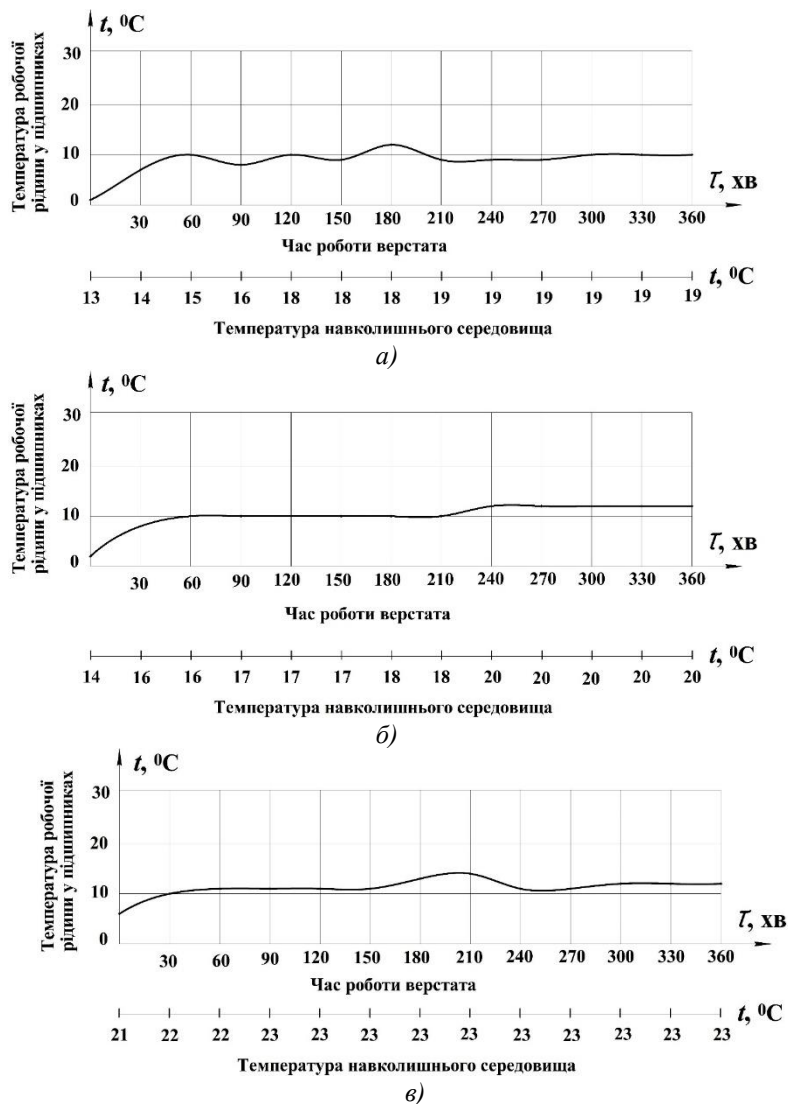


Рис. 3 – Різниця температур робочої рідини в підшипниках шпинделя верстатів 3Б151 при різних значеннях температури навколишнього середовища: а – верстат 1; б – верстат 2; в – верстат 3



Рис. 4 – Температура навколишнього середовища у цеху

Якщо на початку робочого дня різниця температур в передній і задній опорах складає приблизно 1 °С (тобто, практично невідчутна), то наприкінці робочого дня вона може складати 7...12 °С (рис. 5). При цьому температура рідини у підшипниках зростає, а її стабілізація настає при температурі навколишнього середовища, яка знаходиться у діапазоні 18...20 °С (див. рис. 1, а, б).

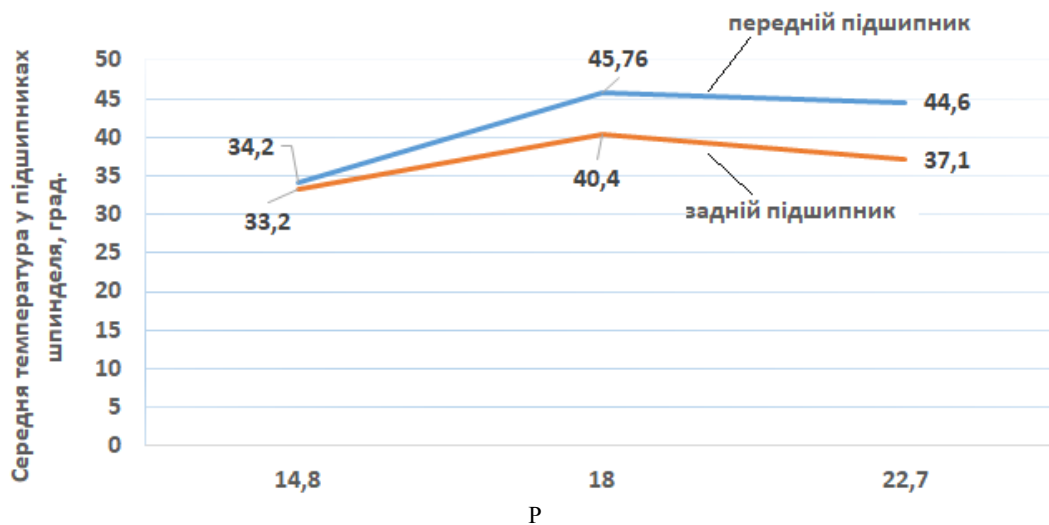


рис. 5 – Вплив середньої температури навколишнього середовища протягом робочого дня на середню температуру робочої рідини у підшипниках шпинделя

#### Висновки.

1. Температура робочої рідини в підшипниках шпинделя може складати 45...50 °С, а в деяких випадках може досягати 60 °С, що неприпустимо.
2. Початкова температура рідини залежить від температури навколишнього середовища і складає 8...26 °С.
3. Різниця температур рідини в підшипниках залежить від часу роботи верстата і складає 2...10 °С. Як правило, температура у передньому підшипнику вища за температуру у задньому.
4. Теплова рівновага у рідині настає після 150...180 хвилин роботи верстату.
5. Ефективність заходів по модернізації шпиндельних вузлів підвищується при їх комплексному використанні із заходами по зменшенню розбризкування МОР.

#### Список літератури:

1. Рохин В.Л. Исследование баланса тепловых деформаций токарного станка с ЧПУ / В.Л. Рохин, Л.В. Рохин // Вестник КГУ. – 2005. – №2. – С. 106-108.
2. Stepanov, M., Ivanova, M., Litovchenko, P., Ivanova, L., Tarasenko, O. Study of Thermal Modes of Working Fluids in Grinding Machines. In: , et al. Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2020. – P. 299–308.
3. Іванова Л.П. Аналіз теплового стану технологічних рідин металорізальних верстатів / Л.П. Іванова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Серія: Технології в машинобудуванні, №1. – 2020. – С. 36-40.
4. Вектерис В.Ю. Стабилизация температурного режима круглошлифовальных станков / В.Ю. Вектерис // Станки и инструмент. – 1986.– №7.– с. 16-17.
5. Солоха В.В. Зниження впливу теплових деформацій на точність обробки на токарних верстатах / В.В. Солоха, В.С. Ліліченко, М.В. Фролов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – №2. – С. 69-72.
6. Патент на корисну модель №116095, Україна, МПК(2019.01) . Пристрій подачі мастильно-охолоджуючої рідини / М.С. Степанов, П.І. Літовченко, О.В. Котляр, М.С. Іванова, Л.П. Іванова, Є.В. Басова; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ». – № у 2018 11969; опубл. 12.08. 2019. Бюл. №15.
7. Дубров Д.Ю. О возможности стабилизации температуры шпиндельного узла металлорежущего станка / Д.Ю. Дубров, Ю.С. Дубров, Д.А. Сыромятников // Интернет-журнал «Науковедение», 2017. – Том. 9. – №8. – с. 1-7. Режим доступа: [naukovedenie.ru/PDF/155TVN617.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/155TVN617.pdf) (доступ свободный). Загл. с экрана.
8. Дибиров С.Ю. Особенности температурных деформаций станков с ЧПУ / С.Ю. Дибиров, Н.Д. Бахмуткадиев, В.И. Дудин // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – №5. – С. 65-72.

#### References (transliterated)

1. Rohin V.L., Rohin L.V. *Issledovanie balansa teplovykh deformacij tokarnogo stanka s CHPU* [Investigation of the balance of thermal deformations of a CNC lathe]. / Vestnik KGU. №2. 106-108 (2005).
2. Stepanov, M., Ivanova, M., Litovchenko, P., Ivanova, L., Tarasenko, O. Study of Thermal Modes of Working Fluids in Grinding Machines. In: , et al. Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 299–308. (2020).
3. Ivanova L.P. *Analiz teplovoho stanu tekhnolohichnykh ridyn metalorizal'nykh verstativ* [Analysis of the thermal state of technological fluids of metal-cutting machines] / Visnyk NTU "KHPI". Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni. №1. 36-40 (2020).
4. Vekteris V.YU. *Stabilizaciya temperaturnogo rezhima krugloshlifoval'nykh stankov* [Stabilization of the temperature regime of cylindrical grinding machines] / Stanki i instrument. №7. 16-17. 1986.
5. Solokha V.V. *Znyzhennia vplyvu teplovykh deformatsii na tochnist obrobky na tokarnykh verstatakh* [Reduction of influence of thermal deformations on accuracy of processing on lathes] / Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni. №2. 69-72 (2011).
6. Patent for utility model №116095, Ukraine, IPC (2019.01). Lubricating and coolant supply device / M.C. Stepanov, P.I. Litovchenko, O.V. Kotlyar, M.S. Ivanova, L.P. Ivanova, E.V. Basova; applicant and patent owner Nat. tech. HPI University. № u 2018 11969; publ. 12.08. 2019. Bull. №15.
7. Dubrov D.YU. *O vozmozhnosti stabilizacii temperatury shpindel'nogo uzla metallorozhushchego stanka* [About the possibility of stabilizing the temperature of the spindle unit of the metal-cutting machine] / Internet-zhurnal «Naukovedenie», Vol. 9. №8. 1-7 (2017). – Rezhim dostupa: [naukovedenie.ru/PDF/155TVN617.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/155TVN617.pdf) (dostup svobodnyj). Zagl. s ekrana.
8. Dibirov S.YU. *Osobennosti temperaturnykh deformacij stankov s CHPU* [Features of thermal deformations of CNC machines] / Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. №5. 65-72 (2016).

Поступила (received) 24.03.2022

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Степанов Михайло Сергійович (Степанов Михаил Сергеевич, Mykhailo Stepanov)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-2224-6509>; тел.: (057) 720-66-25. e-mail: [mykhaylo.stepanov@khp.edu.ua](mailto:mykhaylo.stepanov@khp.edu.ua).

**Літовченко Петро Іванович (Литовченко Петр Иванович, Petro Litovchenko)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-4483-597X>, e-mail: [pilitovchenko1950@gmail.com](mailto:pilitovchenko1950@gmail.com).

**Іванова Лариса Петрівна (Иванова Лариса Петровна, Larysa Ivanova)** – старший викладач кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-2390-7372>, тел.: (057) 720-66-25, e-mail: [larisanangu@gmail.com](mailto:larisanangu@gmail.com).

**Іванова Марина Сергіївна (Иванова Марина Сергеевна, Maryna Ivanova)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-0848-6805>; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: [maryna.ivanova@khp.edu.ua](mailto:maryna.ivanova@khp.edu.ua).



**ФЕСЕНКО А. В., ЄВСЮКОВА Ф. М., СЛІПЧЕНКО С. Є., ЛИННИК О. І.**

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІНІШНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ**

Розглянуті питання фінішних операцій механічної обробки і забезпечення обґрунтованого вибору оптимальних варіантів з урахуванням розподілу між зніманням матеріалу інструментом і тертям зв'язки при контакті. При цьому треба забезпечити якомога більший виступ вершин зернин над рівнем зв'язки круга, а також своєчасного видалення з робочої поверхні круга затуплених зернин. Пропонується застосування інструментів з підвищеними фізико-механічними можливостями для обробки з відшаруванням поверхового шару заготовки. Суть процесу полягає в тому, що він концентрує все видалення матеріалу на вузькій контактній довжині, при цьому забезпечується максимальна швидкість з найменшою питомою енергією шліфування. При шліфуванні відшаруванням у зоні видалення припуску знімання на порядок вище, ніж при звичайному шліфуванні. Внесок енергії тертя та орання стає малою частиною загальної питомої енергії шліфування. Тепло, що виділяється під час шліфування, зменшується, умови його розсіювання в процесі точкового шліфування покращуються. Зазначені дослідження дозволяють усвідомити фізичну сутність процесу, визначити режими обробки, а також шляхи оптимізації технологічних параметрів точкового шліфування.

Ключові слова: фінішні механічні операції, абразивна обробка, інструмент, засоби механічної обробки відшаруванням матеріалу.

**FESENKO A. V., YEVSUKOVA F. M., SLIPCHENKO S. YE., LYNNYK O. I.  
IMPROVING THE EFFICIENCY OF FINISHING.**

The issues of finishing operations of machining and providing a reasonable choice of optimal options, taking into account the distribution between the removal of material by the tool and the friction of the ligament at the contact. At the same time it is necessary to ensure the greatest possible protrusion of the tops of the grains above the level of ligament of the circle, as well as the timely removal of blunt grains from the working surface of the circle. The use of tools with increased physical and mechanical capabilities for processing with exfoliation of the surface layer of the workpiece is proposed. The essence of the process is that it concentrates all the removal of material on a narrow contact length, while providing maximum speed with the lowest specific grinding energy. When grinding by exfoliation in the area of removal of the removal allowance is an order of magnitude higher than when conventional grinding. The contribution of friction and plowing energy becomes a small part of the total specific energy of grinding. The heat released during grinding is reduced, its dissipation conditions in the process of spot grinding are improved. These studies allow us to understand the physical essence of the process, to determine the modes of processing, as well as ways to optimize the technological parameters of spot grinding.

Keywords: finishing mechanical operations, abrasive treatment, tool, means of mechanical processing by exfoliation of material

**Вступ.** Робота спрямована на вирішення актуальної науково-практичної проблеми підвищення ефективності фінішних операцій механічної обробки і забезпечення обґрунтованого вибору оптимальних варіантів. Показано, як на процес різання впливає розподіл між зніманням матеріалу інструментом і тертям зв'язки при контакті. Розглянуті питання підвищення ефективності обробки за рахунок використання інструментів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Пропонується використовувати обробку з відшаруванням поверхового шару заготовки за один прохід при кутовому налаштуванні вузького шліфувального круга.

**Аналіз стану питання.** Сучасний рівень розвитку машинобудівного виробництва відкриває нові технологічні можливості для виготовлення конкурентоспроможної машинобудівної продукції та виходу на світові ринки. Особливо це стосується фінішних операцій механічної обробки, найбільш відповідальних за остаточне формування параметрів точності і якості виробленої продукції. Однак ці операції досить трудомісткі і різко знижують ефективність виробництва. Тому вдосконалення фінішних операцій механічної обробки є важливим і актуальним завданням.

Перспективним напрямком для вирішення даної проблеми є використання різальних інструментів із зносостійкими покриттями, а також інструментів з матеріалів, які мають підвищені фізико-механічні властивості.

При цьому високий потенціал цих інструментів не повною мірою використовується на практиці. Це в кінцевому підсумку перешкоджає науково обґрунтованому вибору раціональних методів обробки та умов, які знижують енергоємність, підвищують точність та якість оброблених поверхонь при підвищенні продуктивності. Тому подана робота спрямована на вирішення актуальної науково-практичної проблеми підвищення ефективності фінішних операцій механічної обробки і забезпечення обґрунтованого вибору оптимальних варіантів обробки.

**Мета дослідження, постановка задачі.** Вирішення завдань підвищення точності і якості оброблюваних поверхонь нерозривно пов'язане з проблемою оптимізації параметрів обробки, створення методів різання різними інструментами. В даний час накопичений значний досвід вирішення задач оптимізації в технології машинобудування [1,2,3]. Однак, отримані рішення неоднорідні. Насправді немає узагальнених рівнянь і залежностей, що описують об'єктивні функції (параметри точності і якості обробки) і технологічні обмеження. Це змушує можливості оптимального проектування технологічного процесу. Тому важливо провести аналіз параметрів обробки, а також розробити практичні рекомендації з виявлення і впровадження нових резервів обробки.

Останнім часом знаходить застосування новий вид шліфування відшаруванням. Відмінною особливістю розглянутого способу обробки є використання вузьких шліфувальних кругів шириною не більше за 5 мм.

Потрібно науково обґрунтовано підійти до розкриття (уточнення) фізичної сутності таких процесів обробки і встановлення їхніх технологічних можливостей з метою зниження енергоємності, підвищення якості, точності й продуктивності обробки.

**Матеріали дослідження.** Як відомо, шліфування є ефективним методом остаточної механічної обробки, що забезпечує високі показники точності та шорсткості [4]. Разом з тим, досягнення цих показників характеризується відносно високою трудомісткістю обробки. Тому питання підвищення продуктивності обробки на фінішних операціях шліфування видаються дуже актуальними. Для їх вирішення важливо спочатку розглянути схему шліфування прямолінійного зразка, що рухається за нормаллю до робочої поверхні круга з постійною швидкістю  $V_{\text{різ}}$  (рис. 1) [5]. Тангенціальну і радіальну складові сили різання  $P_z$  і  $P_y$  слід подати у вигляді:

$$P_z = P_{z\text{різ}} + P_{z\text{тер}} \quad (1)$$

$$P_y = P_{y\text{різ}} + P_{y\text{тер}} \quad (2)$$

де  $P_{z\text{різ}}$ ,  $P_{y\text{різ}}$ ,  $P_{z\text{тер}}$ ,  $P_{y\text{тер}}$  - складові сили різання, що виникають у процесах різання та тертя зв'язки шліфувального круга з оброблюваним матеріалом, Н.

Відповідно

$$P_z = \sigma \cdot S_{\text{сум}} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}} \quad (3)$$

$$P_{z\text{різ}} = \sigma_{\text{різ}} \cdot S_{\text{сум}} = \sigma_{\text{різ}} \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}} \quad (4)$$

$$P_{z\text{тер}} = P_{y\text{тер}} \cdot f = c \cdot Y_{\text{тер}} \cdot f \quad (5)$$

$$P_{y\text{різ}} = \frac{P_{z\text{різ}}}{K_{\text{Шріз}}} = c \cdot Y_{\text{різ}} \quad (6)$$

де  $S_{\text{сум}} = Q/V_{\text{кр}}$  - миттєва сумарна площа поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими зернами круга,  $\text{м}^2$ ;

$Q$ - продуктивність обробки,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\sigma_{\text{різ}}$  - умовна напруга різання (враховує різання зернами круга, але не враховує тертя зв'язки круга з матеріалом),  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$f$  - коефіцієнт тертя зв'язки круга з матеріалом;  $c$  - наведена жорсткість технологічної системи,  $\text{Н}/\text{м}$ ;

$Y_{\text{тер}} = (V_{\text{різ}} - V_{\text{різо}}) \cdot \tau$  - пружне переміщення, що виникає в технологічній системі внаслідок неповного знімання підведеного в зону різання матеріалу, що обробляється,  $\text{м}$ ;

$V_{\text{різо}}$  - лінійна швидкість знімання матеріалу,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\tau$  - час обробки,  $\text{с}$ ;

$K_{\text{Шріз}} = P_{z\text{різ}}/P_{y\text{різ}}$ ;

$Y_{\text{різ}}$  - пружне переміщення, що виникає в технологічній системі внаслідок заглиблення ріжучих зернин в оброблюваний матеріал,  $\text{м}$ .

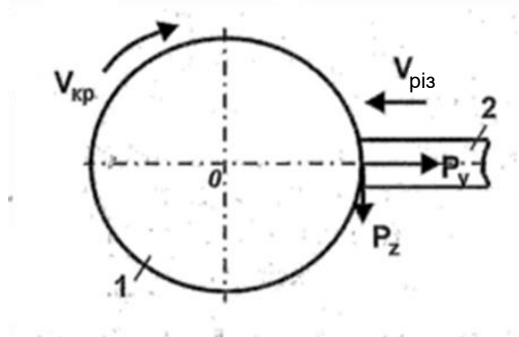


Рис. 1 - Розрахункова схема параметрів процесу шліфування:  
1 - круг; 2 - оброблюваний зразок

З урахуванням співвідношення  $Q = V_{\text{різо}} \cdot S$  маємо:

$$\sigma = \sigma_{\text{різ}} + \left( \frac{V_{\text{різ}}}{V_{\text{різо}}} - 1 \right) \cdot \frac{c \cdot f \cdot \tau \cdot V_{\text{кр}}}{S} \quad (7)$$

де  $S$  - площа поперечного перерізу оброблюваного зразка,  $\text{м}^2$ .

Із залежності (7) випливає, що за умови  $V_{\text{різ}} = V_{\text{різо}}$ , тобто, якщо відбувається повне знімання матеріалу, підведеного в зону різання, другий доданок дорівнює нулю і умовна напруга різання  $\sigma$  викликана лише процесом різання. Якщо ж круг не забезпечує повне знімання оброблюваного матеріалу, підведеного в зону різання, то

$V_{p13} > V_{p130}$  і в контакт з матеріалом вступає зв'язка. В результаті другий доданок залежності (7) приймає значення, відмінне від нуля, і умовна напруга різання  $\sigma$  визначається сумою двох доданків.

Причому, зі збільшенням часу обробки  $\tau$  другий доданок збільшується (у тому числі і при постійній швидкості  $V_{p130}$ ), що призводить до збільшення умовної напруги різання  $\sigma$  і необхідності припинення процесу шліфування.

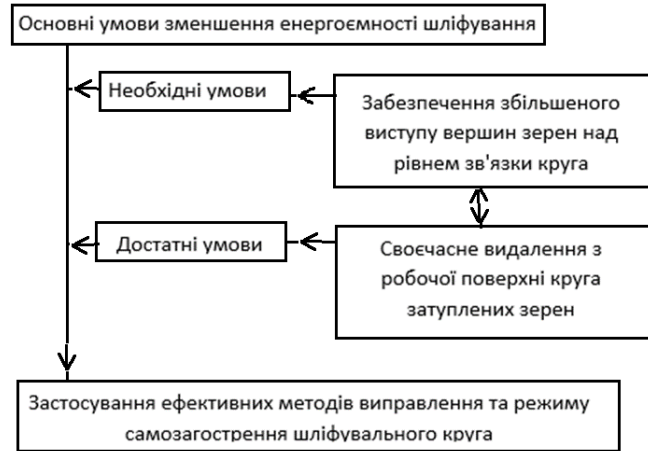


Рис. 2 - Структурна схема умов зменшення енергоємності шліфування

Структурна схема умов зменшення енергоємності наведена на рисунку 3. При чому треба забезпечити якомога більший виступ вершин зернин над рівнем зв'язки круга, а також своєчасного видалення з робочої поверхні круга затуплених зернин.

Останнім часом все більше застосовується обробка з відшаруванням поверхового шару заготовки за один прохід при кутовому налаштуванні вузького шліфувального круга, за аналогією з точінням, результативність якого визначається геометрією інструменту.

У порівнянні з зовнішнім круглим шліфуванням, при якому профіль шліфувального круга відповідає контуру заготовки, при шліфуванні вузьким кругом можливе виготовлення різних контурів заготовки одним профілем шліфувального круга.

Суть процесу полягає в тому, що він концентрує все видалення матеріалу на вузькій контактній довжині близько 1 мм, щоб забезпечити максимальну швидкість видалення матеріалу з найменшою питомою енергією шліфування [6].

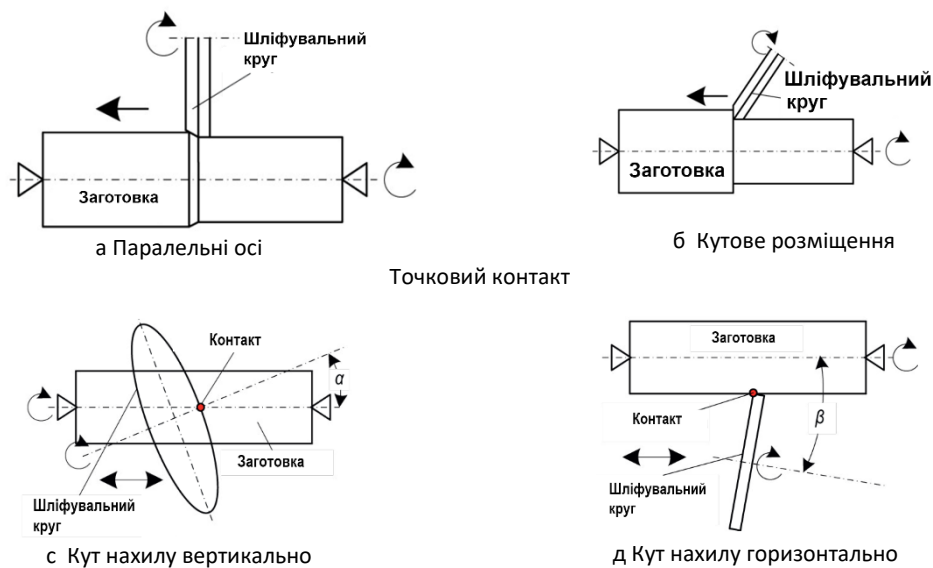


Рис. 3 - Технологічні схеми шліфування відшаруванням

Використовуючи глибинне шліфування, кругом з формованою конічною ділянкою (рис. 3а) за один прохід знімають шар матеріалу на всю необхідну глибину. У ході обробки конічна ділянка, яку можна назвати забірним конусом, видаляє основну частину шару, що зрізується, а циліндрична ділянка зачищає оброблену поверхню. Поперечна подача відсутня.

Кутове розташування круга при одночасному шліфуванні шийки валу та торця (рис. 3б) дозволяє знизити навантаження процесу. При такій технологічній схемі торець заготовки шліфується периферією круга, що зменшує контакт круга із заготовкою, забезпечуючи кращий доступ ЗОР, покращення якості обробленої поверхні та виключення можливості припалювання. Одночасне кутове шліфування поверхні обертання та торця не тільки збільшує продуктивність обробки, але й забезпечує підвищення точності їхнього взаємного розташування.

Нахил круга в вертикальній та горизонтальній площині [7] дозволяє значно зменшити площу контакту, теоретично перетворюючи її на точку завдяки кутовим  $\alpha$ ,  $\beta$  -налаштуванням круга, звідси і назва способу в технічній літературі – точковий (рис. 3 с, д).

Процес шліфування з відшаруванням є досить зручною системою різання, в якій існуючі вхідні технологічні параметри слід оптимізувати. У процесі, що проходить на паралельних осях круга та заготовки (рис. 4), до таких параметрів відносяться: окружні швидкості круга та деталі, осьова подача стола, ширина круга та його частин, кут  $\chi$  та зернистість конусної частини, зернистість циліндричної частини круга, що здійснює чистову обробку.

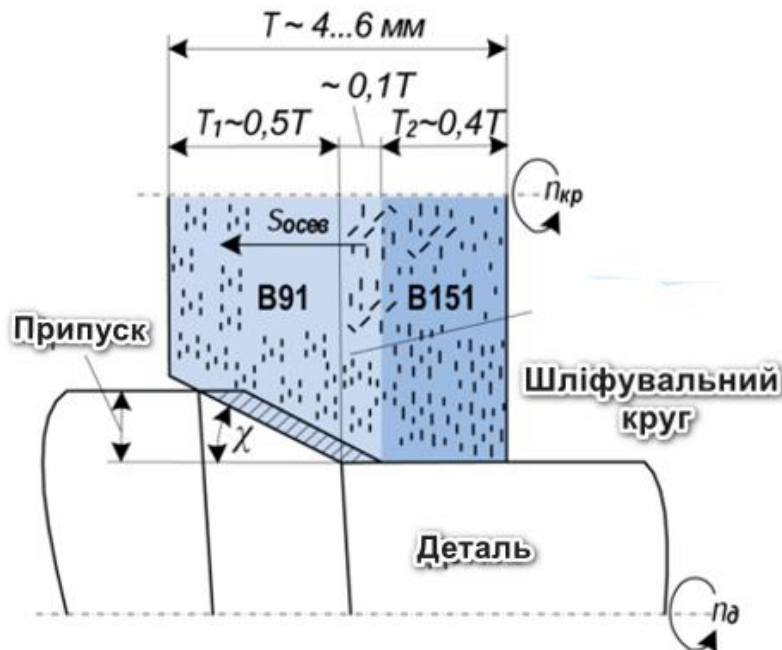


Рис. 4 - Схема шліфування відшаруванням шліфувальним кругом CBN із двох шарів зернин різного розміру [8]

Доцільно розглянути ряд фізичних параметрів, які б дозволили критично оцінити процес шліфування відшаруванням.

Так, коефіцієнт абразивного різання  $f_A$  [9] може бути критерієм ефективності процесу. Відомо, що робота стружкоутворення пропорційна дотичній складовій  $P_z$  сили різання, а робота тертя - радіальній  $P_y$ .

Звідси коефіцієнт абразивного різання  $f_A = P_z/P_y$ , що дозволяє визначати частку роботи стружкоутворення та тертя. Чим він вищий, тим нижчі питомі енерговитрати.

Слід пам'ятати, що для твердого точіння він дорівнює 0,8... 1,2.

Питома енергія складається з двох складових:  $u = u_c + u_{si}$ , де  $u_c$  - питома енергія утворення стружки, а  $u_{si}$  - питома енергія ковзання (включаючи енергію орання) [10]. Будь-яка модель видалення матеріалу має бути здатна кількісно визначити величину питомої енергії та її залежність від умов процесу.

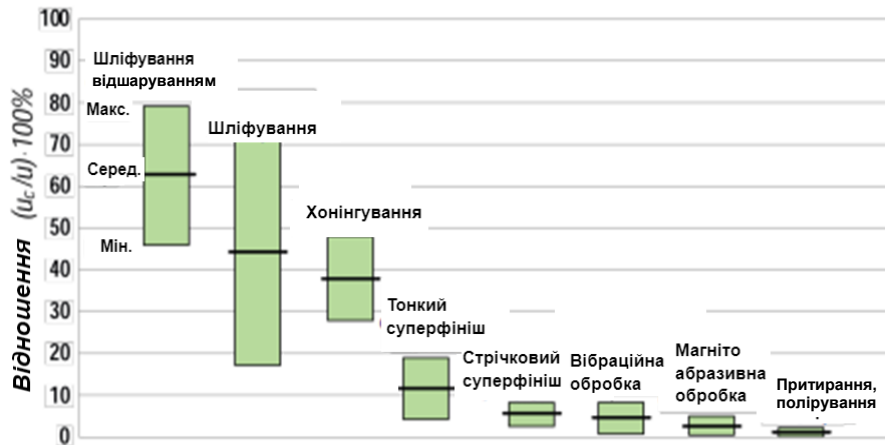


Рис. 5 - Відношення питомої енергії стружкоутворення  $u_c$  до загальної питомої енергії  $u$  за різних методів чистої обробки [10].

Шліфування відшаруванням характеризується середньою швидкістю знімання  $200 \dots 1000 \text{ мм}^3/\text{с}$ , високою швидкістю обертання круга -  $90 \dots 160 \text{ м/с}$ , достатньою глибиною різання - до  $0,7 \text{ мм}$  та швидкістю подачі до  $600 \text{ м/хв.}$ , застосування суперабразивних інструментів, що зазвичай призводить до невисокої питомої енергії -  $15 \dots 50 \text{ Дж/мм}^3$  (для чорних металів).

У роботі [11] підтверджується, що при шліфуванні відшаруванням у зоні видалення припуску знімання  $Q'$  на порядок вище, ніж при звичайному шліфуванні. Отже, внесок енергії тертя та орання стає малою частиною загальної питомої енергії шліфування, і  $u$  знижується до  $80\%$ .

Технологічна схема високошвидкісного точкового круглого шліфування відрізняється великою гнучкістю, крім традиційних параметрів круглого шліфування: окружних швидкостей круга, деталі, глибини різання та поздовжньої подачі - є кутові налаштування - кут конуса, або змінний кут  $\chi$  поверхні тору, і кути нахилу круга  $\alpha$  і  $\beta$ , що разом визначають розміри площини контакту «круг - заготовка».

Процес точкового шліфування подібний до гостріння заготовки вершиною різця з дуже невеликим зусиллям і нагріванням. На рис. 6 показано технологічну схему обробки, реалізовану на верстатах фірми JUNKER.

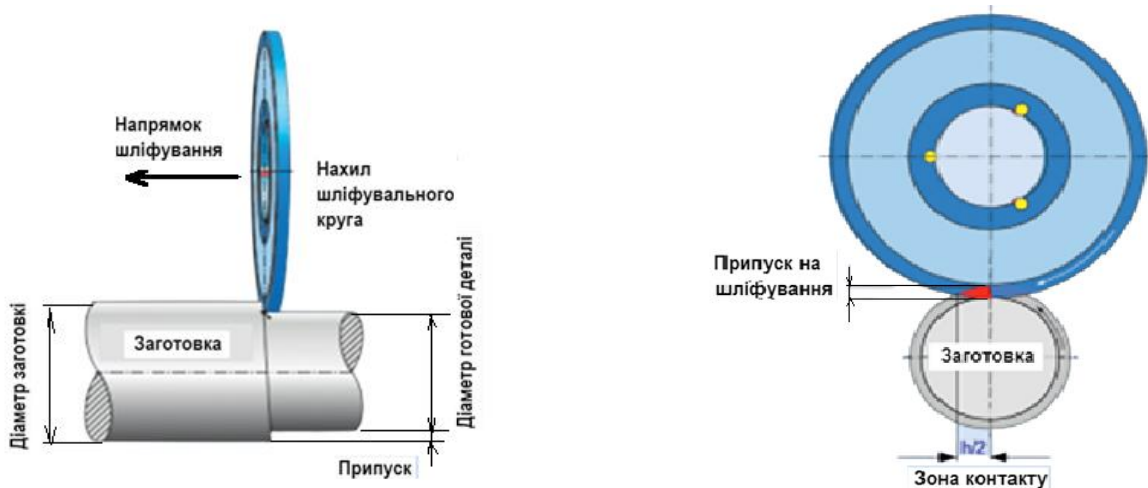


Рис. 6 - Технологічна схема високошвидкісного точкового круглого шліфування

На рис. 6 показано дві зони при високошвидкісному точковому шліфуванні: зона бічного та периферійного контакту, які відіграють різні ролі у процесі обробки [12]. Більший обсяг матеріалу видаляється в зоні бічного шліфування, тоді як чистова обробка поверхні завершується в зоні шліфування циліндричною кромкою. Зазвичай при шліфуванні циліндричної деталі кут  $\beta$  дорівнює нулю. Геометрично бічна контактна зона у вигляді еліпса  $abcd$  (рис. 7) розташована в торцевій частині шліфувального круга, де круг стикається з робочою поверхнею деталі.

Якщо у вертикальній площині є кут нахилу круга або вертикальний кут точкового шліфування  $\alpha$ , то при точковому шліфуванні вектору швидкості деталі та швидкості круга в контактному шарі не знаходяться в одній площині, а реальна бічна контактна зона є частиною еліпса  $abcd$ , розмір якого залежить від осьової швидкості подачі заготовки.

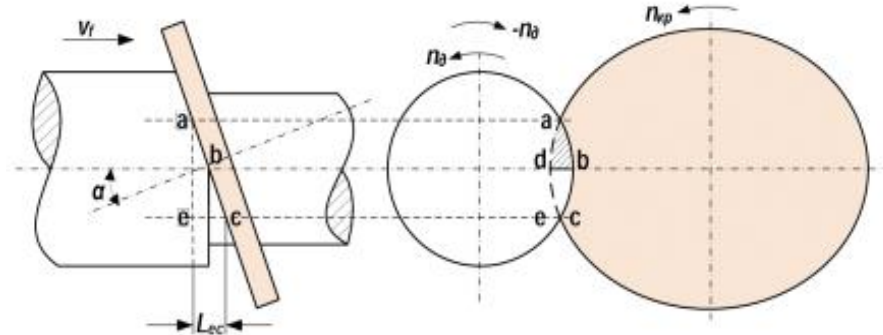


Рис. 7 - Зона бічного контакту при точковому шліфуванні [12]

На думку авторів [12], довжина контактної дуги значно впливає на продуктивність шліфування, особливо на тепло та силу шліфування, та визначає цілісність поверхні. При високошвидкісному точковому шліфуванні через знос шліфувального круга виникає перехідна зона між зоною бічного шліфування та зоною шліфування на циліндричній поверхні круга. Зазвичай, при використанні супералмазних кругів ця зона дуже вузька. Якщо розглядати лінію  $C - C$ , проведену під кутом  $45^\circ$ , як лінію розділу, реальна зона бічного контакту може бути показана за допомогою штрихування (рис. 8).

Діапазон довжини контактної дуги становить від 0 до максимального значення  $L$ , що дорівнює довжині дуги  $ab$ .

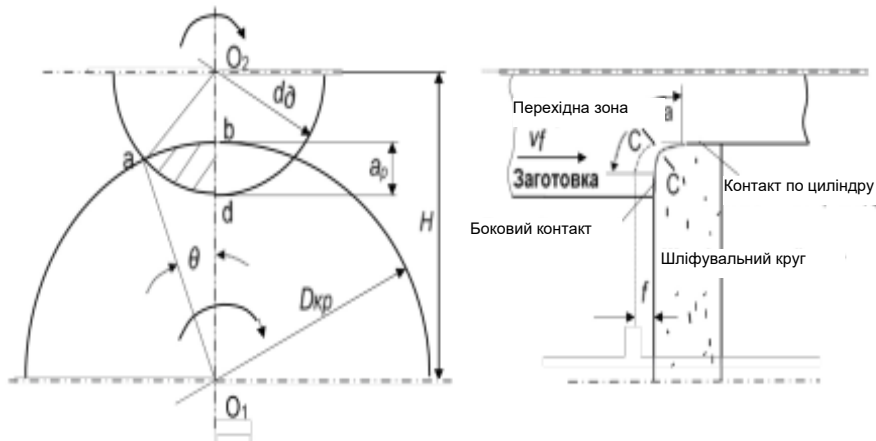


Рис. 8 – Довжина дуги контакту в бічній контактній зоні [12]

У роботі [13] в результаті оцінки геометрії контакту точкового шліфування було отримано емпіричний вираз для дотичної  $F_z$ , що становить зусилля шліфування за параметрами: кут в точці дотику при точковому шліфуванні  $\alpha$ , швидкість деталі  $V_d$ , глибина різання  $a_p$  і подача вздовж осі заготовки  $f_{av}$ .

$$F_z = 453 \cdot a_p^{0.90} \cdot f_{av}^{0.6} \cdot V_d^{0.76} \cdot \cos^{0.76} \alpha \quad (8)$$

Встановлено, що температура шліфування (рис. 9) зменшується зі збільшенням кута конусної частини круга  $\chi$ . Існування кута  $\chi$  дозволяє легко виводити подрібнену стружку із зони шліфування, тим самим зменшуючи її накопичення в зоні обробки.

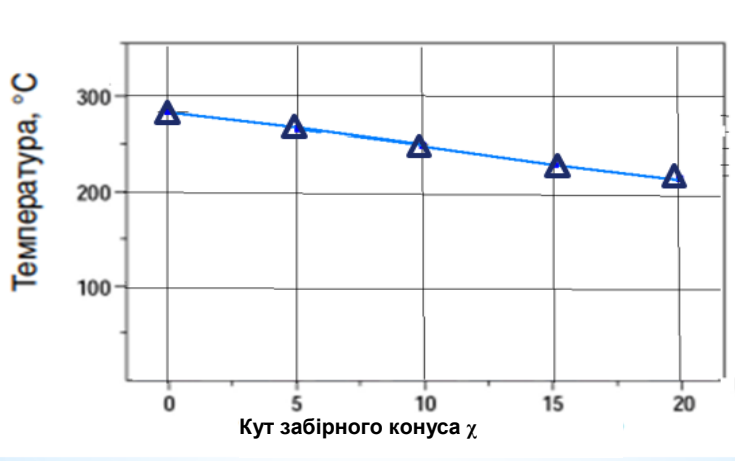


Рис. 9 - Вплив кута конусної частини круга  $\chi$  на температуру шліфування [13]

Отже, певною мірою тепло, що виділяється під час шліфування, зменшується, умови його розсіювання в процесі точкового шліфування покращуються, і тепло, що виділяється в цьому процесі, може бути краще розподілене. Крім того, зона контакту круга та заготовки стає меншою, процес шліфування стає більш плавним, а температура шліфування знижується.

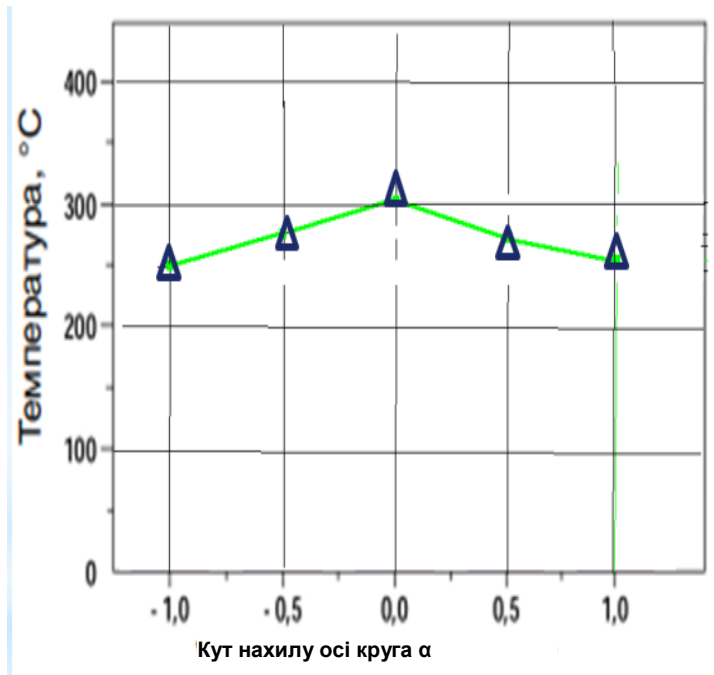


Рис. 10 - Вплив кута нахилу осі круга  $\alpha$  у вертикальній площині на температуру шліфування [13]

Вплив кута нахилу  $\alpha$  на температуру шліфування (рис. 10) приблизно симетричний відносно  $\alpha = 0^\circ$ . Таким чином, показано, що знак кута нахилу  $\alpha$  дуже мало впливає на температуру шліфування, яка в основному залежить від абсолютного значення. Кут нахилу  $\alpha$  знижує температуру шліфування, і чим більше абсолютне значення  $\alpha$ , тим нижче значення температури шліфування через зменшення розміру зони контакту круга та заготовки. Тим самим зменшується кількість зернин, що беруть участь у шліфуванні в одиницю часу.

Максимальна товщина недеформованої стружки окремого зерна зменшується, що призводить до зниження тепла, що виділяється у процесі шліфування. Крім того, існування  $\alpha$  вигідне, оскільки воно покращує умови розсіювання тепла. У межах певного діапазону більше значення  $\alpha$  може призвести до кращого відведення тепла. З цих причин температура точкового шліфування нижче, ніж у традиційного круглого шліфування.

За результатами визначення основних технологічних показників та аналізу [14] встановлені первинні та вторинні фактори, що впливають на температуру в зоні шліфування: кут зони чорнового шліфування  $\chi >$  глибина шліфування  $a_p >$  кут нахилу  $\alpha >$  швидкість поздовжньої подачі  $f_{av} >$  швидкість круга  $v_{кр}$ .

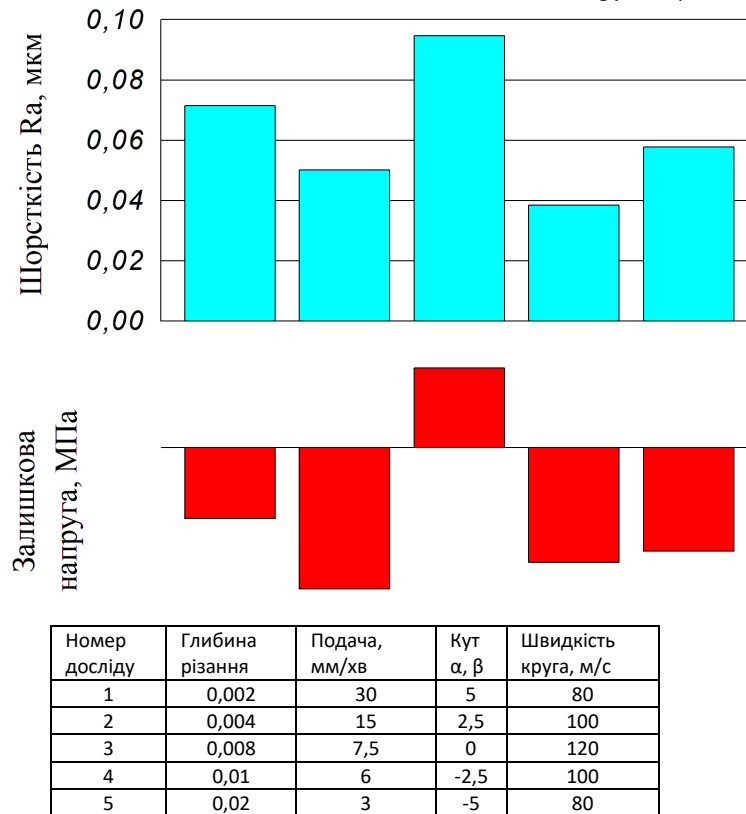


Рис. 11 – Залежність шорсткості та залишкової напруги від режиму обробки [18].

За результатами проведених експериментальних досліджень (рис. 11) видно, що значення шорсткості поверхні  $R_a$  має тенденцію до невеликого зниження при зменшенні швидкості подачі, збільшенні глибини різання і збільшенні швидкості шліфувального круга, коли змінні кути шліфування знаходяться в прийнятному діапазоні. Залишкова стискаюча напруга поверхні заготовки може бути отримана шляхом логічної комбінації між змінним кутом шліфування та параметрами шліфування після досягнення швидкості шліфування 80 м/с.

Крім того, сприятлива залишкова стискаюча напруга може бути отримана великою при відповідному збільшенні змінних кутів  $\alpha, \beta$ . Сприятлива залишкова напруга стиснення може бути досягнута з кращою теплопровідністю шліфувального круга з CBN на керамічній зв'язці. Важливо, щоб змінні кути шліфування раціонально вибиралися при точковому шліфуванні для отримання прийнятної напруги залишкового стиснення.

Для забезпечення економного процесу виникає необхідність підтримки необхідного профілю круга протягом його роботи [15]. Це потребує використання абразивного зерна CBN через тривалу стійкість і високу теплопровідність, що забезпечує відносно велику площу зносу без теплового пошкодження; використання високоміцних металевих зв'язок у шліфувальних кругах для забезпечення максимальної стійкості та необхідності проводити правку в автономному режимі. Використання масляної ЗОР значно збільшує термін служби круга у порівнянні з будь-якою охолодною рідиною на водній основі. Слід застосовувати високі швидкості обертання кругів, що перевищує в 2...5 разів швидкість обертання звичайних кругів у традиційних процесах.

Досягнення точкового контакту шляхом впровадження кутових поворотних налаштувань осі круга для подальшого обмеження нормальної сили та теплового пошкодження оброблюваної поверхні. Високі швидкості роботи дозволяють досягнути коефіцієнта перекриття при дуже вузькій чистовій ширині для отримання заданої шорсткості (зазвичай  $R_a \sim 0,4$  мкм).



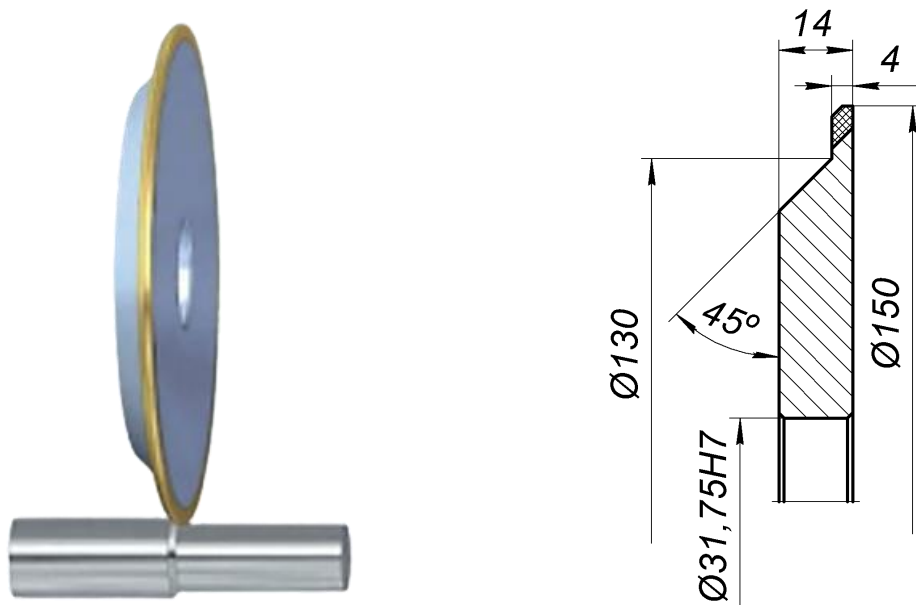


Рис. 12 - Зовнішній вигляд круга фірми CAFRO для шліфування відшаруванням

На рис.12 показаний зовнішній вигляд абразивних інструментів для шліфування відшаруванням. Для верстатів, що реалізують процес шліфування відшаруванням, рекомендуються круги з алмазу та CBN на гальванічній та паяній (спеченій) зв'язках. Тільки близько 25% кругів з суперабразивів використовують керамічні зв'язки. Доведено [16], що шліфування відшаруванням за допомогою кругів CBN на керамічній зв'язці набагато продуктивніше на важкооброблюваних матеріалах, таких як інконель і м'яка нержавіюча сталь. Це досягається застосуванням «гідроочищення» круга під час циклу шліфування за допомогою систем очищення кругів ЗОР під високим тиском.

Менша площа контакту при високошвидкісному точковому шліфуванні значно знижує теплоту та силу шліфування, а також покращує характеристики охолодження та ефект шліфувальної рідини. Окрім того, тонкий круг із CBN послаблює ефект бар'єру повітряного потоку.

У роботі [17] в ході експериментального дослідження високошвидкісного точкового шліфування визначено, що при тиску струменя рідини 2 МПа шорсткість поверхні оброблюваної деталі із загартованої сталі 45 має тенденцію до помітного зниження зі збільшенням витрати рідини в діапазоні 0...20 л/хв, але ступінь зниження дуже малий (рис. 13). Таким чином, встановлено, що витрата ЗОР не є основним фактором, що впливає на шорсткість поверхні за певного тиску струменя рідини. При тиску струменя рідини 2 МПа твердість поверхні деталі помітно знижується зі зменшенням витрат рідини в діапазоні 0...20 л/хв. При сухому шліфуванні твердість поверхні помітно падає, що свідчить про те, що певною мірою виникає термічне пошкодження поверхні.

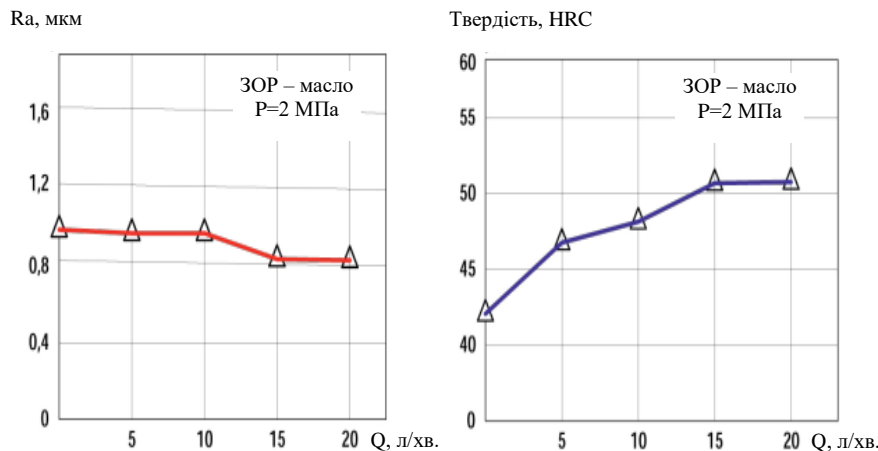


Рис. 13 - Результати експериментів щодо визначення характеристик якості поверхні при точковому шліфуванні з ЗОР [17]

Таким чином, раціональний вибір складу ЗОР, конструкції сопла, параметрів витрати та тиску, а також пристроїв, що послаблюють ефект бар'єру повітряного потоку, сприяє підвищенню ефективності процесу шліфування відшаруванням.

Високошвидкісні шліфувальні верстати, що використовують технологію шліфування відшаруванням, хоч і дороги самі по собі, проте знижують капітальні внески за рахунок виключення безлічі операцій, включаючи шліфування, токарну обробку та полірування.

Використання суперабразивів, зокрема CBN, та кутових налаштувань абразивного круга створюють умови, за яких вартість виробу стає меншою, ніж сукупна при використанні традиційних методів: твердого точіння, шліфування та полірування.

#### **Висновки**

1. Енергоємність шліфування в цілому визначається співвідношенням радіальної складової сили різання за рахунок тертя зв'язки круга з матеріалом, що обробляється, і загальною радіальною складовою сили різання. Збільшення цього співвідношення викликає збільшення умовної напруги різання (технологічної енергоємності), що є причиною надзвичайно високих значень енергоємності обробки шліфування, досягнутих на практиці.

2. Визначено основні напрями підвищення ефективності фінішної обробки деталей шляхом різання на основі використання сучасних абразивних інструментів, що дозволяють здійснювати високоточну обробку деталей з однієї установки з найменшими виробничими витратами.

3. Рекомендовано впроваджувати шліфування кругом, з використанням вузьких супер абразивів, що дозволяє контролювати контактну зону круга і заготовки і досягати високих продуктивності і якості обробки

4. Результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу високошвидкісного точкового шліфування показують, що наявність кутових налаштувань круга та їх раціональний вибір сприяють зниженню температури, стабілізації мікротвердості поверхні оброблюваної деталі, зменшенню шорсткості та створенню сприятливих залишкових напруг стиснення. Крім того, зазначені дослідження дозволяють усвідомити фізичну сутність процесу, визначити оптимальні режими обробки та налаштування верстата, а також шляхи оптимізації технологічних параметрів точкового шліфування.

#### **Список літератури:**

1. Иновационное развитие современных технологий: монография / Ф.В. Новиков, В.А. Жевтобрюх, В.С. Гусарев, В.Б. Наддачин, А.А. Якимов, А.А. Андилахай, А.С. Сергеев, Д.Ф. Новиков. – Днепр. ЛИРА, 2021. – 480 с.
2. Новиков Ф.В. Разработка эффективных технологий механической обработки деталей машин / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов. – Х.: ХНАДУ, вып. 29, 2011. – С. 212-215.
3. Новиков Ф.В. Определение оптимальных условий механической обработки деталей машин по критерию наименьшей себестоимости / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, Е.Ю. Бенин // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: 36. наук. праць.– Маріуполь: ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т", 2012. – №1 (24). – 2012. – С. 241-247.
4. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
5. Новіков Ф. В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей: монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
6. John A. Webster. Technology Assessment Report on Current Global Advanced Research Projects in Fixed Abrasive Grinding. January 2005. AMT — The Association for Manufacturing Technology.
7. Junker, Erwin. Патент SU № 1452466 А3. Способ скоростного профильного шлифования осесимметричных поверхностей вращения. 12.03.1985.
8. Klocke F, Hegener G, Deacu L. Continuous path-controlled grinding. Innovative manufacturing process combines high flexibility and productivity [J]. ZWF, 1996, 91 (4): 164-167. (in German).
9. Ермолаев В. К. Развитие профильного шлифования // РИТМ машиностроения. 2019. No 4. С. 40-48.
10. Fukuo Hashimoto, Hitomi Yamaguchi, Peter Krajnik, Konrad Wegener, Rahul Chaudhari, Hans-Werner Hoffmeister, Friedrich Kuster. Abrasive fine-finishing technology. CIRP Annals — Manufacturing Technology. Vol. 65, Issue 2. 2016. Pp 597-620
11. Michael P Hitchiner. Current status of peel grinding technology. Saint-Gobain Abrasives. 2010 by ASME.
12. Shichao Xiu, Guangqi Cai and Changhe Li. Study on Side Contact Layer Model and Parameters in Quick-point Grinding. Materials Science Forum. Volumes 532-533. Pp 781-784. 2006
13. Suoxian Yuan, Dongna Xie, Yadong Gong. Study on Abrasive Geometry of Quick-point Grinding. Key Engineering Materials. Vols 389-390. 2009. Pp 235-239.
14. Guoqiang Yin, Yadong Gong, Youwei Li, Fei Wang. Investigation of the grinding temperature and sub-surface quality of a novel point grinding wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. 97. Pp. 1565-1581
15. Michael P Hitchiner. Current status of peel grinding technology. Saint-Gobain Abrasives. 2010 by ASME.
16. <https://www.sme.org/powerful-potential-peel-grinding>
17. S. C. Xiu, Y. D. Gong and G. Q. Cai. Study on Effect of Grinding Fluid Supply Parameters on Surface Integrity in Quick-point Grinding for Green Manufacturing. Advanced Materials Research. Vols. 53–54. 2008. Pp 209–214

#### **References (transliterated)**

1. Iovatsionnoe razvitie sovremennykh tekhnolohii: monografiia/ F.V. Novikov, V.A. Zhovtobryukh, V.S. Husarev, V.B. Naddachin, A.A. Yakimov, A.A. Andilakhay, A.S. Serheev, D.F. Novikov. – Днепр. ЛИРА, 2021. – 480 с.
2. Novikov F.V. Razrabotka effektivnykh tekhnolohii mekhanicheskoi obrabotki detalei mashin / F.V. Novikov, V.A. Zhovtobryukh // Avtomobilnyi transport: sbornik nauchnykh trudov. – Kh.: KhNADU, vyp. 29, 2011. – S. 212-215.

3. Novikov F.V. Opredelenie optimalnykh uslovii mekhanicheskoi obrabotki detalei mashin po kriteriiu naimenshei sebestoimosti / F.V. Novikov, V.A. Zhovtobryukh, Ye.Yu. Benin // Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Ser.: Tekhnichni nauki: Zb. nauk. prats.– Mariupol: DVNZ “Priazov. derzh. tekhn. un-ť”, 2012. – №1 (24). – 2012. – S. 241-247. 6.
4. Korolev A. V. Issledovanie potssessov obrazovaniia poverkhnosti instrumenta i detail pri abrazivnoi obrabotke / A. V. Korolev. - Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. – 212 s.
5. Novikov F.V. Teoretichni osnovi mekhanichnoi obrobbki visokotochnik detalei: monografiia / F.V. Novikov, I. O. Riabenkov. – Kharkiv: Vyd. KhNEU, 2013. – 352 s.
6. John A. Webster. Technology Assessment Report on Current Global Advanced Research Projects in Fixed Abrasive Grinding. January 2005. AMT — The Association for Manufacturing Technology.
7. Junker, Erwin. Patent SU № 1452466 A3. Sposob skorostnogo profilnogo shlifovaniia osesimmetrichnykh poverkhnosti vrashcheniia. 12.03.1985.
8. Klocke F, Hegener G, Deacu L. Continuous path-controlled grinding. Innovative manufacturing process combines high flexibility and productivity [J]. ZWF, 1996, 91 (4): 164-167. (in German).
9. Yermolaiev V. K. Razvitie profilnogo shlifovaniia // RITM mashinostroeniia. 2019. No 4. S. 40-48.
10. Fukuo Hashimoto, Hitomi Yamaguchi, Peter Krajnik, Konrad Wegener, Rahul Chaudhari, Hans-Werner Hoffmeister, Friedrich Kuster. Abrasive fine-finishing technology. CIRP Annals — Manufacturing Technology. Vol. 65, Issue 2. 2016. Pp 597-620.
11. Michael P Hitchiner. Current status of peel grinding technology. Saint-Gobain Abrasives. 2010 by ASME.
12. Shichao Xiu, Guangqi Cai and Changhe Li. Study on Side Contact Layer Model and Parameters in Quick-point Grinding. Materials Science Forum. Volumes 532-533. Pp 781-784. 2006
13. Suoxian Yuan, Dongna Xie, Yadong Gong. Study on Abrasive Geometry of Quick-point Grinding. Key Engineering Materials. Vols 389-390. 2009. Pp 235-239.
14. Guoqiang Yin, Yadong Gong, Youwei Li, Fei Wang. Investigation of the grinding temperature and sub-surface quality of a novel point grinding wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. 97. Pp. 1565-1581.
15. Michael P Hitchiner. Current status of peel grinding technology. Saint-Gobain Abrasives. 2010 by ASME
16. <https://www.sme.org/powerful-potential-peel-grinding>
17. S. C. Xiu, Y.D. Gong and G.O. Cai. Study on Effect of Grinding Fluid Supply Parameters on Surface Integrity in Quick-point Grinding for Green Manufacturing. Advanced Materials Research. Vols. 53-54. 2008. Pp 209-214.

*Поступила (received) 07.04.2022*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Фесенко Анатолій Володимирович (Fesenko Anatoly)** – професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380675772887; e-mail: [anfesenko73@gmail.com](mailto:anfesenko73@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-0626-0180>

**Євсюкова Фатима Магомєтбїєвна (Yevsiukova Fatyma)** – доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; <https://orcid.org/0000-0002-9764-4106>

**Сліпченко Сергій Євгенович (Slipchenko Serhii)** – старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (0572) 707-66-25; e-mail: [serg.slip@gmail.com](mailto:serg.slip@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-0593-3750>

**Линник Олена Іванівна (Lynnyk Olena Ivanivna)** – кандидат економічних наук, доцент кафедри «Економіка бізнесу і міжнародні економічні відносини» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; email: [linnik.khpi@gmail.com](mailto:linnik.khpi@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-0877-8047>.

**КЛОЧКО О. О., КАМЧАТНА-СТЕПАНОВА К. В., ОХРИМЕНКО О. А., МАНОХІН А. С.**

### **ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ ШЕВРОННИХ КОЛІС**

Розглянуті питання особливостей використання фрези з роздільною схемою формоутворення. Надано характеристику нерівномірності навантаження на інструмент, пов'язаного з різними схемами та конструкційними особливостями зуборізних фрез. Показано, що характер осцилограм крутного моменту фрези з роздільною схемою формоутворення свідчить про більшу плавність процесу різання та менші зусилля різання. Фрези з роздільною схемою формоутворення мають в 1,75 разів більше зубів, на довжині одного витка нарізування, ніж стандартна фреза. У діапазоні досліджуваних подач 3-6 мм/об середній крутний момент при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення в 2-2,5 рази менше, ніж при роботі з стандартною фрезою, що обробляє бічні поверхні та дно впадин зубів, і в 1,5 рази менше, коли стандартна фреза не обробляє дно впадин зубів.

**Ключові слова:** зубофрезерування, роздільна схема формоутворення, крутний момент, зубчате колесо, ефективність різання.

**KLOCHKO O. O., KAMCHATNA-STEPANOVA K.V., OHRIMENKO O.A., MANOKHIN A. S.  
DYNAMICS OF THE CUTTING PROCESS WHEN GEAR-MILLING CHEVRONIC WHEELS**

**Annotation.** The questions of features of application of a mill with the separate scheme of forming are considered. The characteristic of non-uniformity of loading on the tool connected with various schemes and design features of gear cutters is given. It is shown that the nature of the torque waveforms of the cutter with a separate shaping scheme indicates a greater smoothness of the cutting process and less cutting effort. Cutters with a separate shaping scheme have 1.75 times more teeth at the length of one turn of cutting than a standard cutter. In the range of investigated feeds 3-6 mm/rev, the average torque when working with a cutter with a separate shaping scheme is 2-2.5 times less than when working with a standard cutter that treats the side surfaces and bottom of tooth cavities, and 1.5 times less when the standard cutter does not process the bottom of the teeth.

**Key words:** gear milling, separate shaping scheme, torque, gear, cutting efficiency.

**Вступ.** Важливе місце в сучасній техніці займають зубчасті передачі, які є деталями унікальних за розмірами і потужностями машин, що використовуються в металургійній та інших галузях промисловості. У механізмах приводу цих машин знайшли застосування великомодульні  $m = 12-36$  мм шевронні колеса з діаметром вершин зубів до 2000 мм і шириною до 800 мм. Особливо актуальним є питання чистової обробки загартованих великомодульних коліс, яке здійснюється зазвичай шліфуванням, що при наявності значного припуску збільшує машинний час, необхідний на виготовлення таких деталей. Видалення основної частини чистового припуску методом зубофрезерування здатне суттєво підвищити ефективність даної операції.

При виготовленні зубчатих вінців великого діаметру основний припуск під чистову обробку (2,5-3 мм) за стандартною технологією видаляється шляхом шліфування. Альтернативне рішення полягає в розробці інструменту з роздільною схемою обробки і визначенні оптимальних умов його застосування, що дозволяє видаляти 95% даного припуску швидкісним зубофрезеруванням. Вказане дозволяє підвищити ефективність обробки в 3-4 рази за рахунок скорочення машинного часу на чистових операціях. Схема різання такої фрези з роздільною схемою формоутворення передбачає оброблення окремо лівого та правого профіля зубів колеса, не торкаючись дна западин.

**Мета дослідження.** Реалізувати запропоновану ідею з метою вирішення завдання підвищення ефективності чистової обробки загартованих шевронних коліс можна, використовуючи інструмент, принципова конструкція якого наведена на рисунку 1.

Процес різання черв'ячної фрези є нерівномірним. Непостійність крутного моменту обумовлена неоднаковістю та постійною зміною товщин різаних стружок, зміною кількості зубів, що одночасно беруть участь у різанні. Це призводить до безперервної зміни загального навантаження на фрезу та до коливань крутного моменту  $M_k$ .

Однак у характері осцилограм стандартної фрези та фрези з роздільною схемою формоутворення існують істотні відмінності. За один оберт стандартної фрези крутний моменту змінюється від максимуму до мінімуму стільки разів, скільки рейок або рядів зубів має фреза. Горизонтальні ділянки осцилограм, що збігаються з нульовою лінією  $M_k$ , свідчать про відсутність різання на даний момент -  $M_k = 0$ . Вертикальні лінії відмітника часу, відстань між якими відповідає 0,02 сек., дозволяють визначити період різання та період відсутності різання в роботі фрези. Період різання кожної рейки стандартної фрези зі швидкістю різання 16 м/хв і подачею 4 мм/об становить 0,1 - 0,12 сек, а період відсутності різання - 0,2 - 0,22 сек. Це свідчить про те, що довжина шляху різання кожної рейки є удвічі меншою за довжину дуги колового кроку зубів [12, 68, 84].

© О.О. Ключко, К.В. Камчатна-Степанова, О.А. Охрименко, А.С. Манохін, 2022

Різкі зміни величини  $M_k$  при вході рейок фрези в метал та при виході породжують вібрації заготовки та фрези. Суттєве зниження крутних моментів, в 1,4-1,6 рази, спостерігається при звільненні вершин зубів стандартної фрези від різання.

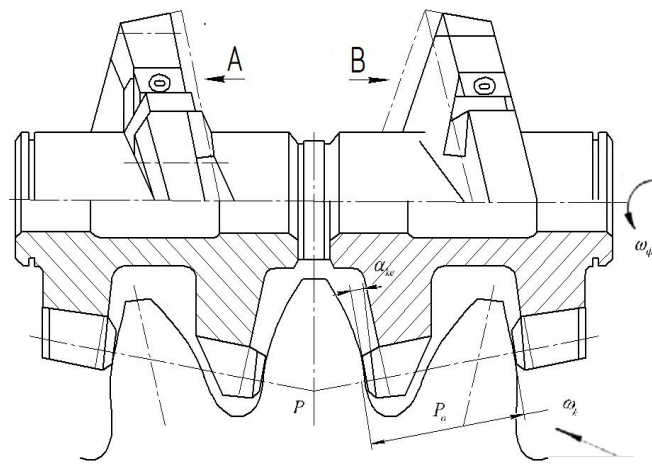


Рис. 1 - Принципова конструкція фрези з роздільною схемою формоутворення

Це підтверджує раціональність схеми чистового зубофрезерування, коли інструмент не обробляє дно западин зубів. Характер осцилограм  $M_k$  фрези з роздільною схемою формоутворення (рисунок 2, в, г. д) свідчить про більшу плавність процесу різання та менші зусилля різання. Фрези з роздільною схемою формоутворення мають в 1,75 разів більше зубів, на довжині одного витка нарізування, ніж стандартна фреза. Тому за один оберт фрези  $M_k$  змінюється частіше і періоди відсутності різання є набагато меншими.

Період різання зубів фрези з роздільною схемою формоутворення [12, 69] при швидкості різання 16 м/хв і подачі 4 мм/об становить 0,16-0,18 секунди, а період відсутності різання - 0,02-0,36 сек. Більш тривала участь у різанні зубів фрези з роздільною схемою формоутворення пояснюється характером траєкторій різальних кромок. При інших рівних умовах залежність є наступною: чим меншим є профільний кут зубів фрези різача, тим меншою є кривизна траєкторій руху точок різальних кромок і тим довше обробляється контакт краю з поверхнею. Це підтверджують попередні висновки про залежність форми траєкторії різаних зубів від конструктивних параметрів інструменту.

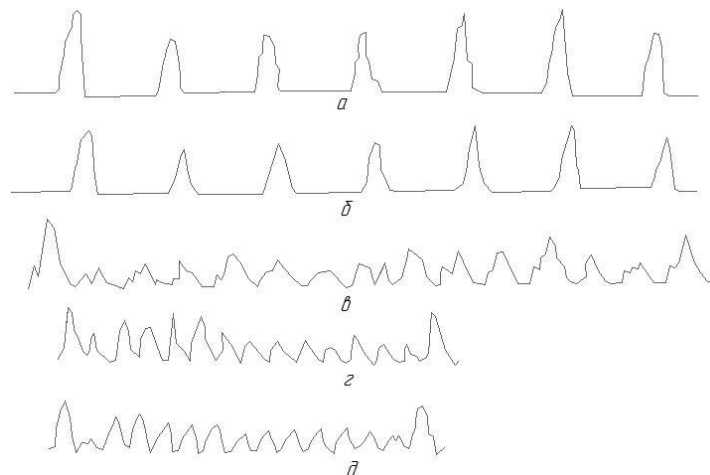


Рис. 2 – Характерні осцилограми крутних моментів при чистовому нарізуванні колеса  $m = 20\text{мм}$ ;  $z = 96$ ; а- стандартна фреза  $S = 4\text{мм/об}$ ,  $V = 16\text{м/хв}$  (зустрічне фрезерування з обробкою дна западин зубів); б- без обробки дна западин зубів; в - черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення  $S = 4\text{мм/об}$ ;  $16\text{м/хв}$ , зустрічне фрезерування; г - фреза з роздільною схемою формоутворення  $S = 4\text{мм/об}$ ,  $V = 30\text{м/хв}$ , зустрічне фрезерування; д - попутне фрезерування

Більш плавна зміна  $M_k$  при вході зуба в метал заготовки і при виході з нього пояснюється наявністю кута нахилу головної різальної кромки  $10^\circ$ . Вид осцилограм, отриманих при попутному фрезеруванні (рисунок 2, д) вказує на більш рівномірний процес різання, хвилі приблизно однакові і за розміром трохи менші, ніж при зустрічному фрезеруванні. Крім того сумарні периметри одночасно працюючих різальних кромки зубів у черв'ячних фрез з роздільною схемою формоутворення  $m = 20 - 60$  мм в 2,5 - 6 разів менше, а кількість зубів на довжині одного витка в 1,6 - 2 рази більше, ніж у стандартних фрез. Як наслідок, навантаження, що сприймаються першими, буде меншими за ті, що сприймаються другими. Це чітко підтверджується видом осцилограм, де крутні моменти для фрез із роздільною схемою формоутворення є меншими, ніж для стандартної фрези. Зменшення  $M_k$  пояснюється також вивільненням зубів фрези з роздільною схемою формоутворення від обробки дна западин зубів. Зуби знаходяться у вільному різанні, багато в чому схожому на оброблення торчовою фрезою.

На рисунку 3 показана залежність середніх крутних моментів  $M_{k,ср}$  і середньої потужності машини, що споживається верстатом  $N_{ст,ср}$ , від подачі при нарізуванні зубів  $m = 20$  мм черв'ячною фрезою з роздільною схемою формоутворення і фрезою стандартної конструкції. Зі збільшенням подачі середні крутні моменти збільшуються, більш інтенсивно для стандартної фрези, що, вочевидь, пов'язане з більшим зростанням товщин стружок, різаних вершинними кромками її зубів [35, 73]. При збільшенні подачі з 3 мм/об до 6 мм/об, тобто в 2 рази, крутний момент збільшується для фрези з роздільною схемою формоутворення в 1,4 рази, а для стандартної фрези - в 1,6 рази. У діапазоні досліджуваних подач 3 - 6 мм/об, при зустрічному фрезеруванні, середній крутний момент при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення в 2 - 2,5 рази менше, ніж при роботі стандартною фрезою, що обробляє бічну поверхню та дно западин зубів, і в 1,5 - 1,7 рази менше у випадку, коли стандартна фреза не обробляє дно западин зубів. При подачі 6 мм / об і швидкості різання 16 м/хв середній крутний момент для першої становить 430 Н·м, а для другої - 1100 Н·м, що, відповідно в 7,3 і 2,8 рази менше, ніж при чорновому нарізанні коліс такого ж модулю стандартними фрезами.

При попутному зубофрезеруванні фрезою з роздільною схемою формоутворення крутний момент на 10-14% менше, ніж при зустрічному фрезеруванні. Інтенсивність зниження  $M_{k,ср}$  при переході на попутне чистове зубофрезерування приблизно в 2 рази менша, ніж при чорновому попутному нарізуванні зубів стандартними фрезами, що вочевидь, пояснюється меншими перерізами різаної стружки та більш раціональною геометрією різальної частини фрези з роздільною схемою формоутворення. В діапазоні подач 3-6 мм/об, при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення середня споживана верстатом потужність у 1,8-2,4 рази менша, ніж при роботі стандартною фрезою.

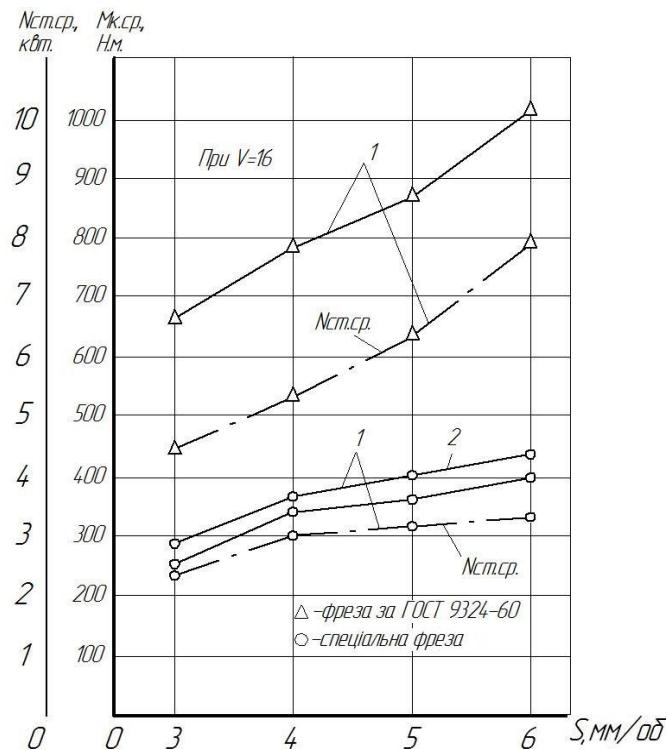


Рис. 3 – Залежність середнього крутного моменту  $M_{k,ср}$  та середньої споживаної верстатом потужності  $N_{ст,ср}$  від подачі черв'ячних фрез  $S$  при оброблюванні колеса  $m = 20$  мм;  $z = 95$ ; 1-зстрічне фрезерування; 2 - попутне фрезерування

Вивчення осцилограм показало, що коефіцієнт нерівномірності фрезерування  $K_n$ , при нарізуванні коліс як стандартними фрезами, так і фрезами з роздільною схемою формоутворення, знаходиться в межах  $K_n = 2,4-2,8$ , дорівнюючи в середньому 2,6. Це, приблизно, відповідає аналогічному співвідношенню, отриманому при чорновому і чистовому нарізуванні великомодульних коліс. При попутному зубофрезеруванні процес різання протікає більш плавно, а коефіцієнт нерівномірності фрезерування знаходиться в межах  $K_n = 2,2-2,4$ .

**Висновки.** Процес чистового зубофрезерування великомодульних коліс є нерівномірним. Непостійність крутного моменту при оброблюванні черв'ячною фрезою пояснюється безперервною зміною товщин стружок, що зрізаються, та зміною кількості одночасно різальних зубів інструменту.

Характер осцилограм крутного моменту, отриманих для випадку обробки зубів фрезою з роздільною схемою формоутворення, свідчить про більшу плавність процесу різання, менші зусилля різання. Це досягається завдяки значному зменшенню розмірів зубів інструменту та збільшенню їх кількості, вивільненню зубів фрези від обробки дна впадин зубів колеса, раціональним геометричним параметрам різальної частини фрези.

У діапазоні досліджуваного подачу 3-6 мм/ об середній крутний момент при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення в 2-2,5 рази менше, ніж при роботі з стандартною фрезою, що обробляє бічні поверхні та дно впадин зубів, і в 1,5 рази менше, коли стандартна фреза не обробляє дно впадин зубів.

#### Список літератури

1. Ключко А. А. Влияние точностных параметров зубчатых колес вертикально - фрезерных обрабатывающих центров на их динамическую устойчивость / А. А. Ключко, И. Г. Годзула // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2014. – Вып. 35. – С. 31 – 35.
2. Ключко А. А. Технология чистовой лезвийной обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / А. А. Ключко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки» – Чернігів, 2011. – № 2(49). – С. 58–68.
3. Чистове нарізання загартованих шевронних коліс обкатувальними різцями / О. О. Ключко, О. О. Анциферова, К. В. Камчатна - Степанова, Я. С. Антоненко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVIII Міжнародної науково - технічної конференції 21 - 24 грудня 2020 року / за заг. ред.В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2020.- С. 45

#### References (transliterated):

1. Klochko A. A. Vliyanie tochnostnykh parametrov zubchatykh kolek vertikal'no - frezernykh obrabatyvayushchih centrov na ih dinamicheskuyu ustojchivost' / A. A. Klochko, I. G. Godzula // Nadezhnost' instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk: DGMA, 2014. – Vyp. 35. – P. 31 – 35.
2. Klochko A. A. Tekhnologiya chistovoy lezviynoy obrabotki krupnomodul'nykh zakalennykh zubchatykh kolek / A. A. Klochko // Visnik Chernigivskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauki» – Chernigiv, 2011. – № 2(49). – P. 58–68.
3. CHistove narizannya zagartovanih shevronnih kolis obkatuval'nimi rizcyami / O. O. Klochko, O. O. Ancyferova, K. V. Kamchatna - Stepanova, YA. S. Antonenko // Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materiali XVIII Mizhnarodnoj naukovu - tekhnichnoj konferencij 21 - 24 of Desember 2020 / za zag. red.V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2020. P. 45

Поступила (received) 10.02.2022

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Ключко Олександр Олександрович (Ключко Александр Александрович, Klochko Oleksandr Oleksandrovych)** – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38067-936-36-64, e-mail: [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-2841-9455>

**Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна (Камчатная-Степанова Екатерина Валерьевна, Kamchatna-Stepanova Kateryna Valeriivna)** – кандидат технічних наук, асистент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38-067-733-4000; e-mail: [katerina.ks@i.ua](mailto:katerina.ks@i.ua), <https://orcid.org/0000-0001-7825-1238>

**Охріменко Олександр Анатолійович (Ohrimenko Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (067) 267-69-43; e-mail: [alexhobs77@gmail.com](mailto:alexhobs77@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>

**Манохін Андрій Сергійович, (Манохин Андрей Сергеевич, Manokhin Andrii Sergiovych)** - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна; тел.: +38-095-205-58-33, e-mail: [The.manokhin@gmail.com](mailto:The.manokhin@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>

**МИРОНЕНКО Є.В., КОВАЛЬОВ В.Д., ВАСИЛЬЧЕНКО Я.В., КЛИМЕНКО Г.П., ФАДЕЄВ В.А., ШАПОВАЛОВ М.В.**

## МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ ПРИ ЧИСТОВОМУ ЗУБОФРЕЗУВАННІ

У статті розглянуто новий підхід до прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс базується на принципах суперпозиції, векторному характеру складових похибки і методі статистичного математичного моделювання методом Монте – Карло. Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є наявність відхилень геометрії реальних профілів від номінальних. Основними кінцевими завданнями, які повинні бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є задачі прогнозування з заданою вірогідністю виникаючих похибок. Аналіз механізмів формування похибок зубчастих коліс свідчить про те, що елементарні похибки технологічних систем операцій зубообробки характеризуються випадковими числовими характеристиками, що визначають величину і характер входження у відповідні комплексні складові, які, в свою чергу, взаємодіючи між собою, визначають досліджувані похибки зубчастих коліс.

Ключові слова: імітаційне математичне моделювання, зубофрезерування, прогнозування похибок, зубчасті колеса, механічна обробка, принцип суперпозиції

**MIRONENKO E.V., KOVAL'OV V.D., VASILCHENKO YA.V., KLYMENKO G.P., FADEEV V.A., SHAPOVALOV M.V.**  
**SIMULATION OF PRECISION PARAMETERS IN FINISH GEAR MILLING**

The article describes a new approach to forecasting errors in the machining of gears based on the principles of superposition, the vector nature of the components of error and statistical method of mathematical modeling by Monte Carlo. The difference between the real shaping of the nominal (ideal) is the presence of deviations of the geometry of the real profiles from the nominal. The major tasks that need to be solved in the study of real regularities of morphogenesis are forecasting problem with a given accuracy errors occur. Analysis of mechanisms of formation of the errors of the gears indicates that basic errors of process systems operations gears are characterized by a random numerical values, which determine the amount and nature of occurrences in the corresponding integrated components that, in turn, interact to determine the investigated error of gears.

Keywords: simulation mathematical modeling, gear milling, forecasting errors, gears, machining, principle of superposition

**Вступ.** Загальна імітаційна модель формування похибок при зубообробці лезовим інструментом. Розглянемо новий підхід до прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс (ЗК), що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки та метод статистичного математичного моделювання методом Монте - Карло. Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є відхилення геометрії реальних профілів від номінальних.

**Мета дослідження.** Основними кінцевими завданнями, які мають бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є завдання прогнозування із заданою достовірністю похибок, що виникають, а також завдання управління, у тому числі оптимального цими похибками.

**Основна частина.** Відповідно до чинного ГОСТ1643 – 81 похибки виготовлення зубчастих коліс [1, 4] рівня забезпечення точності не нижче, ніж необхідна, можуть бути сформульовані у вигляді (1)

$$ES_i \leq EI_i \leq f\Delta i(\alpha) \quad (1)$$

де  $f\Delta i(\alpha)$  – функція залежності  $i$  - й похибки зубчастого вінця (ЗВ) від фазового кута реального профілю зубчастого колеса ( $\alpha$ );  $ES_i$  – мінімальне значення  $i$  – ї похибки;  $EI_i$  – максимальне значення  $i$  – ї похибки..

Таким чином, вимоги до точності виготовлення ЗК щодо забезпечення, наприклад, кінематичної точності повинні складатися з обмежень на радіальне биття та коливання довжини загальної нормалі (згідно з ГОСТ 1643 – 81) та двох функціональних залежностей радіального биття та коливання довжини загальної нормалі від фазового кута повороту ЗК (2) та (3)

$$EI_{Frr} \leq ES_{Frr} \leq f_{Frr}(\alpha), \quad (2)$$

$$EI_{Fwr} \leq ES_{Fwr} \leq f_{Fwr}(\alpha) \quad (3)$$

Аналіз механізмів формування похибок ЗК свідчить про те, що елементарні похибки технологічних систем операцій зубообробки характеризуються випадковими числовими характеристиками, що визначають величину та характер входження у відповідні комплексні складові, які, своєю чергою, взаємодіючи між собою, визначають досліджувані похибки ЗК.

Оскільки досліджувані похибки обробки виникають у результаті впливу низки випадкових чинників, характеристики яких, залежно від рівня складності структурної будови похибок, є величинами чи функціями, які мають випадковий характер прояви, їх визначення можливе з допомогою методів теорії ймовірностей.

Відповідно до цього, на вирішення цього завдання, з підвищення об'єктивності одержуваної інформації, економії тимчасових і матеріальних витрат, найбільш доцільним є застосування методики статистичного моделювання (методу Монте – Карло) [4].



Виходячи з викладеного вище, розроблено загальну модель формування ЗК при механічній обробці, геометрична інтерпретація якої показана на рис. 1.

Відповідно до запропонованої моделі, профіль виробу при механічній обробці є результатом перетину просторових множин А і В (4)

$$C = A + B. \quad (4)$$

Просторові множини утворюються за принципом суперпозиції в результаті імітаційного підсумовування векторів елементарних складових технологічних похибок.

Для побудови розрахункової схеми статистичного моделювання стохастичної моделі елементарні технологічні похибки розбиваються на три види: похибки, що зсувають ЗК в площині обробки і тим самим створюють геометричний ексцентриситет, що перекошують похибки, що створюють перекіс площини обробки ЗК і похибки, що повертають площину обробки і створюють.

Далі, згідно з розрахунковою схемою (рис. 2), моделювання похибки обробки ЗК виконується на основі розрахунку кінематичного ексцентриситету у 2 етапи:

1. Відбувається моделювання положення ЗК у верстатній системі: а) моделюється скалярне значення вектора j – й технологічної похибки, який розраховуватиметься:

за (5), якщо похибка розподілена відповідно до закону рівної ймовірності

$$m(E_j) = R_{[0,1]} E_j. \quad (5)$$

де  $m(E_j)$  – моделюване значення елементарної складової погрешности;

$R_{[0,1]}$  – рівномірно розподілена на інтервалі  $[0,1]$  випадкова величина;

$E_j$  – величина елементарної складової погрешности

– по (6) при любом другом виде закона распределения  $E_j$

$$\int_{-\infty}^{m(E_j)} f(E_j) dE = R_{[0,1]}, \quad (6)$$

де  $f(E_j)$  – функція щільності ймовірності розподілення випадкової величини елементарної складової погрешности.

Загальна імітаційна модель формування хиб при зубообробці лезовим інструментом. Розглянемо новий підхід до прогнозування помилок механічної обробки зубчастих коліс (ЗК), що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових помилок та методі статистичного математичного моделювання методом Монте - Карло.

Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є відхилення геометрії реальних профілів від номінальних.

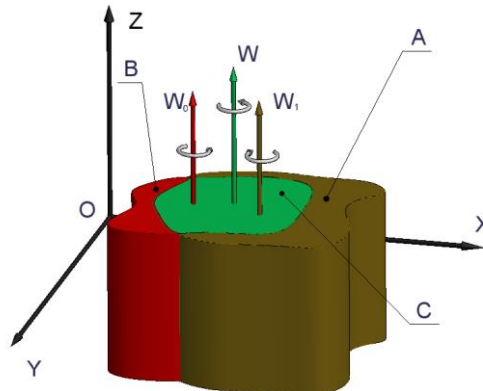


Рис. 1 – Загальна модель формування ЗК при механічній обробці: А – просторовий профіль обробного контуру; В – просторовий профіль оброблюваного контуру; С – просторовий профіль утвореного контуру виробу; W0 - вісь концентрації оброблюваного контуру; W1 – вісь концентрації обробного контуру; W – вісь концентрації утвореного контуру виробу

При цьому необхідно, щоб змодельована випадкова величина  $m(E_j)$  ймовірно (при  $n \rightarrow \infty$ ) сходилася до шуканої величини  $E_j$ , тобто. для будь-якого нескінченно малого  $\epsilon > 0$  повинно виконуватись співвідношення (7)

$$\lim_{m \rightarrow \infty} P \left[ \sum_{i=1}^m (m(E_j) - E_{jr})_m < \varepsilon \right] = 1, \quad (7)$$

де  $P$  – відповідна ймовірність;  
 $m$  – кількість змодельованих значень;  
 $E_{jr}$  – шукана (реальна) величина елементарної складової похибки;  
 б) моделювання кутових положень векторів  $Q_j$  (рис. 2)

$$m(\gamma_j) = R_{[0;1]} 360^\circ = R_{[0;360^\circ]}, \quad (8)$$

де  $R_{[0;1]}$ ,  $R_{[0;360^\circ]}$  – відповідно рівномірно розподілена випадкова величина на інтервалах  $[0, 360^\circ]$ ,  $[0, 1]$ ;  
 $m(\gamma_j)$  – значення кута повороту вектора  $j$  – й складової похибки, що моделюється.

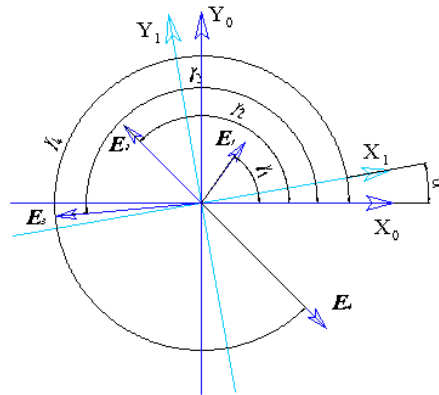


Рис. 2 - Розрахункова схема кінематичного ексцентриситету похибки обробки ЗК

2. Виробляється моделювання обробки ЗК:

Для цього виконується поворот осей координат на кут  $\alpha$ , і цим відтворюється рух обкату, що виникає при обробці ЗК. При цьому ексцентриситет  $E$  (зсув площини обробки ЗК) дорівнює сумі проєкцій всіх ексцентриситетів на вісь  $X$  (9):

$$E(\alpha) = \sum_{j=1}^m (E_j \cos(\gamma_j - \alpha)). \quad (9)$$

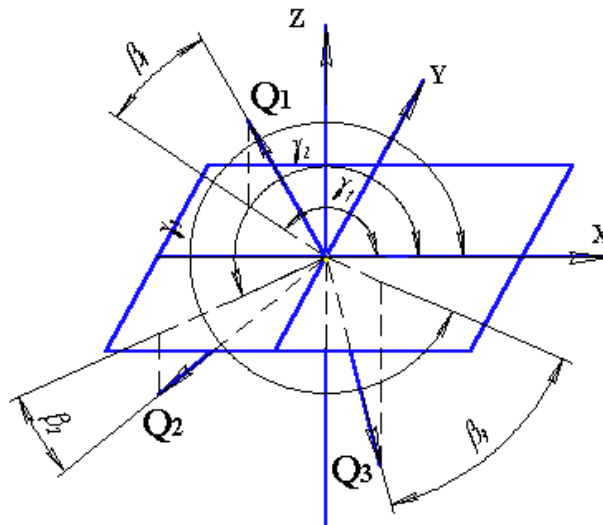


Рис. 3 – Розрахункова схема перекосу площини обробки:  $Q_j$  – нормальні вектори площин перекосу;  $\beta$  і  $\gamma$  кути, що характеризують їхнє положення в просторі щодо площини обробки ЗК

Тим самим, зробивши повний обіг координатних осей від 0о до 360о, отримаємо функціональну залежність ексцентриситета від фазового кута повороту зубчастого колеса  $E(\alpha)$  (рис 4, а).

Розрахунок сумарного перекосу поверхні обробки  $Q$  проводиться за схемою, представленою на рис 3.

Сумарний перекіс визначається аналогічно до моделювання ексцентриситету:

1. Проводиться моделювання положення ЗВ у верстатній системі:

а) моделюється скалярне значення нормального вектора  $j$  – й площини перекосу за аналогією з (5 □ 7);

б) моделюється кутове  $x$  положень цих векторів  $m(\gamma_j)$  і  $m(\beta_j)$  по (10 и 11)

$$m(\gamma_j) = R_{[0;1]} 360^0, \quad (10)$$

$$m(\beta_j) = R_{[-90^0;90^0]}, \quad (11)$$

де  $R_{[0, 360^0]}$ ,  $R_{[0,1]}$ ,  $R_{[-90^0, 90^0]}$  – відповідно рівномірно розподілена на інтервалах  $[0,360^0]$ ,  $[0,1]$ ,  $[-90^0,90^0]$  випадкові величини;

$m(\gamma_j)$ ,  $m(\beta_j)$  – моделювані значення характеристичних кутів  $j$  – про технологічний перекося.

2. Виробляється моделювання обробки ЗК:

Перекіс площини обробки призводить до виникнення вертикальної та горизонтальної складових похибки профілю ЗК (12 и 13)

$$Q_B(\alpha) = \sum_{j=1}^m (Q_j \sin(\beta_j) \cos(\gamma_j - \alpha)), \quad (12)$$

$$Q_G(\alpha) = \sum_{j=1}^m (Q_j \cos(\beta_j) \cos(\gamma_j - \alpha)). \quad (13)$$

Якщо досліджувана похибка носить лише радіальний характер як  $Q$ , то призначається  $Q_G$ . Тим самим, зробивши повний оборот координатних осей від 0 до 360о, отримаємо функціональну залежність перекосу  $Q$  від фазового кута повороту ЗК (рис 4, б).

Моделювання третього типу похибок відбувається так:

1. Виконується моделювання значення похибки  $P_j$  згідно (4 □ 6).

2. Виконується моделювання початкового фазового кута (14)

$$m(\varphi_j) = R_{[0,1]} \frac{\pi}{2} = R_{[0, \frac{\pi}{2}]}, \quad (14)$$

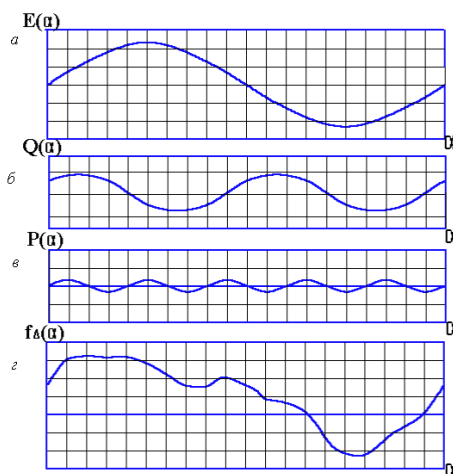


Рис. 4 – Схема формування функціональної залежності похибок вінця ( $E$ ,  $Q$ ,  $P$ ,  $f_b$ ) від фазового кута повороту ЗК

3. Виконується моделювання обробки ЗК (15)

$$P(\alpha) = \sum_{j=1}^m (P_j \cos(\varphi_j + \alpha T)) \quad (15)$$

де  $T$  – період коливань  $T=2\pi/z$ ;  $z$  - Число зубів досліджуваного ЗК.

Таким чином, зробивши повний оборот координатних осей ЗК від 0о до 360о отримаємо функціональну залежність кінематичного ексцентриситету  $P$  від фазового кута повороту зубчастого колеса (рис 4, в).

Користуючись принципом суперпозиції, отримаємо функціональну залежність похибки вінця від фазового кута повороту ЗК  $f\Delta(\alpha)$  (16)

$$f\Delta(\alpha) = E(\alpha) + Q(\alpha) + P(\alpha). \quad (16)$$

Приклад результатів моделювання представлений (рис 4, г).

Проведений аналіз апріорних уявлень про об'єкт моделювання дозволив виділити найзначніші інформативні параметри процесу обробки.

Відомо, що специфіка черв'ячного зубофрезерування [2, 3] полягає в тому, що характер динамічних параметрів обробки значною мірою обумовлюється зміною в часі геометричних та кінематичних характеристик (товщини зрізаних шарів та величин кінематичних передніх та задніх кутів для всіх точок периметру ріжучих кромок). зубів черв'ячної фрези), (17)

$$\vec{D}_i = \sum_{i=1}^{z_0} \sum_{j=1}^{z_i} \int_L \vec{D}(a_i, \alpha_i, \gamma_i) dl, \quad (17)$$

де  $\vec{D}_i$  – вектор динамічних параметрів процесу обробки;

$z_0$  – число рейок черв'ячної зуборізної фрези;

$z_i$  – число зубів  $i$ -ї рейки фрези;

$a_i$  – миттєва товщина зрізаного шару в точці ріжучої кромки, що розглядається;

$\alpha_i$  та  $\gamma_i$  – миттєві значення кінематичних переднього та заднього кутів для розглянутої точки;

$L$  – параметр ріжучої кромки.

Завдання структурної та параметричної ідентифікації моделей виду (17) за експериментальними даними є завданням надзвичайно великої розмірності, що не має єдиного рішення. Численні теоретичні та експериментальні дослідження (зокрема, роботи В.М. Башкирова, К. Ziegler, G. Sulzera та ін.) свідчать про наявність значущого монотонного зв'язку між площею шару, що зрізається зубами фрези, та динамічними параметрами процесу обробки.

Як інтегральну характеристику стану процесу обробки, як правило, використовується миттєва площа шару  $F_t$ , що зрізається кожним із зубів фрези. Тоді модель (17) може бути представлена у вигляді (18)

$$F_t = \sum_{i=1}^{z_0} \sum_{j=1}^{z_i} \int_L a_i dl. \quad (18)$$

Характер зв'язку між параметрами та  $F_t$  дозволяє припустити наявність аналогії між уявленнями цих сигналів у частотній області. Крім того, розроблені методи дозволяють визначити миттєві значення  $\square l$ ,  $\square l$  та  $\square l$  для будь-якої точки будь-якого зуба фрези.

У моделі враховано особливості процесу обробки, зумовлені такими факторами: фактичною формою ріжучих кромок (схемою різання, типом черв'яка); кутами установки фрези, нахилу стружкових канавок, підйому витків фрези; числом заходів та рейок фрези; кутом нахилу та числом зубів колеса тощо. Формування моделі як комплексу формальних методів і алгоритмів дозволяє автоматизувати процес дослідження.

Метод та алгоритм побудови математичної моделі черв'ячної зуборізної фрези. Ріжуча кромка зуба фрези є плоским «примітивом» – упорядкованим списком точок площини, заданих їх координатами у системі координат (СК)  $X_k Y_k$ , пов'язаної із зубом фрези (рис. 5).

Кількість типів примітивів залежить від схеми різання черв'ячної фрези, кількість точок у кожному з примітивів визначається конструкцією фрези та заданою точністю опису [2, 4]. Черв'ячна зуборізна фреза є «комплексом примітивів», кількість та просторове розміщення яких у СК фрези  $XQYQZQ$  визначається типом та конструкцією фрези (рис. 5). Розміщення моделі фрези в СК  $XZYZZZ$ , пов'язаної із заготівлею (рис. 6), проводиться на основі методу початкового позиціонування і полягає у призначенні початкових координат центру СК  $XQYQZQ$  в СК  $XZYZZZ$ .

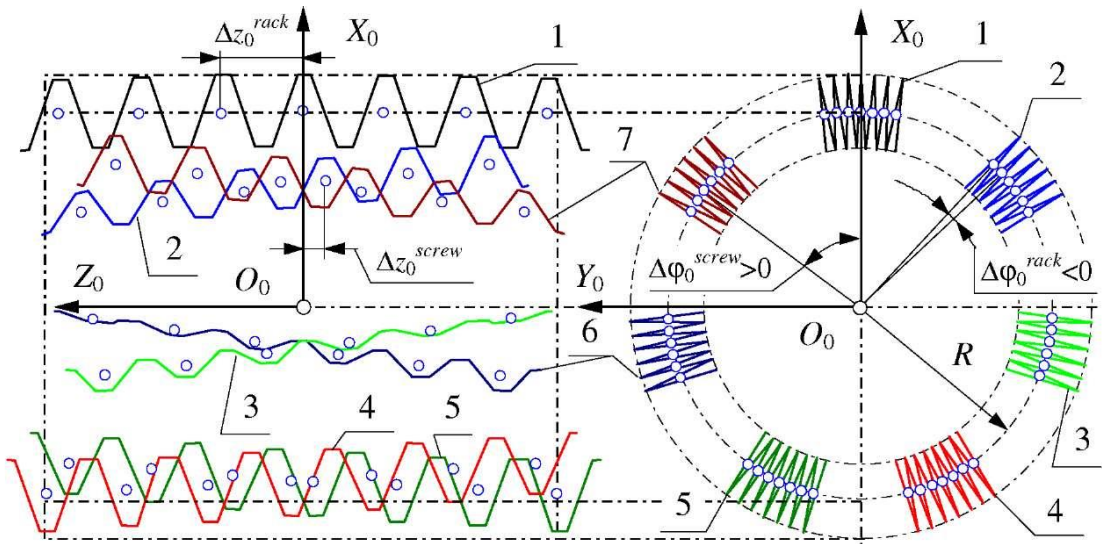


Рис. 5 – Графічне представлення математичної моделі двозахідної правозахідної черв'ячної зуборізної фрези

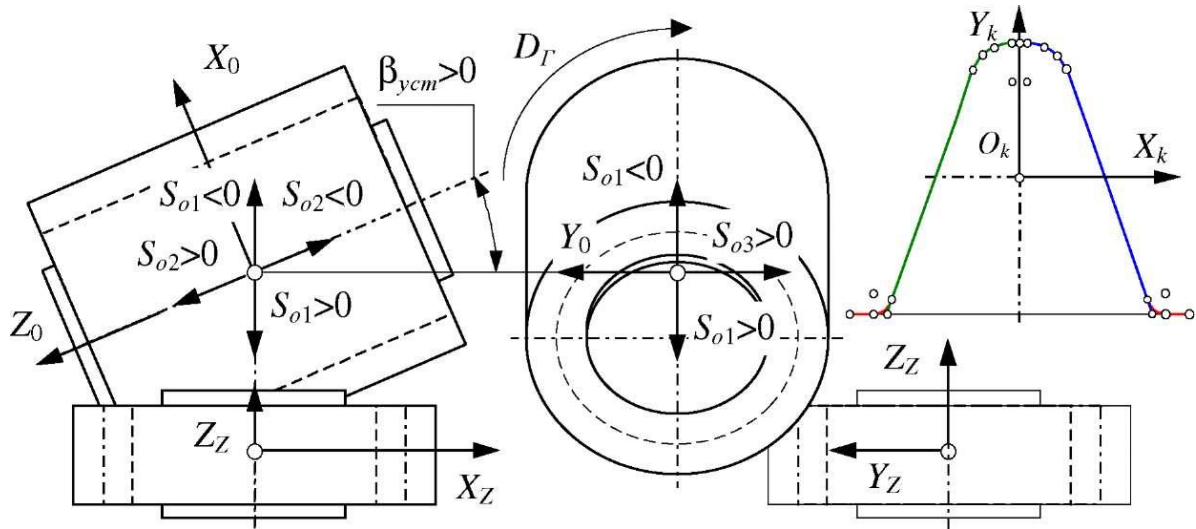


Рис. 6 – Системи координат та угоди про знаки рухів подачі

Моделювання переміщення фрези здійснюється за допомогою «алгоритму прямого трасування зубів». Для цього введені поняття «передавальне відношення фреза – заготовля ( $i_{01}$ )» та «квант переміщення фрези в результаті головного руху різання, рухів обкату та подачі ( $\Delta\varphi_0$ )» (19)

$$\begin{cases} i_{01} = -\text{sign}(\gamma_{m0}) \left[ \frac{z_1}{n_{z0}} - \frac{S_{02}}{2 \times \pi \times R \times \text{tg}(\gamma_{R0})} \right] \times \left[ 1 - \text{sign}(\gamma_{m0}) \times \frac{S_{01} \sin(\beta)}{z_1 \times \pi \times m} \right], \\ \Delta\varphi_0 = -\frac{2\pi}{n_{\text{hob}}}, \Delta\varphi_Z = \frac{\Delta\varphi_0}{i_{01}}, \Delta S_{01} = S_{01} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|, \Delta S_{02} = S_{02} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|, \Delta S_{03} = S_{03} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|. \end{cases} \quad (19)$$

де  $m$  – модуль;

$i_{01}$  – передатне відношення "фреза-заготовля";

$Z_1$  – число зубів колеса;

$n_{z0}$  – число заходів фрези;

$R$  – радіус, на якому розташовані центри примітивів (у окремому випадку  $R = dm_0/2$ ,  $dm_0$  – середній

розрахунковий діаметр фрези);

– кут підйому витків фрези на циліндрі радіуса R;

$\beta$  – кут нахилу зубів колеса;

S01 – подача фрези у напрямку осі заготовки (зустрічна/попутна);

S02 – осьова подача фрези;

S03 – радіальне подання;

phob – число «тактів моделювання» на оборот фрези.

Кванти переміщень  $\Delta\varphi_0, \Delta\varphi_\zeta, \Delta S_{01}, \Delta S_{02}, \Delta S_{03}$  надалі використовуються для визначення положень зубів фрези в СК, пов'язаної із заготівлею, на будь-якому такті моделювання q.

Метод оцінки миттєвого стану процесу обробки заснований на відновленні форми поверхні, що обробляється кожним із зубів фрези в кожний момент часу. Для відновлення форми оброблюваної поверхні використовуються функціональні залежності (ФЗ), що визначають «траєкторії зворотного трасування» зубів – гладкі просторові криві, за якими зубці, що формували оброблювану поверхню («kz – минулі» зуби), наближалися до того положення, яке вони зайняли на аналізованому такті моделювання.

ФЗ зворотного трасування є векторними функціями виду  $G_z^r(i, j, q, k_z, \tau)$ , моделювання q, де – вектор координат центру kz – минулого примітиву в СК XZYZZZ, q – індекс такту моделювання,  $\tau$  – «глибина зворотного трасування».

Для вибору єдиного положення кожного з kz – минулих примітивів, що представляють поверхню, що обробляється, використовується критерій мінімізації евклідової метрики (6.20) як функції глибини трасування  $\tau$ .

$$R(i, j, q, k_z, \tau) = G_z(i, j, q, 0) G_z^r(i, j, q, k_z, \tau) \quad (20)$$

де  $G_z(i, j, q, 0)$  – вектор координат в СК XZYZZZ центру примітиву, що розглядається, на такті моделювання q;

Tk – траєкторія зворотного трасування центру примітиву kz – зуба, що пройшов.

Застосування такого підходу дозволяє побудувати операційне визначення зрізаного шару фрези, що розглядається зубом, на заданому такті моделювання q, у формі геометричного відношення, заданого на аналізованих «оттрасованих» примітивах.

$$[S_{i,j}]_q = D_{a1} \cap \left[ [P_{i,j}]_q - [P_{i,j}]_q \cap \left[ \cup_{k_z=1}^{k_{z0}} [T_{k_z} [P_{i-k_z,j}]_q \right] \right], \quad (21)$$

де T – оператор зворотного трасування минулого примітиву;

Kz0 – цикл схеми різання;

Da1 – фігура, утворена розсіченням тіла заготовки площиною примітиву.

Тобто, ф-ла (15) – оцінка миттєвої площі шару, що зрізає будь-яким зубом фрези на заданому такті моделювання q. Для реалізації методу розрахунку (21), використовуються такі алгоритми:

1. Алгоритм визначення глибини зворотного трасування  $\tau$ , що доставляє мінімум функції  $R(i, j, q, k_z, \tau)$ .

2. «Алгоритм відсікання», який використовується для виділення та видалення ділянок примітивів, що знаходяться поза тілом заготівлі.

3. Алгоритм переведення оттрасированного примітиву в систему координат примітиву.

4. Алгоритм побудови перетину та об'єднання плоских фігур, заданих списками точок.

5. Алгоритм визначення площі плоскої фігури.

Метод, заснований на використанні ФЗ зворотного трасування, дозволяє також відновлювати форму поверхні, обробленої на звороті заготовки, що передував переходу, що розглядається. Всі розроблені алгоритми об'єднані в загальному алгоритмі зворотного трасування зубів і можуть використовуватися також (крім алгоритму визначення площі) для визначення інших (крім миттєвої площі шару, що зрізається) миттєвих геометричних параметрів процесу обробки (a1,  $\gamma$ ,  $\square$ l).

Імітаційна математична модель (ИММ) процесу обробки є комплексом формальних методів і реалізують їх алгоритмів. ИММ дозволяє з будь-яким ступенем деталізації аналізувати процес обробки з погляду його геометричних закономірностей.

Вимушені коливання пружного переміщення Y по нормалі до поверхні різання, що викликаються дією впливів f(t), що обурюють, призводять до похибки обробки. Система управління за результатами вимірювання Y за допомогою виконавчого пристрою змінює товщину шару, що зрізається (шляхом зміни подачі) на величину Yi. Передавальні функції елементів пружної системи з керуючого Wyy(p) та обурюючого Wfy(p) впливу процесу формоутворення Wp(p) та виконавчого пристрою Wu(p) мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} W_y^y(p) &= Y_y^y(p) / P_y(p) = k_y / (T_{2y}p^2 + T_{1y}p + I); \\ W_y^f(p) &= Y_y^f(p) / f(p) = k_f / (T_{2y}p^2 + T_{1y}p + I); \\ W_p(p) &= P_y(p) / \delta(p) = k_p / (T_p p + I); \\ W_u(p) &= Y_y(p) / \varepsilon(p) = k_u / (T_y p + I); \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

де  $\varepsilon(p) = Y^0(p) - Y(p)$ ;  $Y^0(p)$ ,  $Y(p)$ ,  $P_y(p)$ ,  $f(p)$  – операторні зображення помилки, керуючого впливу, регульованого параметра, що становить сили різання та впливу, що обурює;  $k_f = k_{1y}/c_u$  – коефіцієнт передачі пружної системи з обурення;  $T_i$  і  $k_i$  – постійна часу та коефіцієнт передачі виконавчого пристрою. Інші параметри вказані у роз'ясненнях до залежностей (7), (8).

Точність роботи системи управління характеризується помилкою  $\varepsilon = \varepsilon_y 0 + \varepsilon_f$ , причому  $\varepsilon_y 0$  – помилка, спричинена керуючим впливом  $Y(t)$ ;  $\varepsilon_f$  – помилка, спричинена обуренням

$$\left. \begin{aligned} f(t) & \\ \varepsilon_y^0(p) &= [1 + W_p(p) W_y^y(p)] Y^0(p) / [1 + W_p(p) W_y^y(p) + \\ &+ W_p(p) W_y^y(p) W_u(p)]; \\ \varepsilon_f(p) &= W_y^f(p) f(p) / [1 + W_p(p) W_y^f(p) + W_p(p) W_y^y(p) W_u(p)]. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

З урахуванням виразів (24) система рівнянь (22) набуває вигляду

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_y^0(p) &= (b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0) Y^0(p) / (d_4 p^4 + d_3 p^3 + \\ &+ d_2 p^2 + d_1 p + d_0); \\ \varepsilon_f(p) &= (c_2 p^2 + c_1 p + c_0) f(p) / (d_4 p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0); \\ d_0 &= 1 + k_p k_y + k_u k_p k_y; \quad b_0 = 1 + k_p k_y; \quad d_1 = b_1 = T_4 + T_p + T_{1y} \\ d_2 &= b_2 = T_p T_u + T_{1y} + T_{2y}; \quad d_3 = b_3 = T_p T_{1y} + T_{2y} T_u \\ d_4 &= b_4 = T_p T_{2y} T_u; \quad c_0 = k_f (T_p + T_u); \quad c_2 = k_f T_p T_u. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Значення помилок, що встановилися, представляється у вигляді спадного ряду

$$\begin{aligned} \varepsilon_{y0}(t) &= g_0 Y(t) + g_1 \frac{dY(t)}{dt} + \frac{g_2}{2!} \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + \dots; \\ \varepsilon_{y0}(t) &= h_0 f(t) + h_1 \frac{df(t)}{dt} + \frac{h_2}{2!} \frac{d^2 f(t)}{dt^2} + \dots; \end{aligned}$$

де  $g_0, g_1, g_2, \dots$ ;  $h_0, h_1, h_2, \dots$  – коефіцієнти помилок, що характеризують точність роботи системи та залежні від її структури. У структурі системи управління (рис. 2 а) значення коефіцієнтів помилок визначаються співвідношеннями

$$\left. \begin{aligned} n_0 &= u_0 \cdot \varepsilon_0 \quad n_1 = (u_1 - \varepsilon_1 n_0) \cdot \varepsilon_0 \quad n_2 \cdot 2 = (u_2 - \varepsilon_2 n_1 - \varepsilon_1 n_0) \cdot \varepsilon_0 \dots \\ h_0 &= c_0 / d_0; \quad h_1 = (c_1 - d_1 h_0) / d_0; \quad h_2 / 2 = (c_2 - d_2 h_1 - d_1 h_0) / d_0 \dots \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Для зубофрезерних верстатів підвищеної точності основну похибку становлять коефіцієнти статичних та кінематичних помилок  $g_0, h_0$  та  $g_1, h_1$ . Усунення цих помилок дозволить суттєво підвищити один із основних параметрів експлуатаційної характеристики системи – технологічні параметри зубофрезерування при забезпеченні заданої точності з максимально досяжною продуктивністю.

Для вирішення поставленої задачі введемо в систему управління пружними переміщеннями ДТСС додатковий позитивний зворотний зв'язок за складовою  $P_u$  сили різання з передатною функцією  $W_{oc}^u$ . У цьому випадку

помилка  $\varepsilon_{y0}$  щодо управління  $Y^0$ .

$$\varepsilon_{y0}(p) = \frac{[1 - W_p(p)W_y(p)W_z^y(p) + W_c^y(p)W_p(p)]Y^0(p)}{1 - W_p(p)W_y(p)W_{oc}^y(p) + W_p(p)W_z^s(p) + W_y^y(p)W_p(p)W_u(p)} \quad (26)$$

Прирівнявши чисельник виразу (26) до нуля, визначимо структуру та параметри передавальної функції  $W_{oc}^y$ , при яких усувається помилка  $\varepsilon_{y0}(p)$ :

$$W_{oc}^y(p) = [1 + W_y^y(p)W_p(p)] / [W_p(p)W_u(p)]. \quad (27)$$

Вираз (27) є умовою повної інваріантності системи управління з керуючого впливу  $Y^0(t)$ , і за його виконання коефіцієнти  $g_i$ , (де  $i = 1, 2, 3, \dots$ ) дорівнюють нулю. Проте виконання умови (27), як правило, призводить до фізично нереалізованих систем. У той самий час достатня практики точність обробки досягається при  $g_0=0$  і  $g_1=0$ . Для цього достатньо, щоб  $b_0=0$  і  $b_1=0$ . Однак при  $b_1=0$  та  $d_1=0$ , що призводить до втрати стійкості технологічної системи. Тому для класу систем, що розглядається, досить усунути кінематичну помилку  $g_0=b_0/d_0=0$ . Останнє досягається введенням позитивного зворотного зв'язку за силою різання  $P_u$  з функцією передавальної  $W_{uo.c}(p)=k_{o.c}$ . При цьому  $b_0=I+k_p k_y - k_p k_u k_{o.c}$ .

$$k_{o.c} = (I + k_p k_y) / (k_p k_u). \quad (28)$$

Визначимо помилку, що вноситься збурюючими впливами  $f(p)$ , з урахуванням  $W_{oc}^y(p)$ :

$$\varepsilon_f(p) = \frac{W_y^y(p)[1 - W_p(p)W_y(p)W_{oc}^f(p)] / W(p)}{1 - W_p(p)W_u(p)W_{oc}^f(p) + W_y^f(p)W_p(p)W_u(p) + W_y^y(p)W_p(p)} \quad (29)$$

Прирівнявши чисельник виразу (29) нулю, знайдемо умову повної інваріантності по

□  $f(t)$ :

$$W_{oc}^f(p) = I / [W_p(p)W_u(p)] = (T_p p + I) / (k_p k_u). \quad (30)$$

Умова (30) виконується, якщо структура передавальної функції зворотного зв'язку визначається виразом  $W_{oc}^f(p) = k_{o.c} + T_{oc} k_p k_u$ , а параметри вибираються з умов  $c_0=1 - k_p k_u k_{o.c}=0$ ,  $c_1= T_0 + T_i - T_{pp} = 0$ , причому  $k_{o.c} = I / k_u k_o$ ;  $T_{oc} = (T_p + T_u) / (k_p k_u)$ .

Технічна реалізація позитивного зворотного зв'язку за силою різання  $P_u$  ( $P_z, P_x$ ), що компенсує вплив кінематичних помилок, представлена на рис. 3, б. Як чутливі і перетворюючі елементи 1 використовуються системи електронного адаптивного управління з датчиками зворотного зв'язку.

Блок 2 дозволяє компенсувати вплив температури і коливання напруги живлення. Вихідний сигнал підсилювача УРУ надходить на вхід диференціюючого ланцюга 4 і дільник управління технологічної системи 3. При зміні сигналу ланцюга 4 регулюється значення  $T_{oc}$ , а в ланцюгу 3 –  $k_{oc}$ . Сигнали  $U_2=f(T_{ocp})$  та  $U_1=f(k_{oc})$  сумуються на вході суматора.

Отримані залежності (1) – (3), (10), (12), (15) – (22) та побудовані в координатах  $t, S, v$  області оптимальних технологічних параметрів зубофрезерування дозволяють перейти до алгоритмізації оптимального управління технологічних процесів зубообробки з розробкою системи технологічного оптимального управління, що реалізують такі алгоритми [1, 4].

**Висновки.** Розглянуто новий підхід до прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс, що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки та методі статистичного математичного моделювання методом Монте – Карло.

Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є відхилення геометрії реальних профілів від номінальних. Основними кінцевими завданнями, які мають бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є завдання прогнозування із заданою достовірністю похибок, що виникають.

Аналіз механізмів формування похибок зубчастих коліс свідчить про те, що елементарні похибки технологічних систем операцій зубообробки характеризуються випадковими числовими характеристиками, що визначають величину і характер входження у відповідні комплексні складові, які, своєю чергою, взаємодіючи між собою, визначають досліджувані похибки зубчастих коліс.

Проведений аналіз апріорних уявлень про об'єкт моделювання дозволив виділити найбільш значущі інформативні параметри процесу зубообробки з урахуванням динамічних параметрів та значною мірою



обумовлюється зміною в часі геометричних та кінематичних характеристик для всіх точок периметра ріжучих кромок усіх працюючих зубів черв'ячної фрези.

#### Список літератури

1. Технологические способы повышения точности зубофрезерования универсальными червячными фрезами / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // – Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ ХПІ, 2010. – № 25. – С. 134–141.
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. Клочко А. А. Технология чистовой лезвийной обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / А. А. Клочко // – Вестник Черниг. гос. технолог. ун-та. – 2011. – № 2(49). – С. 58–68.
4. Шелковой А. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства /А. Шелковой, А. Клочко, Е. Набока // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.: ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720
5. Рябенко С.В. Профільне шліфування зубчастих коліс редукторів очисних комбайнів/ С.В. Рябенко, О.М.Ковальчук, В.В. Нежебовський, Р.А. Бережний, О.О. Шилков, О.О. Клочко// Інструментальне матеріалознавство: Збірник наукових праць. – Вип.24. – Київ: ІНМ ім.В.М. Бакуля НАН України. 2021. – С. 464-470.
6. Охріменко О.А., Клочко О.О., Гасанов М.И., Заковоротний О.Ю., Рябенко С.В. Проективання червячних фрез для зубчастих коліс з припуском під зубшліфування. Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези восьмої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – С. 102 – 104.
7. Пермяков О.А., Клочко О.О., Камчатна-Степанова К.В., Новіков Ф.В. Червячна фреза з роздільною схемою формування з поворотними непереточуваними різальними елементами. Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 22-24 сентября 2021 г., г. Одесса. – Одесса: Государственный университет «Одесская политехника», 2021. – С. 133 – 134.
8. Особливості побудови алгоритмів метода групового врахування аргументів. Клочко О.О., Корбут Є.В., Равська Н.С., Родін Р.П., Парненко В.С. Збірник наукових праць XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 5–6 листопада 2021 року. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. – С. 137–139.
9. Пермяков О.А., Клочко О.О., Камчатная-Степанова О.В., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Сапон С.П. Моделювання технологічних процесів оброблення великомодульних зубчастих коліс. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021) : матеріали тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 26–27 травня 2021 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – Т. 1. – С. 73 – 74.
10. Kamchatna – Stepanova K. Methodology for the development of a model for managing the quality and productivity of shaping when processing hardened coarse-modular gears. / V. Kovalov , Y. Vasylychenko, M. Shapovalov, O. Antsyferova, K. Kamchatna - Stepanova // Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези сьомої міжнародної науково-технічної конференції (17 – 19 листопада 2020 р.). Харків Краматорськ – Харків, НТУ «ХПІ», 2020. С. 36 - 38.

#### References (transliterated):

1. Tekhnologicheskie sposoby` povыsheniya tochnosti zubofrezirovaniya universal`ny`mi chervyachny`mi frezami / Yu. V. Timofeev, E. V. Mironenko, A. A. Klochko, V. F. Shapovalov, O. E. Mironenko // – Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhnichnogo uni`versitetu «Kharki`vs`kij poli`tekhnichniy i`nstitut» – Kharki`v: NTU KhPI, 2010. – # 25. – S. 134–141.
2. . Tekhnologicheskie osobennosti obrabotki krupnomodul`ny`kh zakalenny`kh zubchaty`kh koles [Tekst] / N.V. Kravcov, Yu.V. Timofeev, A.A.Klochko [i dr.]; Nauch. Red.: A.A.Permyakov; 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. Klochko A. A. Tekhnologiya chistovoy lezviynoy obrabotki krupnomodul`ny`kh zakalenny`kh zubchaty`kh koles / A. A. Klochko // – Vestnik Chernig. gos. tekhnolog. un-ta. – 2011. – # 2(49). – S. 58–68.
4. Shelkovej A. Imitacionnoe modelirovanie v zadachakh mekhanosborochno go proizvodstva /A. Shelkovej, A. Klochko, E. Naboka // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 s.: il. Na russkom yazy`ke. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720
5. Ryabchenko S.V. Profi`l`ne shli`fuvannya zubchastikh koli`s reduktori`v ochisnikh kombajni`v/ S.V. Ryabchenko, O.M.Koval`chuk, V.V. Nezhebovs`kij, R.A. Berezhnij, O.O. Shilkov, O.O. Klochko// I`nstrumental`ne materi`aloznavstvo: Zbi`rnik naukovikh prac` . – Vip.24. – Kiyiv: I`NM i`m.V.M. Bakulya NAN Ukraini. 2021. – S. 464-470.
6. Okhri`menko O.A., Klochko O.O., Gasanov M.I., Zakovorotnij O.Yu., Ryabchenko S.V. Proektuvannya chervyachnikh frez dlya zubchastikh koli`s z pripuskom pi`d zuboshli`fuvannya. I`nformatika, upravli`nnya ta shtuchnij i`ntelekt. Tezi vos`moyi mi`zhnarodnoyi naukovotekhnichnoyi konferenczi`yi. – Kharki`v: NTU "KhPI", 2021. – S. 102 – 104.
7. Permyakov O.A., Klochko O.O., Kamchatna-Stepanova K.V., Novi`kov F.V. Chervyachna freza z rozdi`l`noyu skhemoyu formoutvorenniya z povorotnimi neperetochuvanymi ri`zal`nimi elementami. Novy`e i`netradiczi`onny`e tekhnologii v resurso- i`energoberezhennii: Materialy` mezhdunarodnoj nauchnotekhnicheskoy konferenczii, 22-24 sentyabrya 2021 g., g. Odessa. – Odessa: Gosudarstvenny`j universitet «Odesskaya politehnika», 2021. – S. 133 – 134.
8. Osoblivosti` pobudovi algoritmi`v metoda grupovogo vrakhuvannya argumenti`v. Klochko O.O., Korbut Ye.V., Rav`ska N.S., Rodi`n R.P., Parnenko V.S. Zbi`rnik naukovikh prac` KhI` Vseukrayins`koyi naukovotekhnichnoyi konferenczi`yi z mi`zhnarodnoyu uchastyu «Proczi`si mekhanichnoyi obrobtki, verstaty ta i`nstrument», 5–6 listopada 2021 roku. – Zhitomir : Derzhavnij uni`versitet «Zhitomir`ska poli`tekhnika», 2021. – S. 137–139.
9. . Permyakov O.A., Klochko O.O., Kamchatnaya-Stepanova O.V., Koval`ov V.D., Vasi`lchenko Ya.V., Sapon S.P. Modelyuvannya tekhnologi`chnikh procesi`v obroblennya velikomodul`nikh zubchastikh koli`s. Kompleksne zabezpechennya yakosti` tekhnologi`chnikh procesi`v ta sistem (KZYATPS – 2021) : materi`ali tez dopovi`dej XI Mi`zhnarodnoyi naukovopraktichnoyi konferenczi`yi (m. Cherni`gi`v, 26–27 travnya 2021 r.) : u 2 t. / Naczi`onal`nij uni`versitet «Cherni`gi`vs`ka poli`tekhnika» [ta i`n.] ; vi`dp. za vip.: Yeroshenko Andri`j Mikhajlovich [ta i`n.]. – Cherni`gi`v : NU «Cherni`gi`vs`ka poli`tekhnika», 2021. – T. 1. – S. 73 – 74.
- 10 Kamchatna – Stepanova K. Methodology for the development of a model for managing the quality and productivity of shaping when processing hardened coarse-modular gears. / V. Kovalov , Y. Vasylychenko, M. Shapovalov, O. Antsyferova, K. Kamchatna - Stepanova // I`nformatika, upravli`nnya

*Відомості про авторів / 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](mailto:evgeny.mironenko@dgma.donetsk.ua);

**Ковальов 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](mailto: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: [vasilchenko.ua@gmail.com](mailto:vasilchenko.ua@gmail.com);

**Клименко Галина Петрівна (Klimentko Galina)** – доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050)-2198511 ;

**Фадєєв Валерій Андрійович (Fadeev Valeriy)** – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Національного Технічного Університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: 380503236418, e-mail [fadeev@fed.com.ua](mailto:fadeev@fed.com.ua);

**Шаповалов Максим Валерійович (Шаповалов Максим Валерьевич, Sharovalov 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](mailto:mntk.ddma@gmail.com)

*ХАВІН Г. Л., ЧЖИВЕНЬ Х.*

## **ВПЛИВ КУТУ ОРІЄНТАЦІЇ АРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗНОШУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОБРОБЦІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ**

Відносний кут між напрямком волокон армування і вектором швидкості різання, що визначається як кут орієнтації елементів армування, значно впливає на режим формування стружки, сили різання і підсумкову якість поверхні. При механічній обробці полімерних композиційних матеріалів має місце надзвичайно інтенсивне зношування по задній поверхні. У цій роботі представлений аналіз проблеми впливу кута орієнтації волокон у полімерному композиті на інтенсивність зношування ріжучого інструменту. Для запропонованої раніше спадково-старіючої моделі втрати ваги інструментом за рахунок зношування, запропоновано враховувати вплив кута армування через залежність контактного тиску та коефіцієнта тертя від цього параметра. У статті розроблено узагальнюючу модель практичного урахування відомого заздалегідь кута армування для прогнозування зношування інструменту та його стійкості при механічній обробці полімерних композиційних матеріалів.

**Ключові слова:** кут армування, інтенсивність зношування, спадково-старіюча модель, обробка полімерних композитів.

**KHAVIN G., ZHIVEN H.**

### **THE ORIENTATION ANGLE OF REINFORCING ELEMENTS INFLUENCE ON TOOL WEAR INTENSITY IN PROCESSING POLYMER COMPOSITES**

The relative angle between the direction of the reinforcing fibers and the cutting speed vector, defined as the angle of the reinforcing elements orientation, has a significant impact on the chip formation mode, cutting forces and the final surface quality. During machining of polymer composite materials, high-intensity wear occurs along the flank surface. This paper presents an analysis of the problem of the orientation fibers angle influence in a polymer composite on the cutting tool wear rate. For the previously proposed hereditary-aging model of tool weight loss due to wear, it is proposed to take into account the influence of the reinforcement angle through the dependence of the contact pressure and friction coefficient on this parameter. The article develops a generalizing model for practical consideration of the known in advance angle of reinforcement to predict tool wear and tool life during of polymer composite materials machining.

**Key words:** reinforcement angle, wear intensity, hereditarily-aging model, polymer composites processing.

**Вступ.** Композитні матеріали, завдяки своїм високим механічним властивостям, переважні в галузях промисловості, де потрібна мала вага і висока міцність. Виробники прагнуть виготовити деталі з композитів за одну операцію (формування, загартування, обробка тиском). Однак часто потрібна подальша механічна обробка, для складання або використання. Виробляються такі операції, як видалення залишків і надлишкового матеріалу, згладжування поверхонь, що сполучаються і виготовлення отвору для складання компонентів. Як правило, ці післявиробничі потреби задовольняються за допомогою традиційних методів механічної обробки, таких як звичайне точіння, свердління, гвинтове фрезерування, гвинтове фрезерування під кутом, фрезерування з коліванням, бічне фрезерування або обрізка кромки.

Різання вугле- та склопластикових композиційних матеріалів складна та дорога операція. Через неоднорідність та анізотропію матеріалу виникають характерні геометричні похибки, викликані механічною обробкою та механізмами стружкоутворення, які істотно залежать від напрямку обробки. Армуючі елементи мають сильний абразивний ефект зносу, який слід враховувати при виборі різального інструменту і верстата. Відведення тепла також проблематичне через низьку теплопровідність полімерів та небезпеку використання мастильно-охолоджуючих рідин (затікання полімеру). Ці властивості породжують безліч мікро- та макрогеометричних дефектів матеріалу, таких як розшарування, нерозрізані волокна, вигорання матриці, витягування волокна, виходи або мікротріщини.

**Аналіз основних досягнень та літератури.** З численних експериментальних досліджень відомо, що відносний кут між напрямком волокна і вектором швидкості різання, що визначається як кут орієнтації волокна, має основний вплив на режим формування стружки, сили різання та підсумкову якість поверхні. Наприклад, у процесі токарної обробки вектор швидкості різання ріжучої кромки щодо заготівлі завжди стосується кола різання в площині, перпендикулярної осі обертання і залишається незмінним. Таким чином, кут орієнтації волокон при токарній обробці залежить від способу укладання волокон, використаного при виготовленні композитної циліндричної деталі.

Особливість різання інструментом, що обертається, наприклад, при фрезеруванні, свердлінні і абразивному різанні, на відміну від лінійної ортогональної обробки, полягає в тому, що кут орієнтації волокон  $\theta$  не є постійним, а безперервно змінюється в залежності від положення ріжучої кромки ріжучого інструменту. При фрезеруванні та абразивному різанні товщина стружки також залежить від положення ріжучої кромки. Виникає знос інструменту пов'язаний з взаємодією інструменту із заготовкою у зоні контакту ріжучого інструменту, який за даними [1], істотно варіюється від орієнтації волокон. Тому аналізу параметрів зносу інструменту залежно від орієнтації волокон було приділено особливу увагу [2–4].

Такі фундаментальні дослідження зазвичай виконуються з використанням ортогональних операцій обробки у зв'язку із зменшеною складністю кінематики та її придатністю для диференційованого експериментального аналізу.

© Г.Л. Хавін, Х. Чживень, 2022

Процес поздовжньої торцевої токарної обробки з різною орієнтацією волокон для дослідження характеристик зносу різальних інструментів без покриття залежно від кута різання волокна  $\theta$ , який визначається як кут між орієнтацією волокна та напрямом швидкості різання, представлений у [2].

Враховуючи дослідження в [5], у роботі [2] виявлено сильну залежність зносу інструменту від кута зрізу волокна  $\theta$ . При цьому найбільш інтенсивне зношування по задній поверхні спостерігалось при кутах зрізу волокна від  $\theta = 30^\circ$  до  $\theta = 90^\circ$ , а при  $\theta = 0^\circ$  і  $\theta = 150^\circ$ , спостерігалась лише невелика зміна геометрії ріжучої кромки, пов'язана зі зносом. Цей факт став наслідком істотної різниці у процесі формування стружки. Таким чином, обробка волокна під кутом  $\theta = 30^\circ$  і  $\theta = 60^\circ$  пов'язана з найвищими загальними осьовими зусиллями та найвищим пружним відтисканням матеріалу, що в поєднанні призводить до найвищих загальних навантажень на інструмент і, таким чином, інтенсивного зносу. Відповідно до [6], кути різання волокна між  $\theta = 0^\circ$  і  $\theta = 90^\circ$  можна розділити на три інтервали, в яких мають місце подібні механізми утворення стружки і, отже, основні характеристики зносу:  $0^\circ \leq \theta < 15^\circ$  (інтервал I),  $15^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$  (інтервал II) та  $75^\circ < \theta \leq 90^\circ$  (інтервал III).

У роботі [7] проаналізовано вплив кута зрізу волокна на коефіцієнт тертя та питому швидкість зношування. Встановлено, що починаючи з  $\theta = 0^\circ$  коефіцієнт тертя і питома швидкість зношування збільшуються зі збільшенням кута зрізу волокна. Крім того, авторами встановлено, що питома швидкість зношування при  $\theta = 90^\circ$  приблизно втричі вище, ніж при  $\theta = 0^\circ$ .

Щоб проаналізувати знос по задній поверхні, округлення радіусу ріжучої кромки та кількість зношеного матеріалу інструменту для максимальної довжини різання 8 м, в [3] були виконали операції обрізки кромки. Для цих експериментів були використані чотири різні кути зрізу волокна  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\theta = 135^\circ$ , дві швидкості різання 19,9 м/хв. та 119,7 м/хв, при постійній подачі 0,3 м/хв. Згідно з представленими результатами найбільш інтенсивне зношування по задній поверхні припадає на  $\theta = 45^\circ$ , а найбільший радіус ріжучої кромки у зношеному стані при  $\theta = 90^\circ$ .

Процес контактної взаємодії інструменту та елементів армування найбільш істотно визначається взаємною орієнтацією напряму армування та руху інструменту. Це поєднання також визначає характер руйнування та утворення стружки, і, як наслідок, силу різання, коефіцієнт тертя та температуру в зоні контакту, а отже, і інтенсивність зношування.

У роботі [8] представлені експерименти з обрізки кромки на односпрямованих ламінатах з різною орієнтацією волокон, які виявили три основних механізми утворення стружки: злам уздовж межі розділу волокно-матриця при різанні ламінату під кутом орієнтації  $0^\circ$ ; злам перпендикулярно осі волокна при різанні ламінату з волокном орієнтацією між  $30^\circ$  та  $75^\circ$ ; міжшарова тріщина зсуву і перпендикулярна тріщина осі волокна при різанні з орієнтацією волокна  $90^\circ$  і вище. Аналогічні дослідження були представлені в [9,10] з кутами шарів 0, 30, 60, 90, 120 та  $150^\circ$ . Механізми були поділені на вигин волокна, відшарування волокна від матриці та короблення волокон.

Незважаючи на численні роботи, присвячені стружкоутворенню при обробці, механізми зношування інструменту під час процесу ще не повністю встановлені. В даний час відомо, що режим зношування при різанні вуглепластику сильно відрізняється від типових режимів зношування, виявлених при різанні металевих сплавів, тобто поверхневий та кратерний знос. Так в [11] прийнято як основний вид зносу при обробці вуглепластику задане закруглення ріжучої кромки (CER). У [12] вивчали вплив орієнтування наповнювача через зв'язок між зносом інструменту і шорсткістю поверхні шляхом проведення експериментів з попутного фрезерування ламінату з кутами  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  і  $0^\circ/90^\circ$  при швидкості різання 30 м/хв, подачі 0,05 мм/об та глибині різання 2 мм при використанні твердого сплаву без покриття та полікристалічного алмазного (PCD) інструменту. Були визначені різні параметри зношування, і один із цих параметрів, визначений як висота ріжучої кромки, тісно пов'язаний з якістю обробки поверхні.

У роботах [13–15] вивчали знос кінцевих твердосплавних фрез при обрізанні кромки і фрезеруванні вуглепластику в присутності СОЖ та умовах сухого різання, щоб знайти вплив цих процесів на шорсткість поверхні та знос інструменту. Було показано, що при нижчій подачі інструмент з алмазним покриттям набагато краще з точки зору зношування та чистоти поверхні. Однак при більш високій подачі перевага алмазного покриття зникає через сколи та відшарування.

У [16,17] вивчався вплив різних кутів нахилу спіралі при кінцевому фрезеруванні шарів  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ . Основна відмінність від ортогонального різання під кутом (косого, коли кут підйому спіралі  $\neq 0^\circ$ ) полягає в присутності зусилля по осі інструменту, що викликає підвищений знос.

В [18] отримані результати про найбільше зношування по задній поверхні в шарах  $45^\circ$  і  $90^\circ$ , що набагато більше, ніж  $0^\circ$  і  $-45^\circ$ , при фрезеруванні вуглепластику. З іншого боку, у [19,20] задекларований максимум зносу під кутом  $30^\circ$  і  $60^\circ$  при ортогональному точінні на  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  і  $150^\circ$  шарів, оскільки ці зразки вуглепластику вимагали більш високої сили різання.

**Мета дослідження, постановка задачі.** Метою даної роботи є обґрунтування і створення теоретичної моделі для обліку впливу орієнтації (кута армування) наповнювача на інтенсивність зношування вершини інструменту.

Фактично йдеться про можливий кількісне урахування фактору різної орієнтації волокон на зношування інструменту.

**Матеріали дослідження.** Численні експериментальні дослідження з вивчення впливу орієнтації (кута армування) наповнювача [21–25] дозволили зробити ряд якісних висновків:

- прогресуюче зношування інструменту характеризується, перш за все, безперервним зменшенням заднього кута, і одночасно зростанням довжини контакту через посилене пружне відновлення зрізаного шару матеріалу;
- знос інструменту по задній поверхні крім силового навантаження визначається орієнтацією волокон і початковим заднім кутом, а вплив початкового переднього кута незначний;
- висота пружного відновлення зрізаного шару сильно залежить від кута зрізу волокон і початкового заднього кута, причому висота тим вище, чим менше початковий задній кут і зменшується, якщо кут зрізу волокна збільшується;
- залежність інструментального матеріалу, що втрачається, від часу контактної взаємодії майже лінійна, і це означає, що швидкість зносу не залежить від зміни геометрії ріжучої кромки;
- найінтенсивніша втрата матеріалу спостерігається при різанні композитів з кутом армування  $30^\circ$  і  $60^\circ$  і з малим початковим заднім кутом;
- сила різання збільшується із збільшенням кута орієнтації до значення  $90^\circ$  для більшої подачі, але знижується вище  $65^\circ$  для меншої подачі.

У роботі [26] запропоновано спадково-старіючу модель втрати ваги інструментом у процесі зношування, згідно з якою швидкість зносу визначається співвідношенням

$$\frac{dv(t)}{dt} = K_{wear} \cdot \frac{\mu \cdot F_n}{[\tau_{sh}]} \cdot \frac{HV_{fill}}{HV_{tool}} \cdot V \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}}, \quad (1)$$

де  $dv/dt$  – швидкість видалення об'єму матеріалу вершини інструменту,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $F_n$  – нормальна складова сили різання в контакті (може бути визначено експериментально), Н;  $\mu$  – коефіцієнт тертя у контакті;  $[\tau_{sh}]$  – допустима напруження зрізу матеріалу наповнювача,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $HV_{fill}, HV_{tool}$  – твердість матеріалу наповнювача (елемента армування) та матеріалу ріжучого інструменту,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $V$  – відносна швидкість ковзання (руху вершини інструменту),  $\text{м}/\text{с}$ ;  $Q$  – енергія активації, Дж/моль;  $R$  – універсальна газова постійна, Дж/(моль $\cdot$ °С);  $T$  – температура в зоні різання, °К;  $t$  – час, с;  $K_{wear}$  – коефіцієнт об'ємного зношування, що визначає форму та інтенсивність зношування поверхні інструменту в часі.

Встановлено [1], що сили різання (дотична і нормальна) в першу чергу залежать від орієнтації волокон, а умови експлуатації та геометрія інструменту мають значно менший вплив. Сила різання (головна) зазвичай поступово збільшується з орієнтацією волокна приблизно  $60^\circ$ , та був значно збільшується при обрізанні кромки з орієнтацією волокна  $90^\circ$ . Потім головна сила зменшується з подальшим збільшенням орієнтації волокна, при цьому значне зменшення між орієнтаціями  $100^\circ$  і  $165^\circ$ . Про зсув максимальної головної сили свідчать дані [27]. Можлива причина такого зсуву – мала глибина різання та великий позитивний передній кут, що використовується у цьому експерименті. Спостережуване значне відтискання пов'язане з малою глибиною різання, а різке збільшення/зменшення основних сил, ймовірно, пов'язане зі зміною режиму формування стружки.

В роботі [1] запропоновано параметр орієнтації результуючої сили по відношенню до напрямку різання, що визначається виразом  $\lambda = \tan^{-1}(F_c/F_t)$ . Результуюча орієнтація означає відношення величин  $F_c$  та  $F_t$ . Осьова сила більша за силу різання для результуючих орієнтацій більше  $45^\circ$ . На відміну від різання металу, це співвідношення зберігається для орієнтацій волокон  $0^\circ < \theta \leq 75^\circ$ , за винятком даних [28,30]. В цілому, осьова сила показує складнішу поведінку, ніж сила різання. Збільшення осьової сили спостерігається при різанні невеликих волокон з позитивною орієнтацією, потім осьова сила зменшується з подальшим збільшенням орієнтації волокон, рис.1. Високі значення осьової сили, ймовірно, пов'язані з пружним відновленням контактного шару, що зазнав деформації перед руйнуванням. Пружна енергія волокон вивільняється після того, як волокна розірвані, створюючи осьову силу на задній поверхні інструменту та забезпечуючи цим її знос.

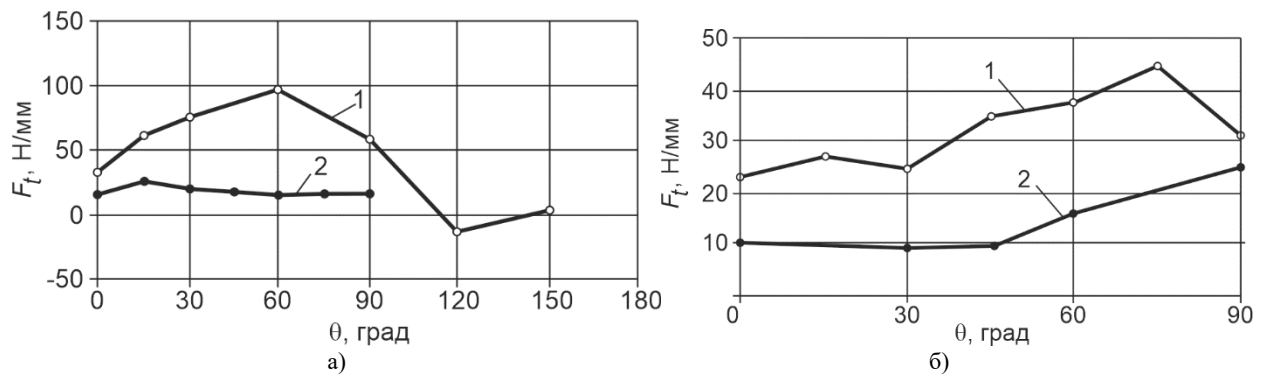


Рис. 1 – Напрямок та величина результуючої сили при ортогональній обробці різних армованих композитів: а) вуглепластик: 1 – [28], 2 – [27]; б) склопластик: 1 – [29], 2 – [30].

При обробці армованих композитів спостерігається високий рівень коливання сил різання. Коливання основної сили або сили різання вищі, ніж коливання осьової сили. Ступінь флуктуації залежить насамперед від орієнтації волокон і значною мірою корелює зі способом утворення стружки, що переважає при різанні волокон з певною орієнтацією. При різанні паралельно волокнам з позитивним переднім кутом флуктуації сили вказують на відшаровування та згинання/руйнування волокон розташованих на передній поверхні. При різанні волокон з позитивним кутом орієнтації, ріжуча сила відображає зміни в процесі зсуву та руйнування волокна і матриці матеріалу зі зміною орієнтації волокон. Осьова сила відображає взаємодію між оброблюваною та задньою поверхнею інструменту. Ступінь флуктуації сили зменшувалась із збільшенням кута орієнтації волокон, а потім збільшувалась при різанні волокон під кутом  $90^\circ$  і вище. Відзначено, що характер флуктуації сили при перерізанні волокон з великими кутами (більше  $90^\circ$ ) помітно відрізняється від такої при перерізанні волокон із малою позитивною орієнтацією ( $0-75^\circ$ ). При різанні волокон з великою позитивною орієнтацією сильні коливання пов'язані з пресуванням, потім зриванням волокон і розтріскуванням матриці.

З іншого боку експериментальні дослідження зношування показали яскраво виражену залежність коефіцієнта тертя від кута орієнтації волокон у композиті та їхнього об'ємного вмісту.

В роботі [31] представлені результати зміни величини коефіцієнта тертя від орієнтації волокон. Загальна орієнтація значень у діапазоні кутів нахилу волокон від  $0$  до  $90^\circ$  має характер, близький до лінійного.

Пропонується прийняти наступний пріоритет впливу різних факторів на величину коефіцієнта тертя: орієнтація волокон, загальний вміст волокон, температура в зоні контакту та швидкість взаємодії. На першому етапі пропонується розрахувати коефіцієнт тертя  $\mu$  із співвідношення

$$\mu = (k_\mu \cdot \theta / \theta_{90} + \mu_0) \cdot K_{vr}, \quad (2)$$

де  $\theta = 0$  – поздовжнє армування,  $\theta_{90} = 90$  – нормальне армування, град, не більше  $90$  в абсолютному значенні);  $k_\mu$  – постійний коефіцієнт, який визначається з експериментів або дослідів;  $K_{vr}$  – коефіцієнт, що враховує вплив величини об'ємного вмісту елементів армування у композиті на коефіцієнт тертя;  $\mu_0$  – прийняте вихідне значення коефіцієнта тертя, для умов поздовжнього армування ( $\theta = 0$ ). Для армування при  $\theta > 90$  співвідношення (2) запишеться у вигляді  $\mu = (k_\mu \cdot (180 - \theta) / \theta_{90} + \mu_0) \cdot K_{vr}$ .

Коефіцієнт, що враховує вплив величини об'ємного вмісту елементів армування у композиті на коефіцієнт тертя, пропонується прийняти у вигляді  $K_{vr} = \mu_{x\%} / \mu_{n\%}$ , де  $\mu_{x\%}, \mu_{n\%}$  – коефіцієнти тертя для композиту з об'ємним вмістом елементів армування  $x\%$  та  $n\%$ , обчислених з використанням закону змішування;  $\mu_{n\%}$  – нормуючий коефіцієнт тертя, при об'ємному вмісті наповнювача для якого є дані залежності коефіцієнта тертя від кута армування  $\theta^\circ$ . Іншими словами, якщо ми маємо дані про залежність коефіцієнта тертя від кута армування для деякого змісту наповнювача, то значення коефіцієнта тертя для цього змісту буде нормуючим.

Із загальних міркувань можна припустити, що на коефіцієнт тертя впливатиме не тільки напрям укладання елементів армування, а й їх об'ємний зміст. Проте будь-які систематичні відомості з цього приводу відсутні, як і достовірні експериментальні дані. Логічно припустити лінійний характер цієї залежності з якісною характеристикою типу, чим більше волокон у контакті, тим сильніше вплив наповнювача. Наприклад, для нормального армування можна припустити, що при  $60\%$  вмісті волокон армування число контактів інструменту буде в два рази більше, ніж при  $30\%$  армуванні. Однак, швидше за все це не так, тому що в процесі взаємодії беруть участь продукти руйнування, і елементи, що армують, зрізуються не на однаковій висоті.

Тому для врахування впливу цього фактору при обчисленні коефіцієнта тертя, що враховує вплив величини об'ємного вмісту елементів армування, було запропоновано використовувати закон змішування у вигляді [32]

$$\mu_{x\%} = (V_r/\mu_r + V_b/\mu_b)^{-1}, \quad (3)$$

де  $V_r, V_b$  – об'ємний вміст наповнювача і сполучного, причому  $V_r + V_b = 1$ ;  $\mu_r, \mu_b$  – коефіцієнти тертя матеріалу елементів армування і сполучного.

**Висновки.** Облік кута орієнтації елементів армування при обробці композиційних матеріалів є необхідною умовою якісної обробки виробів, що за значимістю не поступається вибору геометричних параметрів інструменту. Величина кута армування визначає характер стружкоутворення та інтенсивність зношування по задній поверхні ріжучої частини інструменту. Було встановлено, що найінтенсивніша втрата матеріалу спостерігається при різанні композитів з кутом армування  $30^\circ$  та  $60^\circ$  та з малим початковим заднім кутом. Сила різання збільшується зі збільшенням кута орієнтації до  $90^\circ$  для більшої подачі, але знижується вище  $65^\circ$  для меншої подачі.

Для абразивного зношування вершини інструменту при механічній обробці полімерного композиту пропонується розширений закон спадково-старіючого зношування в контакті, що дозволяє точніше описувати процес зношування вершини інструменту і прогнозувати його працездатність.

Урахування впливу кута армування у формулюванні закону спадково-старіючого зношування відбувається через величину нормальної сили, що діє на задній поверхні вершини різця та коефіцієнта тертя, що залежить від орієнтації волокон, загального їх вмісту волокон, температури в зоні контакту та швидкості взаємодії.

#### Список літератури

1. Sheikh-Ahmad J.Y. Machining of polymer composites / J.Y. Sheikh-Ahmad. – Springer, 2009.– 315 p. <https://citations.springernature.com/book?doi=10.1007/978-0-387-68619-6>
2. Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces / M. Henerichs, R. Voss, F. Kuster, K. Wegener // CIRP J Manuf. Sci. Technol., 2015.– 9. – P. 136–145.
3. The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates / D. Nguyen, M.S.B. Abdullah, R. Khawarizmi etc. // Wear, 2020. – 450. – P. 203–213.
4. Fiber orientation angle effects in machining of unidirectional CFRP laminated composites / V. Madhavan, G. Lipczynski, B. Lane, E. Whintont // Manufactory Process, 2015. – 20. – P.431–442.
5. Davim J.P. Machining composite materials / J.P. Davim.– John Wiley & Sons, Hoboken, 2009. <https://www.wiley.com/en-us/Machining+Composites+Materials-p-9781848211704>.
6. Analytical force model for orthogonal machining of unidirectional carbon fibre reinforced polymers (CFRP) as a function of the fibre orientation / R. Voss, I. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // J Material Process Technology, 2018.– 263.– P.440–469.
7. Sharma M., Rao I.M., Bijwe J. Influence of fiber orientation on abrasive wear of unidirectionally reinforced carbon fiber– polyetherimide composites / M. Sharma, I.M. Rao, J. Bijwe // Tribology Int., 2010.– 43(5).– P.959–964.
8. Wang D.H., Ramulu M., Arola D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate / D.H. Wang, M. Ramulu, D.Arola // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995. – 35.– P.1623–38. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00014-0](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00014-0).
9. Pwu HY, Hocheng H. Chip Formation Model of Cutting Fiber-Reinforced Plastics Perpendicular to Fiber Axis. Journal of Manufacturing Science and Engineering 1998;120:192. <https://doi.org/10.1115/1.2830100>.
10. Zhang L.C., Zhang H.J., Wang X.M. A force prediction model for cutting unidirectional fibre-reinforced plastics / L.C. Zhang, H.J. Zhang, X.M. Wang // Machining Science and Technology, 2001.– 5.– P. 293–305. <https://doi.org/10.1081/MST-100108616>.
11. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009. – 49.– P.1185–1196. <https://doi.org/10.1016/j.jmachtools.2009.08.002>.
12. Effects of fiber orientation direction on tool-wear processes in down-milling of carbon fiber-reinforced plastic laminates / S. Maegawa, Y. Morikawa, S. Hayakawa etc. // International Journal of Automation Technology, 2015.– 9. – P.356–364. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0356>.
13. Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic / M.K. Nor Khairussshima, C.H. Che Hassan, A.G. Jaharah etc. // Wear 2013, – 302. – P.1113–1123. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.043>.
14. Muhamad Khairussaleh N.K., Che Haron C.H., A. Ghani J. Study on wear mechanism of solid carbide cutting tool in milling CFRP / N.K. Muhamad Khairussaleh., C.H. Che Haron, A. Ghani J. // Journal of Materials Research, 2016. –31. – P.1893–1899. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.21>.
15. Inoue T., Hagino M. Cutting Characteristics of CFRP Materials with Carbon Fiber Distribution / T. Inoue, M. Hagino // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P. 285–291. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0285>.
16. Inoue T., Hagino M. Cutting Characteristics of CFRP Materials with Carbon Fiber Distribution / T. Inoue, M. Hagino // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P. 285–291. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0285>.
17. Hagino M., Inoue T. Effect of Carbon Fiber Orientation and Helix Angle on CFRP Cutting Characteristics by End Milling / M. Hagino, T. Inoue // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P.292–299. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0292>.
18. High-quality machining of CFRP with high helix end mill / A. Hosokawa, N. Hirose, T. Ueda, T. Furumoto // CIRP Annals, 2014. – 63. – P.89–92. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.084>.
19. Analytical force model for orthogonal machining of unidirectional carbon fibre reinforced polymers (CFRP) as a function of the fibre orientation / R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // Journal of Materials Processing Technology, 2019. –263. – P.440–469. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.001>.
20. Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP / R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017. –18. – P.75–91. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.10.002>.
21. Tool wear and spring back analysis in orthogonal machining unidirectional CFRP with respect to tool geometry and fibreorientation / L. Seeholzer, F. Kneubühler, F. Grossenbacher, K. Wegener // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021. – 115. – P. 2905–2928. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07222-z>

22. Fiber orientation angle effects in machining of unidirectional cfrp laminated composites / V. Madhavan, G. Lipczynski, B. Lane, E. Whitenon // Proceedings of NAMRI/SME, 2014. – 42. – P.1–13.
23. Geier N. Influence of fibre orientation on cutting force in up and down milling of UD-CFRP composites / N. Geier // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. – 111. – P.881–893. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06163-3>
24. Effects of Fiber Orientation Direction on Tool-Wear Processes in Down-Milling of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Laminates / S. Maegawa, Y. Morikawa, S. Hayakawa etc. // Int. J. of Automation Technology, 2015. –9 (4). – P.356–364. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0356>
25. The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates / D. Nguyen, M. S. B. Abdullah, R. Khawarizmi etc. // Journal Pre-proof, Wear, 2020. – P.1–35. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203213>
26. Хавин Г.Л. Формулировка закона изнашивания инструмента при резании полимерных композитов / Г. Л. Хавин // Інтегровані технології та енергозбереження Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – №.3.– С.36–45.
27. Wang X.M., Zhang L.C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fiber reinforced plastics / X.M. Wang, L.C. Zhang // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003. – 43, – P.1015–1022.
28. Kaneeda T. CFRP cutting mechanism / T. Kaneeda // Tran. of North American Manufacturing Res. Institute of SME, 1991. – 19. – P.216–221.
29. Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of uni-directional glass fiber enforced plastic (UD-GFRP) composites part 1: Effect of geometrical and process parameters / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology, 2005. – 9. – P. 481–501.
30. Takeyama H., Iijima N. Machinability of glass-fiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining / H. Takeyama, N. Iijima // Annals of CIRP, 1988. – 37. – P. 93–96.
31. Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of UD-FRP composites part 2: finite element analysis / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology, 2005.– 9(4). – P. 503-528.
32. Tsukizoe T., Ohmae N. Friction and Wear Performance of Uni-Directionally Oriented Glass, Carbon, Aramid and Stainless Steel Fiber Reinforced Plastics, Friction and Wear of Polymer Composites / T. Tsukizoe, N. Ohmae // Friction and Wear of Polymer Composites, 1986. – P. 205–231.

#### References (transliterated)

1. Sheikh-Ahmad J.Y. Machining of polymer composites / J.Y. Sheikh-Ahmad. – Springer, 2009.– 315 p. <https://citations.springernature.com/book?doi=10.1007/978-0-387-68619-6>
2. Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces / M. Henerichs, R. Voss, F. Kuster, K. Wegener // CIRP J Manuf. Sci. Technol., 2015.– 9. – P. 136–145.
3. The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates / D. Nguyen, M.S.B. Abdullah, R. Khawarizmi etc. // Wear, 2020. – 450. – P. 203–213.
4. Fiber orientation angle effects in machining of unidirectional CFRP laminated composites / V. Madhavan, G. Lipczynski, B. Lane, E. Whitenon // Manufactory Process, 2015. – 20. – P.431–442.
5. Davim J.P. Machining composite materials / J.P. Davim.– John Wiley & Sons, Hoboken, 2009. <https://www.wiley.com/en-us/Machining+Composites+Materials-p-9781848211704>.
6. Analytical force model for orthogonal machining of unidirectional carbon fibre reinforced polymers (CFRP) as a function of the fibre orientation / R. Voss, I. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // J Material Process Technology, 2018.– 263.– P.440–469.
7. Sharma M., Rao I.M., Bijwe J. Influence of fiber orientation on abrasive wear of unidirectionally reinforced carbon fiber– polyetherimide composites / M. Sharma, I.M. Rao, J. Bijwe // Tribology Int., 2010.– 43(5).– P.959–964.
8. Wang D.H., Ramulu M., Arola D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate / D.H. Wang, M. Ramulu, D.Arola // International J. of Machine Tools and Manufacture, 1995. – 35.– P.1623–38. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00014-O](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00014-O).
9. Pwu HY, Hocheng H. Chip Formation Model of Cutting Fiber-Reinforced Plastics Perpendicular to Fiber Axis. Journal of Manufacturing Science and Engineering 1998;120:192. <https://doi.org/10.1115/1.2830100>.
10. Zhang L.C., Zhang H.J., Wang X.M. A force prediction model for cutting unidirectional fibre- reinforced plastics / L.C. Zhang, H.J. Zhang, X.M. Wang // Machining Science and Technology, 2001.– 5.– P. 293–305. <https://doi.org/10.1081/MST-100108616>.
11. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009. – 49.– P.1185–1196. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.08.002>.
12. Effects of fiber orientation direction on tool-wear processes in down-milling of carbon fiber-reinforced plastic laminates / S. Maegawa, Y. Morikawa, S. Hayakawa etc. // International Journal of Automation Technology, 2015.– 9. – P.356–364. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0356>
13. Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic / M.K. Nor Khairussihma, C.H. Che Hassan, A.G. Jaharah etc. // Wear 2013, – 302. – P.1113–1123. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.043>.
14. Muhamad Khairussaleh N.K., Che Haron C.H., A. Ghani J. Study on wear mechanism of solid carbide cutting tool in milling CFRP / N.K. Muhamad Khairussaleh., C.H. Che Haron, A. Ghani J. // Journal of Materials Research, 2016. –31. – P.1893–1899. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.21>.
15. Inoue T., Hagino M. Cutting Characteristics of CFRP Materials with Carbon Fiber Distribution / T. Inoue, M. Hagino // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P. 285–291. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0285>.
16. Inoue T., Hagino M. Cutting Characteristics of CFRP Materials with Carbon Fiber Distribution / T. Inoue, M. Hagino // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P. 285–291. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0285>.
17. Hagino M., Inoue T. Effect of Carbon Fiber Orientation and Helix Angle on CFRP Cutting Characteristics by End Milling / M. Hagino, T. Inoue // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P.292–299. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0292>.
18. High-quality machining of CFRP with high helix end mill / A. Hosokawa, N. Hirose, T. Ueda, T. Furumoto // CIRP Annals, 2014. – 63. – P.89–92. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.084>.
19. Analytical force model for orthogonal machining of unidirectional carbon fibre reinforced polymers (CFRP) as a function of the fibre orientation / R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // Journal of Materials Processing Technology, 2019. –263. – P.440–469. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.001>.
20. Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP / R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017. –18. – P.75–91. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.10.002>.
21. Tool wear and spring back analysis in orthogonal machining unidirectional CFRP with respect to tool geometry and fibreorientation / L. Seeholzer, F. Kneubühler, F. Grossenbacher, K. Wegener // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021. – 115. – P. 2905–2928. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07222-z>
22. Fiber orientation angle effects in machining of unidirectional cfrp laminated composites / V. Madhavan, G. Lipczynski, B. Lane, E. Whitenon // Proceedings of NAMRI/SME, 2014. – 42. – P.1–13.



23. Geier N. Influence of fibre orientation on cutting force in up and down milling of UD-CFRP composites / N. Geier // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. – 111. – P.881–893. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06163-3>
24. Effects of Fiber Orientation Direction on Tool-Wear Processes in Down-Milling of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Laminates / S. Maegawa, Y. Morikawa, S. Hayakawa etc. // Int. J. of Automation Technology, 2015. –9 (4). – P.356–364. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0356>
25. The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates / D. Nguyen, M. S. B. Abdullah, R. Khawarizmi etc. // Journal Pre-proof, Wear, 2020. – P.1–35. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203213>
26. Khavin G.L. Formulirovka zakona iznashivaniya instrumenta pri rezanii polimernyh kompozitov / G. L. Khavin // Integrovani tekhnologii ta energoberezhennya Harkiv: NTU «HPI», 2021. – №.3.– S.36–45.
27. Wang X.M., Zhang L.C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fiber reinforced plastics / X.M. Wang, L.C. Zhang // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003. – 43, – P.1015–1022.
28. Kaneeda T. CFRP cutting mechanism / T. Kaneeda // Tran. of North American Manufacturing Res. Institute of SME, 1991. – 19. – P. 216–221.
29. Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of uni-directional glass fiber enforced plastic (UD-GFRP) composites part 1: Effect of geometrical and process parameters / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology, 2005. – 9. – P. 481–501.
30. Takeyama H., Iijima N. Machinability of glass-fiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining / H. Takeyama, N. Iijima // Annals of CIRP, 1988. – 37. – P. 93–96.
31. Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of UD-FRP composites part 2: finite element analysis / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology, 2005.– 9(4). – P. 503-528.
32. Tsukizoe T., Ohmae N. Friction and Wear Performance of Uni-Directionally Oriented Glass, Carbon, Aramid and Stainless Steel Fiber Reinforced Plastics, Friction and Wear of Polymer Composites /T. Tsukizoe, N. Ohmae // Friction and Wear of Polymer Composites, 1986. – P. 205–231.

*Поступила (received) 24.04.2022*

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Хавін Геннадій Львович (Khavin Gennadii Lvovich)** – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Національного технічного університету «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-050-927-52-79; e-mail: [gennadii.khavin@gmail.com](mailto:gennadii.khavin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4340-7615>

**Хоу Чзівень (Hou Zhiwen)** – аспірант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати", Національного технічного університету «ХПІ», м.Харків; тел.: +38-066-195-92-89; e-mail: [houbao13488533213@qq.com](mailto:houbao13488533213@qq.com), <https://orcid.org/0000-0002-1765-6028>

*МАЙБОРОДА В.С., ДЖУЛІЙ Д.Ю., СЛОБОДЯНЮК І.В., БЕСАРАБЕЦЬ Ю.Й.*

### **ОСОБЛИВОСТІ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ІНСТРУМЕНТА З ЗАХИСНИМИ ФАСКАМИ НА РІЗАЛЬНИХ КРОМКАХ**

Для забезпечення надійності і працездатності різального інструменту, особливо твердосплавного, перспективним є формування раціональної мікрогеометрії робочих поверхонь, особливо форми і геометрії різальних кромки, а також їх зміцнення. Для цього необхідно виконувати додаткове оброблення інструменту після операції його заточування. Метод магнітно-абразивного оброблення в умовах великих робочих зазорів при раціональному співвідношенні ударної та фрикційної взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними елементами дозволяє формувати мікрогеометрію і зміцнювати як різальні кромки, так і робочі поверхні. Для забезпечення ефективного оброблення необхідно встановити закономірності формування мікрогеометрії різальних кромки з попередньо виконаними захисними фасками. У роботі наведені результати комплексного дослідження процесу магнітно-абразивного оброблення твердосплавних непереточуваних пластин з виконаними під різними кутами захисними фасками на різальних кромках. Показано, що процес округлення кромки лінійно пов'язаний з тривалістю магнітно-абразивного оброблення. Причому, швидкість збільшення розмірів радіусів округлення різальних кромки з захисними фасками лінійно зростає зі збільшенням кута нахилу фаски при інших рівних умовах процесу. Запропоновано фізичний опис механізму зміцнення поверхневого шару робочих елементів твердосплавного різального інструменту. Показано, що процес зміцнення пов'язаний з раціональним накладенням сил, що виникають в результаті фрикційної та ударної взаємодії частинок і формувань магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними поверхнями. Встановлено, що характер зміни поверхневої твердості, отриманої після магнітно-абразивного оброблення на захисних фасках, має хвиляподібну форму в залежності від часу процесу. Найбільший ріст поверхневої твердості має місце на фасках, виконаних під кутами 10° та 20° і пояснюється величиною співвідношення між силами нормального і тангенціального походження, що виникають при контакті магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними поверхнями.

**Ключові слова:** різальна кромка, фаска, твердосплавний різальний інструмент, твердість, мікрогеометрія, магнітно-абразивне оброблення.

**MAIBORODA V.S., DZHULII D.YU., SLOBODIANIUK I.V., BESARABETS YU.JO.**

### **SPECIFIC FEATURES OF MAGNETO-ABRASIVE MACHINING OF CARBIDE TOOLS WITH PROTECTIVE CHAMFERS ON THE CUTTING EDGES**

To ensure the durability and working ability of cutting tools, especially carbide, it is promising to form a rational microgeometry of working surfaces, in particular, the shape and geometry of cutting edges, as well as their hardening. For this, it is necessary to carry out additional machining of the tool after its sharpening operation. The magneto-abrasive machining method in conditions of large working gaps with a rational ratio of the impact and frictional interaction of the magneto-abrasive tool with the machined elements makes it possible to form microgeometry and strengthen both the cutting edges and the working surfaces. To ensure effective machining, it is necessary to determine the regularities of forming the microgeometry of the cutting edges with pre-made protective chamfers. The paper presents the results of a complex study of the magneto-abrasive machining process of carbide not sharpened inserts with protective chamfers on the cutting edges made at different angles. It was shown that the process of edge rounding is linearly related to the duration of magneto-abrasive machining. Moreover, the rate of increase in the size of the radius of cutting edges rounding with protective chamfers increases linearly with an increase in the angle of inclination of the chamfers, all other process conditions being equal. The physical description of the hardening mechanism of the surface layer of the working elements of the carbide cutting tool was proposed. It was shown that the hardening process is associated with the rational imposition of forces arising as a result of the frictional and impact interaction of the particles and the formations of the magneto-abrasive tool with the machined surfaces. It was found that the nature of the change in surface hardness obtained after magneto-abrasive machining on the protective chamfers has the wavy shape depending on the time of the process. The greatest increase in surface hardness takes place on chamfers made at angles of 10° and 20° and is explained by the value of the ratio between the forces of normal and tangential origin arising from the contact of the magneto-abrasive tool with the machined surfaces.

**Keywords:** cutting edge, chamfer, carbide cutting tool, hardness, microgeometry, magneto-abrasive machining.

**Вступ.** Ефективність лезової обробки металів різанням багато в чому визначається якістю різального інструменту. Ця проблема актуальна під час виготовлення відповідальних деталей у серійному виробництві. Коли небажаним є заміна різального інструменту в процесі виконання однієї технологічної операції, що може призвести до зміни умов різання, і як наслідок – реальних розмірів деталей, що обробляються. Тому важливою умовою є використання різального інструменту з підвищеною працездатністю, високою міцністю та надійністю. Забезпечення зазначених параметрів вирішують, зазвичай, комплексно з урахуванням режимів обробки, матеріалу різального інструменту, наявності на ньому покриттів, специфічної геометрії тощо.

Одним з перспективних напрямків при забезпеченні надійності і роботоздатності різального інструменту є цілеспрямоване формування раціональної мікрогеометрії робочих поверхонь, у тому числі форми та геометрії його різальних кромки з одночасним їх зміцненням. Особливо це актуально для твердосплавного різального інструменту, який експлуатують в умовах переривчастого, високошвидкісного різання матеріалів з підвищеною в'язкістю, твердістю, адгезійною активністю.

© В. С. Майборода, Д. Ю. Джулий, І. В. Слободянюк, С. Ю. Бесарабець 2022

При цьому особливу увагу для такого інструменту приділяють стану різальних кромок, на які діють підвищені сили, вібраційні та температурні навантаження. Дефекти кромки, що виникають при заточуванні у вигляді мікросколів, недостатній шорсткості, як самої кромки, так і її передньої і задньої поверхонь інструменту, що безпосередньо формують саму кромку, сприяють зниженню її крихкої міцності і є джерелами зародження мікротріщин термомеханічної втоми. Тому після операції заточування твердосплавного інструменту рекомендують виконувати додаткову обробку кромки. Як правило її виконують струменево або віброабразивним методами, абразивними щітками, використовуючи метод тягового шліфування.

**Аналіз стану питання.** Останнім часом активно вивчається і застосовується на практиці інструмент з певною формою різальних кромки, із заданою величиною  $k$ -фактора [1], сформованими на різальних кромках однієї або більше мікрофасок [2]. Встановлено, що формування на кромках фасок або заданої, певним чином округленої форми сприяє не тільки підвищенню їхньої крихкої міцності [3], а й позитивно впливає як на процес різання, так і стружкоутворення. Важливим фактором при фінішній обробці кромки є як їх полірування, так і формування зміцненого поверхневого шару з стискаючими залишковими напруженнями в ньому, градієнтною зміною твердості. Такий комплексний підхід до фінішної обробки інструменту забезпечує суттєве підвищення його надійності під час експлуатації в екстремальних умовах.

Одним з перспективних методів обробки з комплексним забезпеченням зазначених вище параметрів є метод магнітно-абразивної обробки (МАО) в умовах великих робочих зазорів [4]. Виконані дослідження у цьому напрямі показали як перспективність використання цього методу на фінішних етапах обробки інструменту, так й суттєві резерви у напрямі його вдосконалення. Отримані позитивні результати як з точки зору формування мікрогеометрії робочих елементів різального інструменту, так і зміцнення поверхневого шару не дозволяють дати чіткого уявлення про механізм процесу обробки безпосередньо різальних кромки і розкрити процеси, що відбуваються як при формуванні кромки, так і їх зміцненні. У роботах [4, 5] показано, що процес МАО у великих робочих зазорах відбувається в результаті ударно-фрикційної взаємодії елементів магнітно-абразивного інструменту (МАІ) у вигляді квазістабільних мікрооб'єктів, сформованих магнітним полем з поверхнею, що обробляється. Встановлено специфічні особливості їх руху та переформування, що дозволило визначити способи формування стабільного МАІ протягом усього циклу МАО [6, 7].

Аналіз стану поверхневого шару деталей, підданих МАО показав наявність стійких процесів, що забезпечують підвищення твердості поверхневого шару, формування в ньому стискаючих залишкових напружень [4, 5, 8]. При аналізі зміни поверхневої твердості обробленого методом МАО твердосплавного інструменту встановлено наявність певної періодичності у її зміні залежно від часу обробки та технологічних режимів. Слід зазначити, що наявна інформація про причини зміцнення поверхневого шару деталей в результаті МАО не дозволяє чітко розділити процеси, що сприяють зміні фізико-механічних характеристик поверхневого шару деталей, що обробляються. Враховуючи той факт, що процес МАО відбувається в умовах ударно-фрикційного контакту МАІ з поверхнею, що обробляється, цілком логічним поясненням є мікропластична деформація поверхневого шару, що накопичується в результаті великої кількості окремих мікроударів елементів МАІ о поверхню деталі. Найбільш імовірно подібний процес має місце при обробці в умовах великих робочих зазорів і малих магнітних полів, коли динамічна складова, що визначається швидкістю МАО, переважає над магнітною, що визначає умови створення МАІ підвищеної жорсткості. Однак не можна не враховувати і специфіку фрикційного контакту в парі МАІ – поверхня деталі, яка також є потужним фактором, здатним змінювати фізико-механічні властивості поверхневого шару та як наслідок забезпечувати його зміцнення.

Аналіз виконаних досліджень та наявної науково-технічної інформації показує, що для отримання найкращих результатів зміцнення поверхневого шару з одночасним формуванням мікрогеометрії поверхні з низькою шорсткістю, «розгладженим» мікропрофілем необхідно чітко керувати як процесами фрикційного контакту, так і контролювати ударну взаємодію. Саме при раціональному накладенні енергій від ударної та фрикційної взаємодії можливе забезпечення необхідних параметрів якості поверхні оброблюваної деталі та її поверхневого шару.

Раніше було показано, що максимальна ефективність процесу МАО в умовах великих робочих зазорів при обробці деталей складної форми досягається при виконанні трьох взаємопов'язаних умов [9]. При більш детальному підході до забезпечення якості оброблюваних поверхонь необхідно не тільки забезпечити досягнення відповідних значень нормальної –  $V_n$  та тангенціальної –  $V_t$  складових швидкості відносного переміщення частинок МАІ та поверхні деталі, а й раціонально керувати зазначеними параметрами в залежності від завдань, що ставляться. Для

цього необхідно ідентифікувати внесок в ефективність обробки і показників якості кожної зі складових  $V_n$  і  $V_t$  і мати інформацію про співвідношення зазначених факторів. У роботах [4, 6, 10] вперше були виконані спроби розрахунковим шляхом оцінити інтенсивність процесу MAO окремо, за енергетичними параметрами –  $IV_n$  та  $IV_t$ , що визначаються через миттєві значення  $V_n$  та  $V_t$  у кожній точці оброблюваної поверхні з урахуванням кінематики процесу обробки. Окремі результати розрахунків досить точно були підтверджені експериментальними даними. Подібний збіг був при використанні рівновісних порошків. У разі використання нерівновісних порошкових магнітно-абразивних матеріалів для деяких випадків проявляється невідповідність. Це можна пояснити тим фактом, що не враховувалися умови безпосереднього контакту магнітно-абразивних частинок і квазістабільних формувань з них з поверхнею, що обробляється в процесі MAO. Однією з особливостей процесу MAO, при аналізі фрикційних процесів, оцінюваних значеннями  $IV_t$  є той факт, що MAI – це рухомо-скоординоване магнітним полем середовище і процес безпосереднього мікрорізання здійснюється окремими зернами MAI при негативних передніх кутах різання, що сприяє створенню додаткового тиску на поверхню, що обробляється [11, 12, 13]. Причому, чим вище швидкість MAO, тим більше будуть повернені зерна MAI, які контактують з поверхнею, тим вище буде тиск, що виникає від магнітних сил і відповідно від більших негативних передніх кутів. В [4] представлені результати зміни параметра Ra і поверхневої твердості на циліндричних зразках із сталі P6M5, оброблених методом MAO в умовах великих робочих зазорів при ідентичних умовах, але магнітно-абразивними порошками різних типів, з різним ступенем нерівності частинок [4, 5, 7]. Аналіз зазначених даних є підтвердженням цього факту.

Відома науково-технічна інформація та отримані експериментальні дані досить актуальні для подальшого цілеспрямованого вирішення проблеми формування мікрогеометрії з одночасним комплексним забезпеченням зміцнення безпосередньо різальних кромки інструменту.

**Метою роботи** є встановлення закономірностей, що мають місце при формуванні форми та радіусів округлення різальних кромки твердосплавного інструменту з попередньо сформованими під різними кутами захисними фасками для забезпечення заданої величини радіуса округлення та відповідної поверхневої твердості при MAO в умовах великих магнітних зазорів.

**Матеріали, обладнання та умови проведення досліджень.** Експериментальні дослідження було проведено на твердосплавних пластинках типу SNMA 1204, виготовлених із сплаву T15K6. На пластинках, на усіх робочих гранях перед MAO були виконані захисні фаски під кутами  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  і  $40^\circ$  до площини пластин (її передньої поверхні). Ширина фаски варіювалася в діапазоні 0,2-0,8 мм. На сформованих фасках контролювали поверхневу твердість та величину радіуса округлення отриманих різальних кромки, сформованих площиною фаски та задньою поверхнею. Поверхневу твердість вимірювали не менше ніж у 5 перерізах по довжині кожної грані з кроком 0,05 мм за шириною фаски. Радіус округлення вимірювали методом оцупування щонайменше ніж у 10 перерізах по довжині кожної грані. Отримані результати статистично оброблялися.

Процес MAO виконували за умов формування стабільного MAI [7], за режимами, рекомендованими у [6, 14]. В якості магнітно-абразивного матеріалу використовували порошок ДЧК з розміром частинок 400/315 мкм з додаванням алмазної пасти АСМ 28/20 мкм. Швидкість обертання деталей навколо осі кільцевої ванни становила 2,8 м/с, а частота обертання навколо осі пластини – 500 об/хв. В процесі обробки пластини базувалися в робочій зоні під кутом  $\varphi = 28 - 30^\circ$  - кутом нахилу пластини по відношенню до площини до кільцевої ванни. Обробці піддавали дві групи пластин з однієї партії. Відмінність між пластинами в кожній групі полягала в тому, що в одній групі радіус округлення різальних кромки коливався в діапазоні 28,6 - 29 мкм, а в іншій - в діапазоні 23 - 24,6 мкм. Обробка кожної групи пластин виконувалась поетапно. Для першої групи тривалість кожного етапу MAO становила 1 хв, тоді як у другій – 5 хв. Після кожного етапу контролювали зміни радіуса округлення різальних кромки та величини поверхневої твердості на захисних фасках в безпосередній близькості до кромки.

**Результати досліджень.** Встановлено, що процес округлення ріжучих кромки методом MAO в умовах, описаних вище в залежності від часу обробки, має лінійний характер і описується рівнянням:

$$r = r_0 + V_r t$$

де  $r_0$  - вихідна величина радіуса заокруглення різальної кромки до MAO, мкм;

$t$  – час обробки, хв;

$V_r$  – швидкість зміни величини радіуса заокруглення різальної кромки, мкм/хв.

Різниця в експериментальних залежностях, отриманих після вимірювання на чотирьох гранях, пов'язана лише з кутом нахилу захисних фасок (кутом –  $\lambda$ ). Діапазон зміни величини  $V_r$  на пластинах з фасками, виконаними під різними кутами по відношенню до поверхні пластин, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Швидкість зміни величини радіуса заокруглення різальної кромки

Кут нахилу фаски, град.	Діапазон зміни величини $V_r$ , мкм/хв
10	1,7 – 1,77
20	1,72 – 1,9
30	2,07 – 2,15
40	2,4 – 2,41

Зростання швидкості округлення різальних кромки, зі збільшенням кута нахилу виконаних на них захисних фасок, можливо пояснити виходячи з особливостей контактної взаємодії елементів МАІ з поверхнями, що обробляються, умовами формування і руйнування віялоподібних ущільнень, що утворюються на різальних кромках в процесі їх руху в МАІ і величинами  $iV_t$ , які зі збільшенням кута нахилу фаски зростають, що свідчить про зростання сил фрикційного походження. Отримані результати підтверджують результати досліджень округлення різальних кромки швидкорізальних свердел, твердосплавних фрез і твердосплавних непереточуваних пластинок [4].

Аналіз зміни поверхневої твердості, отриманої після MAO на захисних фасках, показав, що як і в роботі [6] на початковій стадії обробки проявляється хвилеподібний процес зміни поверхневої твердості. Важливо, що найбільше зростання поверхневої твердості проявляється на фасках, виконаних під кутами  $10^\circ$  і  $20^\circ$  (Рис. 1). Встановлено, що перший пік на залежності зміни твердості від часу MAO проявляється через 1 хвилину обробки, другий пік з найбільшою амплітудою розташовується через 3 хв. При більшому часі обробки – понад 5 хвилин, поверхнева твердість дещо знижується, однак у середньому перевищує вихідну на 15–25%.

Подібна зміна фізико-механічних характеристик матеріалу пластин, особливо його поверхневого шару, може бути пов'язана з процесами структурної та дефектної перебудови матеріалу, аналогічно процесам, що відбуваються в процесі припрацювання інструменту [15], пов'язаних з формуванням у поверхневому шарі стійких дислокаційних структур, що формуються при фрикційно-ударній взаємодії з МАІ, що представляють багат шарову композицію з накопичених малорухливих дислокацій, розташованих на деякій глибині від поверхні. Формування подібної структури, мабуть, відбувається при раціональному накладенні сил, що забезпечують формування в поверхневому шарі нормальних напружень, що пов'язані з ударною взаємодією МАІ та поверхні. При цьому відбувається зростання щільності переважно крайових, слабо рухливих дислокацій. Дислокаційні відрізки сидячих крайових дислокацій під впливом тангенціальних сил фрикційного походження ініціюють розмноження рухомих гвинтових дислокацій [15, 16]. Саме на початкових етапах MAO відбувається енергетична перебудова поверхневого шару деталей із формуванням стабільної структури.

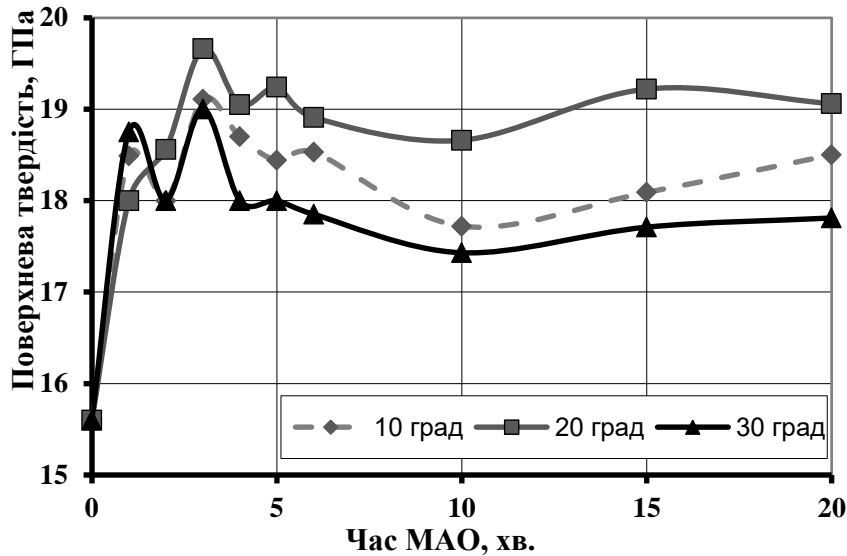


Рис. 1 - Зміна поверхневої твердості на захисних фасках твердосплавних пластин, що не переточуються.

Різні значення поверхневої твердості, отримані на захисних фасках, розташованих під різними кутами до головного вектора руху пластин у робочій зоні і є, певною мірою, відображенням зміни ступеня наклепу матеріалу, залежать від співвідношення нормальних і тангенціальних сил, що діють у зоні контакту МАІ - поверхня деталі, і визначаються різними величинами інтегральних інтенсивностей  $V_n$  і  $V_t$ .

Виконаний чисельний розрахунок значень  $V_n$  та  $V_t$  для зазначених вище умов процесу MAO та різних ділянок різальних кромки пластин показав, що найбільш раціональним буде співвідношення  $V_t/V_n$ , що знаходиться в діапазоні 1,75 – 1,85. Зазначимо, що отримані результати не суперечать даним, наведеним у [4, 6].

Для підтвердження наведеного припущення аналізували характер зміни твердості по глибині матеріалу, оскільки зміна твердості поверхневого шару є певною мірою відображенням зміни дефектної структури матеріалу. Зміни твердості поверхневого шару області сформованих фасок були отримані на косих шліфах, виконаних під кутом  $1^\circ$  до площини кожної з фасок (Рис. 2).

Показано, що на фасках з кутом нахилу до передньої поверхні  $10^\circ$  і  $20^\circ$  після MAO має місце різке збільшення поверхневої твердості на глибині до 0,1 – 0,2 мм. При цьому встановлено наявність підшарового максимуму за твердістю для глибини шару 0,025 – 0,03 мм. Величина твердості у цій галузі перевищує твердість серцевини на 28 – 35 % і сягає 20 – 21 ДПа. Подібна зміна твердості у зазначеному поверхневому шарі пов'язана як з фрикційним, так і ударним його зміцненням у процесі MAO, що забезпечується його дислокаційною перебудовою, пов'язаною з підвищенням щільності дислокацій, зміною його напруженого стану – формування в поверхневому шарі залишкових стискаючих напруг [4, 5].

Слід зазначити, що найбільше зростання твердості поверхневого шару уражає пластин з фасками, розташованими під кутом  $20^\circ$ . На цих поверхнях реалізуються найбільш раціональне співвідношення  $V_n/V_t$ .

**Висновки.** Виконані комплексні дослідження процесу магнітно-абразивної обробки твердосплавних пластин, що не переточуються, із захисними фасками на ріжучих кромках дозволили встановити основні закономірності при формуванні радіусів округлення ріжучих кромки. Показано, що округлення кромки лінійно пов'язаний з часом MAO. Причому швидкість збільшення радіусів округлення ріжучих кромки із захисними фасками збільшується з кутом нахилу фасок - при інших рівних умовах процесу. Запропоновано опис механізму зміцнення поверхневого шару ріжучих кромки. Показано, що процес зміцнення пов'язаний з раціональним накладенням сил, що виникають в результаті фрикційної та ударної взаємодії частинок та формувань МАІ з поверхнями, що оброблюються, причому превалюючий вплив надають процеси, що реалізуються при фрикційному контакті.

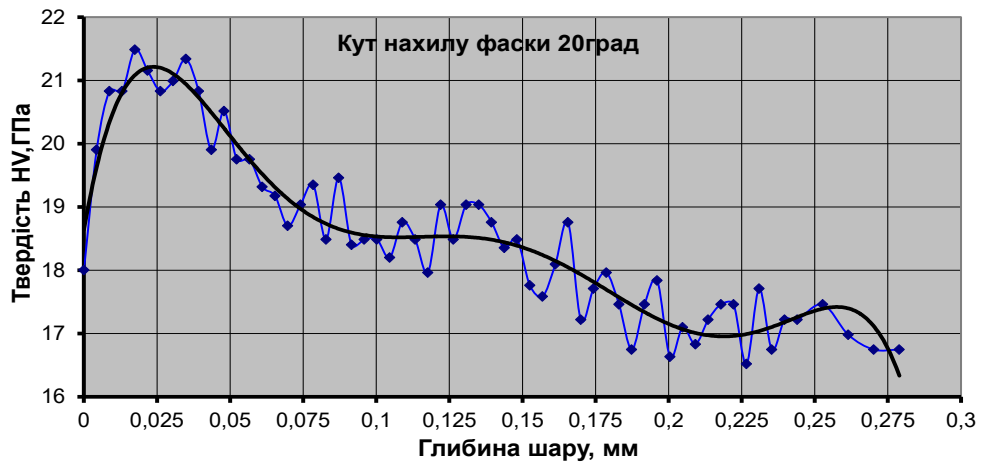
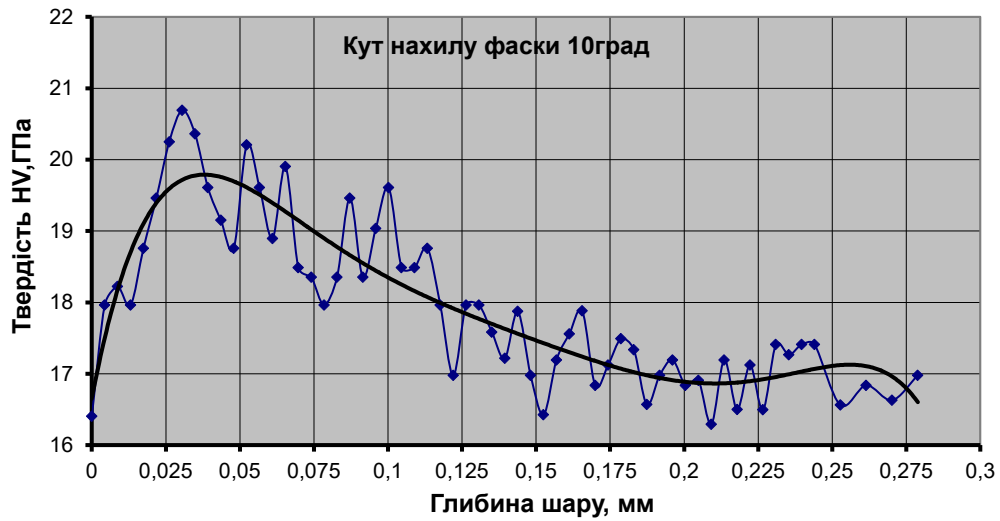


Рис. 2 - Зміна твердості поверхневого шару на захисних фасках в залежності від глибини

## Список литературы

1. Tikal F., Bienemann R., Heckmann L. Schneidkantenpräparation Ziele, Verfahren und Messmethoden. Berichte aus Industrie und Forschung. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2009. 193 p.
2. Denkena B., Köhler J., Ventura C. Strategien für die Herstellung von Schneidkantenmikrogeometrien durch Querseiten-Planschleifen // *Forum, Schneidwerkzeug-und Schleiftechnik*. 2012. Vol. 25(3), pp. 92 – 97.
3. Родичев Ю. М., Сорока Е. Б., Майборода В. С., Джулий Д. Ю., Хворостяный В. В. Влияние модификации поверхности твердосплавного инструмента на сопротивление разрушению режущей кромки при локальном нагружении. *Проблемы динамики і міцності в турбомашинобудуванні. Тези доповідей п'ятої міжнародної науково-технічної конференції. (27 – 30 травня 2014 р., Київ)*. Київ: Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка, 2014. С. 205 – 206.
4. Майборода В. С., Слободянюк И. В., Джулий Д. Ю. *Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы*. Житомир: ПП «Рута», 2017. 272 с.
5. Майборода В. С. *Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01*. Київ, 2001. 404 с.
6. Джулий Д. Ю. Підвищення якості багатограничних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Київ, 2014. 175 с.
7. Ткачук І. В. *Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01*. Київ, 2015. 164 с.
8. Byelyayev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung: Phd-Thesis, Otto von Guericke. Magdeburg, Germany, 2008. 150 p.
9. Майборода В. С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту, сформованого із сумішей порошків. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць*. Житомир: ЖДТУ, 2009. Вип. 6. С. 144 – 159.
10. Джулий Д. Ю., Майборода В. С. Аналіз умов магнітно-абразивного оброблення багатограничних непереточуваних твердосплавних пластин при їх доволному розташуванні в робочих зонах установки типу кільцева ванна. *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Нові технології в машинобудуванні*. Кременчук, 2008. Вип. 1/2008 (48). Частина 2. С. 27 – 31.
11. Олиker В. Е. *Порошки для магнітно-абразивной обработки и износостойких покрытий*. Москва: Металлургия, 1990. 176 с.
12. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Ленинград: Машиностроение, 1986. 176 с.
13. Клименко С. А., Копейкина М. Ю., Лавриненко В. И. и др. *Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / под общ. ред. Чижик С. А. и Хейфец М. Л.* Минск: Беларуская навука, 2017. 376 с.
14. Уляненко Н. В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Київ, 2006. 160 с.
15. Якубов Ф. Я. *Структурно-енергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента*. Симферополь: Крымское учебно-педагогическое государственное издательство, 2005. 300 с.
16. Старков В. К. *Физика и оптимизация резания металлов*. Москва: Машиностроение, 2009. 640 с.

## References (transliterated)

1. Tikal F., Bienemann R., Heckmann L. Schneidkantenpräparation Ziele, Verfahren und Messmethoden. Berichte aus Industrie und Forschung. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2009. 193 p.
2. Denkena B., Köhler J., Ventura C. Strategien für die Herstellung von Schneidkantenmikrogeometrien durch Querseiten-Planschleifen. *Forum, Schneidwerkzeug-und Schleiftechnik*. 2012. Vol. 25(3), pp. 92– 97.
3. Rodichev Yu. M., Soroka E. B., Maiboroda V. S., Dzhulii D. Yu., Khvorostyaniy V. V. [The influence of surface modification of carbide tools on the resistance to destruction of the cutting edge under local loading] *Vliyaniye modifikatsii poverkhnosti tverdosplavnogo instrumenta na soprotivleniye razrusheniyu rezhushchey kromki pri lokalnom nagruzhenii. Proceedings of the fifth international conference problems of dynamics and strength in turbomachinery (27 – 30 travnya, 2014, Kyiv)* [G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Ac. Sci. of Ukraine (May 27–30, 2014, Kyiv)], Kyiv, Publ., 2014, pp. 205 – 206.
4. Maiboroda V. S., Slobodianuk I. V., Dzhulii D. Yu. *Maginitno-abrazivnaya obrabotka detaley slozhnoy formy* [Magneto-abrasive machining of parts with complex shape]. Zhytomyr, PP "Ruta" Publ., 2017. 272 p.
5. Maiboroda V. S. *Osnovy stvorenniya i vykorystannya poroshkovoho mahnitno-abrazivnogo instrumentu dlya finishnoyi obrobky fasonnykh poverkhon'*: dis. ... d-ra. tekhn. nauk: 05.03.01 [Basics of creating and using powder magnetic abrasive tool for finishing shaped surfaces. Dr. eng. sci. diss.]. Kyiv, 2001. 404 p.
6. Dzhulii D. Yu. *Pidvyschennya yakosti bahatohrannykh neperetochuvanykh tverdosplavnykh plastyn pry mahnitno-abrazivnomu obrobrenni v kil'tseviy vanni*: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01. [Increasing quality of multisided not sharpened hard-alloy plates by using magneto-abrasive machining in ring-type working area. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kyiv, 2014. 175 p.
7. Tkachuk I. V. *Formuvannya mahnitno-abrazivnogo instrumentu zi stabil'nymy vlastyvostyamy v robochykh zazorakh kil'tsevoho typu*: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01. [Formation of magneto-abrasive tool with stable properties in the ring-type working gaps. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kyiv, 2015. 164 p.
8. Byelyayev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung: Phd-Thesis, Otto von Guericke. Magdeburg, Germany, 2008. 150 p.
9. Maiboroda V. S. *Doslidzhennya vlastyvostey mahnitno-abrazivnogo instrumentu, sformovanoho iz sumishey poroshkiv* [Studying the properties of magneto-abrasive tool formed from mixtures of powders]. *Protsesty mekhanichnoyi obrobky v mashynobuduvanni. Zbirnyk nauk. prats'* [The processes of mechanical processing in mechanical engineering. Collection of sciences. works]. Zhytomyr, ZSTU Publ., 2009, issue 6, pp. 144 – 159.
10. Dzhulii D. Yu., Maiboroda V. S. *Analiz umov mahnitno-abrazivnogo obrobrennya bahatohrannykh neperetochuvanykh tverdosplavnykh plastyn pry yikh dovoinomu roztašuvanni v robochykh zonakh ustanovky typu kiltseva vanna* [Analysis of conditions of magnetic-abrasive machining of multisided not sharpened hard-alloy plates at their arbitrary location in the working areas of the installation type ring bath]. *Visnyk KDPU imeni Mykhayla Ostrohradskoho. Novi tekhnolohiyi v mashynobuduvanni* [Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. New technologies in mechanical engineering]. Kremenichuk: KRNU Publ., 2008, issue 1/2008 (48) Part 2, pp. 27 – 31.
11. Olikер V. E. *Poroshki dlya mahnitno-abrazivnoy obrabotki i iznosostoykikh pokrytyi* [Powders for magnetic-abrasive machining and wear-resistant coatings]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 176 p.
12. Baron Yu. M. *Maginitno-abrazivnaya i mahnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchikh instrumentov* [Magnetic-abrasive and magnetic machining of products and cutting tools]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1986. 176 p.
13. Klimenko S. A., Kopeikina M. Yu., Lavrynenko V. I. et al. *Finishnaya obrabotka poverkhnostey pri proizvodstve detaley* [Finishing surfaces in the production of parts]. Minsk, Bielaruskaja navuka Publ., 2017. 376 p.
14. Ulyanenko N. V. *Pidvyschennya pratsездatnosti tverdosplavnogo instrumentu shlyakhom zastosuvannya mahnitno-abrazivnogo obrobrennya ta nanesennya znosostoykikh pokrytyi*: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01. [Improvement of working capacity of a carbide tool by application of magneto-abrasive machining and application of wear-resistant coatings. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kyiv, 2006. 160 p.
15. Yakubov F. YA. *Strukturno-energeticheskiye aspekty uprochneniya i povysheniya stoykosti rezhushchego instrumenta* [Structural and energetic aspects of hardening and increasing the durability of the cutting tool]. Simferopol, Krymskoye uchebno-pedagogicheskoye gosudarstvennoye izdatelstvo Publ., 2005. 300 p.
16. Starkov V. K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya metallov* [Physics and optimization of metal cutting]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 2009. 640 p.



*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Майборода Віктор Станіславович (Maiboroda Viktor Stanislavovych)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>; e-mail: [maiborodavs@gmail.com](mailto:maiborodavs@gmail.com).

**Слободянюк Іванна Валентинівна (Slobodianiuk Ivanna Valentynivna)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-0226-2691>; e-mail: [ivannavalentinovna@gmail.com](mailto:ivannavalentinovna@gmail.com).

**Джзлій Дмитро Юрійович (Dzhulii Dmytro Yuriyovych)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; <https://orcid.org/>: <https://https://https://orcid.org/.org/.org/0000-0002-8863-626X>; e-mail: [dmytro.dzhulii@gmail.com](mailto:dmytro.dzhulii@gmail.com).

**Бесарабець Юрій Йосипович (Besarabets Yuriy Josipovych)** – доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-0773-099X>; e-mail: [york\\_bessar@ukr.net](mailto:york_bessar@ukr.net).

**ОХРИМЕНКО О.А., КЛОЧКО О.О., НАБОКА О.В., СТРЕЛЕЦЬ О.С., ГОРБУЛИК В.І.**

## **РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ВЕРСТАТІВ ДЛЯ НАРІЗАННЯ КОНІЧНИХ КОЛІС З КРУГОВИМ ЗУБОМ ЗІ ЗБІЛЬШЕНОЮ ЗОВНІШНЬОЮ КОНУСНОЮ ВІДСТАННЮ**

У статті розглянуто, розширення технологічних можливостей верстатів мод. 528С для нарізування конічних коліс з круговим зубом зі збільшеною зовнішньою конусною відстанню коліс з кутом зхрещування 300. Проаналізовано оптимізуючі програми для визначення геометричних параметрів з отриманням локалізації зони контакту по висоті, для форми зуба Ш, навіть на верстаті без нахилу інструменту з нахилом інструментального шпинделя, широко застосовувати подвійний -двосторонній метод нарізання для великого діапазону конічних і гіпоїдних передач, і не тільки для передач малого модуля, але і для коліс середніх модулів, що раніше вважалося неможливим без використання спеціальних верстатів з гвинтовим рухом. Аналітично визначено параметри налаштування верстата зі збільшеною зовнішньою конусною відстанню на верстаті з недостатніми для цього зсувами налагодження. В результаті встановлено, що при певних осьових зсувах бабки виробу можна розмістити заготовку колеса зі збільшеним розміром зовнішньої конусної відстані. При цьому обробка проводиться зменшеним плоским колом, що виробляє. Часткове зміщення бічної поверхні зубів колеса компенсується оптимізацією налагоджувальних параметрів при обробці парної шестірні, при цьому розраховані зміщення, з-за можливого перетину колеса з базовими деталями, можуть коригуватися у більшу сторону. Нові величини зсувів знову вводяться у програму оптимізації як вихідні.

**Ключові слова:** конічні колеса, круговий зуб, розширення технологічних можливостей, збільшена зовнішня конусна відстань, кут зхрещування, оптимізуючі програми, параметри налаштування верстата.

**OKHRIMENKO O. A., KLOCHKO O.O., NABOKA O.V... STRILETS O.S., GORBULIK V.I.**

## **EXPANDING THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF MACHINES FOR CUTTING BEVERED WHEELS WITH CIRCULAR TOOTH WITH INCREASED OUTER TONE DISTANCE**

Considered in the article. expansion of technological capabilities of machine tools mod. 528C for cutting bevel gears with a circular tooth with an increased outer taper distance of the gears with a crossing angle of 300. Optimizing programs are analyzed to determine the geometric parameters with obtaining the localization of the contact zone in height, for the tooth shape Ш, even on a machine tool without tilting the tool, and in the presence of a machine with the inclination of the tool spindle, widely apply the double-double-sided cutting method for a wide range of bevel and hypoid gears, and not only for gears of small modules, but also for wheels of medium modules, which was previously considered impossible without the use of special machines with helical movement. The machine settings with an increased external taper distance on a machine with insufficient adjustment offsets are analytically determined. As a result, it was found that with certain axial displacements of the headstock of the product, it is possible to place a wheel blank with an increased size of the outer conical distance. In this case, the processing is carried out by a reduced flat producing wheel. Partial displacement of the lateral surface of the wheel teeth is compensated by the optimization of the setting parameters when processing a paired gear, while the calculated displacements, due to the possible intersection of the wheel with the base parts, can be corrected upwards. The new displacement values are again entered into the optimization program as initial ones.

**Key words:** bevel gears, circular tooth, expansion of technological capabilities, increased external taper distance, crossing angle, optimizing programs, machine settings

**Вступ.** Зазвичай, можливості нарізання конічних коліс з коловим зубом визначаються технічними характеристиками спеціальних верстатів (Рис. 1) і визначаються модулем, кількістю зубів, що нарізаються, формою зуба, ступінню точності, зовнішньою конусною відстанню, кутом зхрещування інструменту, що використовується, партионністю заказу, програмним забезпеченням.



Рис. 1 – Нарізання конічних коліс з коловим зубом на станках мод. 528С

При технологічному контролі конічних зубчатих коліс з коловим зубом приходиться приймати рішення про вибір варіанту геометрії коліс, обладнання, наявності інструмента і засоба зубообробки - і все це, в умовах обмеження часу на виконання заказу, до того без повного комплекту зуборізного інструменту з необхідними параметрами.

© О.А. Охрименко., О.О. Клочко, О.В. Набока, О.С. Стрелець, В.І Горбулик, 2022

**Основна частина.** Попереднє опрацювання передбачає кілька перевірочних розрахунків геометрії зчеплення та карт технологічних наладок. Забезпечуючи технічні можливості виконують 3-4 варіанти розрахунків при запуску кожної пари коліс у виробництво. При цьому слід зазначити, що нормативні документи, необхідні для більш об'єктивного розрахунку та надійного виробництва конічних коліс вимагають доопрацювання та удосконалення.

Так, наприклад, ДСТУ 19326-73 "Передачі зубчасті конічні із круговими зубами. Розрахунок геометрії" не перевидавався 47 років, містить застарілі спірні та некоректні положення, перенасичений малоінформативними, не особливо потрібними для виробництва, розрахунками, таблицями та графіками, орієнтований на ручний розрахунок. Деякі перевірки та таблиці виконані приблизно і з дуже великими запасами, вибір початкових даних наприклад, зуборізних головок, орієнтується на застарілі стандарти, зокрема на ВН 451-55, ДСТУ11902-66, хоча давно вже є ДСТУ11902-77 и ОСТ2- И45-4-79, ОСТ2-И45-5-79.

Рекомендації з вибору модуля нормального  $m_n$  і кута ножки зубів  $\theta_f$  не зовсім удачні, в сучасних умовах, так як вони прив'язані до розводу зуборізної голівки, їх нужно брати уже з нових нормативів.

Цей зв'язок може бути логічним і оправданим тільки за наявності більшої номенклатури розводів головок. Гораздо простіше в умовах одиничного виробництва, для отримання необхідної товщини зубів використовувати поворотний метод обробки колеса. В сучасний час це основний засіб нарізання зубів колес, що використовуються у виробництві на верстатах мод. 5С280П, 528С для нарізання конічних колес с круговими зубами  $\varnothing 800$ .

При обмеженій номенклатурі інструмента не завжди виходить підібрати зуборізну голівку з точно відповідними параметрами.

В ГОСТ 19326 -81 не зовсім коректно ідеалізується осьова форма зуба II, в той час, і іншим формам належні деякі недоліки, такі як :

- збільшена висота зуба на більшому торці,
- часто зворотне звуження вершинної стрічки,
- ускладнення у вигляді вторинного різання при використанні ширини зубчастого вінця у вигляді вторинного різання при використанні ширини зубчастого вінця.

У світовій практиці виробництва конічних передач оновлення нормативних документів проводиться регулярно, існує спеціальна міжнародна організація AGMA (Американська організація виробників шестерень), яка займається координацією, оновленням, розробкою та публікацією нормативних та рекомендаційних матеріалів з виробництва всіх видів зубчастих передач. Більшість цих матеріалів через деякий час реєструються як міжнародні стандарти ISO, які потім приймаються багатьма країнами як національні стандарти. Так, наприклад, цією організацією в 2007 році опубліковано ISO 23509:2006 "Bevel and hypoid geometry" і вже в 2008-2009 роках багато країн прийняли його як національні, в тому числі і Україна прийняла стандарт ДСТУ-ISO 23509. У цьому матеріалі, заснованому на стандарті фірми Глісон [1, 2, 3, 12], геометрія всіх видів конічних і гіпоїдних, передач розраховується по одних і тих же формулах, змінюються лише коефіцієнти, причому самі формули зручні для складання програми на комп'ютері. Тут, крім осової форми I, II і III, застосовується ще одна форма, (яка відсутня в ДСТУ 19326-73), в якій кут ніжки розраховується як у формі зуба II, а висота зуба обчислюється формою зуба I. Цей тип геометрії дозволяє отримувати рівномірну ширину вершинної стрічки зубів, не збільшуючи висоту зуба на зовнішньому торці та використовувати більший діапазон діаметрів та розлучень зуборізних головок.

Не можна назвати вдалим положення ДСТУ19326-81, коли для кожної суми кутів ніжок зубів передачі, потрібен свій номер різців зуборізної голівки, при цьому номенклатура інструменту, з урахуванням різноманітності сполучень і номерів різців, при одиничному виробництві різних передач, може знадобитися величезної та непідйомної великого підприємства. Тому можна назвати малозручними для виробництва, в реальних умовах, багато існуючих програм розрахунку геометрії конічних передач, засновані на ДСТУ19326-81. Програма фірми Аскон-"Компас#Gears" блокує подальший розрахунок із некоректними параметрами ДСТУ19326-81.

Ці параметри є наслідком того, що проектування зубчастих передач механізмів здебільшого проводиться від загального виду або схеми виробу, а не від технологічних рекомендацій щодо можливості зубообробки коліс. Стандарт [3, 4, 11] у довідковому додатку пропонує, що кращими для застосування є фіменко більш технологічні, конічні передачі з круговими зубами, а не з прямими. Однак через складність розрахунків конструктора багатьох галузей машинобудування, переходять на прямі конічні зуби, причому дуже часто з помилками в геометрії, наприклад, коефіцієнт зміщення вихідного контуру, майже завжди ставлять рівним нулю, незалежно від числа зубів коліс. Крім іншого по ГОСТ19326-81 неможливо розрахувати геометрію гіпоїдної передачі, що є причиною рідкісного застосування цього прогресивного виду передач у виробках машинобудування.

Відсутність належних нормативних документів та недостатня номенклатура інструменту, є гальмом для оперативного виробництва, проте органічним виходом із цього положення може бути втілення ідеї висловленої Д.Т. Бабичевим [4, 5, 6, 10] - створення так званого "комп'ютерного паспорта зуборізного інструменту" або інакше проведення великого комплексу попередніх розрахунків із застосуванням самоорганізованих, автоматизованих програм з оптимізації геометрії коліс, налагоджувальних параметрів верстатів, при оптимальній плямі контакту та мінімізації параметрів [5, 7, 8]. Такий підхід дає можливість виконати вибірку оптимального комплексу зуборізних головок, яким можна обробити максимальну кількість зубчастих передач із різною геометрією. Для виконання цього завдання можуть бути залучені допрацьовані до потрібного ступеня такі програми як "Волга5" [6, 9], програмний комплекс "Експерт".

Малоймовірно, що імпорتنі розрахункові комплекси, такі як: KIMoS, фірми Клінгельнберг (ФРН); KISSsoft, LTCA, фірми Глісон; (США); PCD К. Кавасакі (Японія) та інші програми, через високу вартість та складність самостійного навчання роботи з ними, можуть бути впроваджені у споживачів. Для демонстрації реальності втілення ідеї "паспортизації зуборізного інструменту", можна навести приклад багаторічного використання досить

швидкодіючої програми "Волга5", що дозволяє в режимі діалогу з компетентним оператором, миттєво проводити розрахунок геометрії та налагодження практично будь-яких верстатів (крім верстатів з багатоосьовим управлінням) для обробки величезного діапазону конічних та гіпоїдних передач, з різною геометрією, будь-яким відомим способом та будь-яким рухом, застосовуючи всього три номери різців: це номери N-0, N-12, N-24. Додавши до цього списку N-36, можна забезпечити розрахунком і великий діапазон гіпоїдних передач з високими експлуатаційними параметрами. В принципі, використання програм з оптимізацією параметрів і верстатів з нахилом інструментального шпинделя дозволяє обійтися одним універсальним номером -12 для виготовлення досить великого діапазону конічних передач з різною геометрією.

Оптимізація програми дозволяє, при певному поєднанні геометричних параметрів, отримувати локалізацію зони контакту по висоті, для форми зуба III, навіть на верстаті без нахилу інструменту, а за наявності верстата з нахилом інструментального шпинделя, широко застосовувати подвійний-двосторонній метод нарізування [7, 8] для великого діапазону конічних і гіпоїдних передач, і не тільки для передач малого модуля, але і для коліс середніх модулів, що раніше вважалося неможливим без використання спеціальних верстатів з гвинтовим рухом. Природно, при цьому потрібно проаналізувати всі можливі дефекти передачі, такі як:

- звуження та загострення вершинної стрічки,
- підрізання ніжок зубів коліс,
- розміри, форму та поведінку зони торкання,
- напрямок робочої лінії,
- криві Бакстера,
- реальні величини підналадок верстата для нарізування коліс.

Крім того, застосування програм з оптимізацією дозволяє проводити нарізування передач з налагоджувальними параметрами, що виходять за межі паспортних даних верстатів, наявних у виробництві, наприклад, для неортогональних з великою довгою утворюючою або ортогональних з габаритами колеса, налагоджувальні установки для яких, параметри розраховані за звичайною методикою, не вписуються у характеристики верстата.

Найчастіше не вистачає "радіальної установки" верстата, яку зазвичай настроюють кутом ексцентрикового барабана. Інші установки не такі критичні. Наприклад, відсутній розмір осьової установки можна "наростити" другою додатковою шкалою або вимірюванням переміщення, наприклад глибиноміром за межами основної шкали. Недостатній хід шкали, "зміщення столу" (або усунення ковзної бази), можна змінити подовженням штока відведення столу на певну величину. Невелике перетинання базових елементів верстата з нарізним колесом або кріпильною планшайбою при збообробці, можна усунути підрізуванням цих елементів, недостатню величину робочого циклу верстата, можна подовжити установкою більш тихохідного двигуна подачі або його частотним регулюванням.

Звичайно, всі ці маніпуляції виробляються не "від хорошого життя", а внаслідок хронічної нестачі коштів у підприємств на придбання відповідного, дорогого більшого обладнання.

Розглянемо можливість нарізання передачі з великою зовнішньо конусною відстанню на верстаті з недостатніми для цього налагоджувальними зсувами. Допустимо необхідно нарізати передачу з параметрами:  $Z_1 = 25$ ,  $Z_2 = 25$ , кут перетину між осями  $30^\circ$ ,  $m_e = 10.2$ ,  $\beta_0 = 25^\circ$ ,  $R = 492,62$ ,  $\delta_2 = 15^\circ$ ,  $b = 95$ , з формою зубів - I, зуборізною головкою  $\Phi = 457.2$  мм, ( $r_0 = 228.6$ ), на верстаті моделі 528С максимальною радіальною установкою  $U_{max} = 340$  мм та максимальним  $P$ .

Запропоновано налагоджувальні установки для колеса (1), (2), (3):

Радіальне зміщення

$$U_0 = ((r_0 \cos \beta_0)^2 + (R \cos \theta_\xi - r_0 \sin \beta_0)^2)^{1/2} = 405,3408 \quad (1)$$

кутова установка

$$q_0 = \arctg (r_0 \cos \beta_0 / R \cos \theta_\xi - r_0 \sin \beta_0) = 54,831875 \quad (2)$$

число зубів плоского виробляючого колеса

$$Z_c = (Z_1^2)^{1/2} + (Z_2)^2 = 21,213203 \quad (3)$$

Такі установки неможливо здійснити на станку 528С, так як не забезпечується величина радіального зміщення. Позначимо його як:  $\Delta U = U_{max} - U_0 = 340 - 405,341 = -65,341$ .

Для такого налагодження потрібен більший верстат, наприклад 5A284 з діаметром оброблюваних коліс до 1600 мм і модулем до 30 мм. Але цей верстат стоїть на порядок дорожче, ніж 528С, і їх залишилася обмежена кількість в Україні.

При певних осьових зсувах бабки виробу, можна розмістити заготівлю колеса зі збільшеним розміром зовнішньої конусної відстані. При цьому обробка проводиться зменшеним, ніж визначеним за формулою (3), плоским колом, що виробляє.

Величина зменшення радіусу колеса, що виробляє

$$\Delta R = \Delta u \cdot \cos q_0 = -90,5407 \quad (4)$$

Число зубів виробляючого колеса

$$Z_p = 2(R + \Delta R) / m_p = 76,945 \quad (5)$$

де

$$m_p = m_e \cdot R / (R - b/2) = 9,21648 \quad (6)$$

Заготівля колеса при цьому зміщується на величини  $\Delta A$  і  $\Delta E$ .

Схема нарізування та встановлення конічних коліс з кутом  $30^\circ$  зі збільшеною конусною відстанню (Рис. 2 та Рис. 3.)

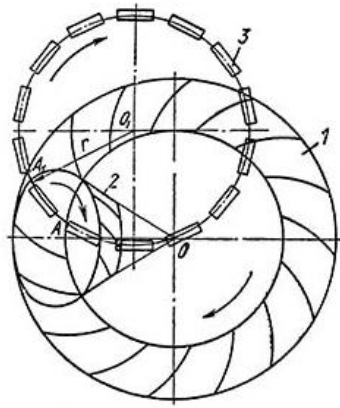


Рис. 2 – Схема нарізання конічних колес з круговим зубом на станку мод. 528С

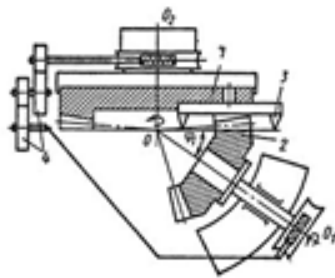


Рис. 3 – Схема пристрою для нарізання конічних колес з углом  $30^{\circ}$  зі збільшеною конусною відстанню

Мінімальні величини зміщень:

$$\text{осьове зміщення } \Delta A = \Delta R / \cos \delta_2 = 93,7346 \quad (\text{Вперед}) \quad (7)$$

$$\text{Гіподіодне зміщення } \Delta E = \Delta U \sin \alpha_0 = 53,843 \quad (\text{Догори}) \quad (8)$$

$$\text{Зміщення столу } \Delta B = \Delta A \sin \delta_2 = 60,954 \quad (\text{Назад}) \quad (9)$$

У цьому радіальне зміщення встановлюється максимально на верстаті тобто,  $U=340$  мм. Шток відведення столу подовжується на 200 мм.

Осьове зміщення колеса, що нарізається, уздовж осі вперед на 93,7346 мм і гіпоїдне зміщення на 53.843 мм вгору, дозволяє розрахувати карту налагодження для нарізування зубів. Контроль настановних зсувів виконується на контрольно-обкатному стенді (Рис. 4)



Рис. 4 – Контроль настановних зсувів конічних колес з круговим зубом на контрольно-обкатному стенді

Отримане при цьому часткове зміщення бічної поверхні зубів колеса компенсується оптимізацією налагоджувальних параметрів при обробці парної шестірні, при цьому розраховані за формулами (7), (8) зміщення, з-за можливого перетину колеса з базовими деталями, можуть коригуватися у більшу сторону. Нові величини зсувів знову вводяться у програму оптимізації як вихідні (рис. 5).

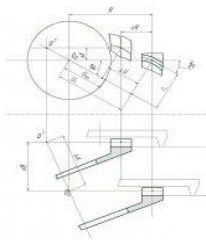


Рис. 5 – Схема оптимізації параметрів наладки при обробці парної шестерні

За описаною схемою налаштування на станку 528С було нарізано партію шестерен та коліс (Рис. 6).



Рис. 6 – Конічна зубчаста передача з круговим зубом

При обробці коліс з круговими зубами необхідно здійснити такі формоутворюючі рухи:

- а) головний рух - обертання різцевої головки;
- б) рух обкату - узгоджене обертання люльки (колеса, що виробляє) і заготовки;
- в) рух розподілу - поворот заготовки на обробку наступного зуба.

Узгодженість обертання люльки і заготовки досягається змінними колесами, що розраховуються в залежності від кількості зубів колеса, що нарізаються. Вершини різців повинні пересуватися по утвореним поверхням внутрішнього конуса нарізаного колеса, для цього колесо необхідно встановити під кутом внутрішнього конуса  $\phi$  до площини, в якій пересуваються вершини різців.

При чорновому нарізанні великих коліс застосовується спеціальний метод обробки, рівносильний простому врізанню інструменту у виріб. При такому методі форма западини, що нарізається, збігається з формою профілю ріжучого інструменту.

Робочий цикл верстата при чистовому нарізанні полягає у наступному. При натисканні пускової кнопки відбувається швидке підведення столу з бабкою виробу. Одночасно включається обертання різцевої головки, обертання виробу та хитання люльки. Два останні рухи становлять обкатний рух, необхідні для утворення профілю зуба.

Після закінчення обкатки зуба виріб швидко відводиться назад, а коліска починає швидко повертатися у зворотний бік. При цьому виріб продовжує обертатися в той же бік, що й під час робочого ходу. Після закінчення зворотного повороту часточки цикл повторюється, причому, оскільки за час зворотного ходу люльки виріб продовжував обертатися вперед, до моменту початку наступного циклу буде пропущено певне число зубів, що не має загального множника з числом зубів колеса, що нарізається.

Таким чином, при повторенні циклу стільки разів, скільки зубів у колесі, що нарізається, відбудеться нарізання всіх його зубів. При чорновому нарізанні робота відбувається в основному так само, як і при чистовому з тією різницею, що величина обкатки сильно зменшується, а швидке підведення столу замінюється повільною робочою подачею, при якій інструмент поступово врізається в заготовку. Після досягнення повної глибини западини стіл швидко відводиться назад і відбувається зворотний поворот люльки на невеликий кут, достатній для попадання в сусідню западину при наступному циклі.

**Висновки.** Розширено технологічні можливості верстатів мод. 528С для нарізування конічних коліс з круговим зубом зі збільшеною зовнішньою конусною відстанню коліс з кутом схрещування 300.

Проаналізовано оптимізують програми для визначення геометричних параметрів з отриманням локалізації зони контакту по висоті, для форми зуба III без нахилу інструменту. Аналітично визначено параметри налаштування верстата зі збільшеною зовнішньою конусною відстанню на верстаті з недостатніми для цього зсувами налагодження.

Встановлено, що при певних осьових зсувах бабки виробу можна розмістити заготовку колеса зі збільшеним розміром зовнішньої конусної відстані.

Часткове зміщення бічної поверхні зубів колеса компенсується оптимізацією налагоджувальних параметрів при обробці парної шестерні, при цьому розраховані зміщення, з-за можливого перетину колеса з базовими деталями, можуть коригуватися у велику сторону.

#### Список літератури

1. Добротворский С.С. Перспективы применения передовых технологий в зубообработке конических колес с круговыми зубьями / С.С. Добротворский, Е.В.Басова, А.А. Ключко, М.И. Гасанов, Е.Э. Тонкошкур // Автоматизированные технологии и производства. – 2016. – № 2 (12). – С. 10–14.
2. Bevel and Hypoid Gear Geometry: 9/2002, ISO/TC 60/SC 2/WG 13 DOC N43 Rev.3, Working Draft, 96 p.
3. ГОСТ 12289-76 Передатки зубчатые конические. Основные параметры. М.: Издательство стандартов, 1976, - 5 с.
4. Бабичев Д.Т. Постановка задачи о создании геометрических паспортов инструментов для зубообработки. Вестник Национального технического университета "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск. "Проблемы механического привода". Харьков: НТУ "ХПИ". - 2011, №28. - с. 3-13.
5. Лычкин Е.Н. Рыжков В.А. Применение самообучающихся нейронных сетей для выявления закономерностей при расчете параметров зуборезного инструмента. М: Вестник МГТУ "Станкин", 2009, №1(5) с.45-50.
6. Сегаль М.Г., Ромалис М.М. Кричалко Г.А. Совершенствование зубообработки конических и гипоидных передач. Журнал "Станки и инструмент", М.: 1986г. №5, с. 19-21.
7. Ромалис М.М. Обеспечение требуемого положения центра пятна контакта для конических и гипоидных передач с круговыми зубьями. Межвуз. научн. сб., Точность и производительность зубообрабатывающих станков и инструментов. Саратов, СПИ, 1986, с. 73-82.
8. Кедринский В.Н., Писманик К.М. Станки для обработки конических зубчатых колес. - М.: Машиностроение, 1967.
9. Прилепский В.И. Погораздов В.В. Изготовление и применение зуборезных головок для крупномодульных конических колес с круговыми зубьями.
10. Dr. Ing. Hartmuth Muller and Dr. Ing. Joachim Thomas, "Face Hobbing versus Face Milling-two heavyweights in manufacturing", Journal, Gear Solutions, September 2007, pp.48-60.
11. Шелковой А.Н., Пермяков А.А., Ключко А.А., Басова Е.В., Перминов Е.В. Глобальный метод повышения эффективности эксплуатации цилиндрических и конических зубчатых передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = 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», 2018. — № 34 (1310) 2018. — С. 67–76. — ISSN 2079-004X.
12. Воробйов С.В. Радіус кривизни зуба циліндричного арочного зубчастого колеса / С.В. Воробйов, Н.С. Равська, О.О. Ключко // Надійність інструмента і оптимізація технологічних систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – Вып. 38. – С. 60–66.

#### References (transliterated)

1. Dobrotvorskij S.S. *Perspektivy` primeneniya` peredovy`kh` tekhnologij` v` zuboobotke` konicheskikh` koles` s` krugovy`mi` zub`yami`* / S.S. Dobrotvorskij, E.V.Basova, A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.E` . Tonkoshkur // *Avtomatizirovanny`e` tekhnologi` i` proizvodstva`*. – 2016. – # 2 (12). – S. 10–14.
2. *Bevel and Hypoid Gear Geometry: 9/2002, ISO/TC 60/SC 2/WG 13 DOC N43 Rev.3, Working Draft, 96 p.*
3. *GOST 12289-81 Peredachi` zubchaty`e` konicheskie. Osnovny`e` parametry`*. М.: Izdatel`stvo standartov, 1976, - 5 s.
4. Babichev D.T. *Pstanovka` zadachi` o` sozdanii` geometricheskikh` pasportov` instrumentov` dlya` zuboobrabotki`*. Vestnik Naczi`onal`nogo` tekhnicheskogo` universiteta` "KhPI". Sbornik nauchny`kh` trudov. Tematicheskij` vy`pusk. "Problemy` mekhanicheskogo` privoda". Khar`kov: NTU "KhPI". - 2011, #28. - s. 3-13.
5. Ly`chkin E.N. Ry`zhkov V.A. *Primenenie` samoobuchayushhikhsya` nejronny`kh` setej` dlya` vy`avleniya` zakonomernostej` pri` raschete` parametrov` zuboreznogo` instrumenta`*. M: Vestnik MGTU "Stankin", 2009, #1(5) s.45-50.
6. Segal` M.G., Romalis M.M. Krichalco G.A. *Sovershenstvovanie` zuboobrabotki` konicheskikh` i` gipoidny`kh` peredach`*. Zhurnal "Stanki` i` instrument", M.: 1986g. #5, s. 19-21.
7. Romalis M.M. *Obespechenie` trebuemogo` polozheniya` czentra` pyatna` kontakta` dlya` konicheskikh` i` gipoidny`kh` peredach` s` krugovy`mi` zub`yami`*. Mezhevuz. nauchn. sb., Tochnost` i` proizvoditel`nost` zuboobrabaty`vayushhikh` stankov` i` instrumentov. Saratov, SPI, 1986, s. 73-82.
8. Kedrinskij V.N., Pismanik K.M. *Stanki` dlya` obrabotki` konicheskikh` zubchaty`kh` koles`*. - М.: Mashinostroenie, 1967.
9. Prilepskiy V.I. Pogorazdov V.V. *Izgotovlenie` i` primeneniye` zuborezny`kh` головок` dlya` krupnomodul`ny`kh` konicheskikh` koles` s` krugovy`mi` zub`yami`*.
10. Dr. Ing. Hartmuth Muller and Dr. Ing. Joachim Thomas, "Face Hobbing versus Face Milling-two heavyweights in manufacturing", Journal, Gear Solutions, September 2007, pp.48-60.
11. Shelkovej A.N., Permyakov A.A., Klochko A.A., Basova E.V., Perminov E.V. *Global`ny`j` metod` povy`sheniya` e`ffektivnosti` e`kspluataczii` czilindricheskikh` i` konicheskikh` zubchaty`kh` peredach`* // Вісник Нацїї`onal`nogo` tekhnї`chnogo` unї`versitetu` «KhPI». Serї`ya: Tekhnologї`yi` v` mashinobuduvannї` = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Nacz. tekhn. un-t «Kharki`v. poli`tekh. i`n-t». — Kharki`v : NTU «KhPI», 2018. — # 34 (1310) 2018. — S. 67–76. — ISSN 2079-004Kh.
12. Vorobjov S.V. *Radi`us` krivizni` zuba` czili`ndrichnogo` arochnogo` zubchastogo` koleasa`* / S.V. Vorobjov, N.S. Ravs`ka, O.O. Klochko // *Nadezhnost` instrumenta` i` optimizaczija` tekhnologicheskikh` sistem`* : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2016. – Vy`p. 38. – S. 60–66.

Поступила (received) 15.03.2022

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Охріменко Олександр Анатолійович (Ohrimenko Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (067) 267-69-43; e-mail: [alexhobs77@gmail.com](mailto:alexhobs77@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>

**Ключко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr Oleksandrovych)** – доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38067-936-36-64, e-mail: [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-2841-9455>

**Набока Олена Володимирівна (Naboka Olena Volodimirivna)** – кандидат технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38050-98-65-027, e-mail: [namirauza@gmail.com](mailto:namirauza@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3997-5481>

**Стрілець Олександр Сергійович (Strilec Alexandr Sergeevich)** – аспірант кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [helivstr2@ukr.net](mailto:helivstr2@ukr.net).

**Горбулик Володимир Іванович (Gorbulyk Volodymyr Ivanovych)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Україна м.Чернівці, вул. Коцюбинського,2., тел. +38050 9792460, E\_mail [gorbulyk@ukr.net](mailto:gorbulyk@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-6091-2261>

**ГУБСЬКИЙ С.О., ЧУХЛІБ В.Л., БІБА М.В.**

## **МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ГНУТОГО ПРОФІЛЮ ЗІ ЗМІННИМ ПЕРЕРІЗОМ**

В статті проведений узагальнюючий огляд підходів до виробництва гнутих профілів змінного перерізу, що використовуються в світі. Розглянуто актуальність використання моделювання напружено-деформованого стану профілю методом кінцевих елементів з метою прогнозування виникнення дефектів при його виробництві. Вказується на потребу профілів зі змінним перерізом. Описано схему формування та вказується на можливість обґрунтованого зменшення числа технологічних переходів. Промодельоване формування коритного гнутого профілю зі змінним поперечним перерізом з нижньою горизонтальною стінкою, показаний алгоритм задання граничних умов. Розглянуто зміну напружено-деформованого стану заготовки при проходженні її через кліть профілезгинального стану.

**Ключові слова:** профіль, формування, напруження, деформація, переріз, моделювання, метод кінцевих елементів, прогнозування, дефект, граничні умови

**ГУБСКИЙ С.А., ЧУХЛЕБ В.Л., БИБА Н.В.**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГНУТОГО ПРОФИЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ**

В статье проведен обобщающий обзор подходов к производству гнутых профилей переменного сечения, используемых в мире. Рассмотрена актуальность использования моделирования напряженно-деформированного состояния профиля методом конечных элементов с целью прогнозирования возникновения дефектов при его производстве. Указывается на востребованность профилей с переменным сечением. Описана схема формирования и указывается возможность обоснованного уменьшения числа технологических переходов. Выполнено моделирование формообразования корытного гнутого профиля с переменным поперечным сечением с нижней горизонтальной стенкой, показан алгоритм задания граничных условий. Рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния заготовки при прохождении ее через клетку профилезгибочного стана.

**Ключевые слова:** профиль, формовка, напряжение, деформация, сечение, моделирование, метод конечных элементов, прогнозирование, дефект, граничные условия

**HUBSKYI S. O., CHUKHLIB V. L., BIBA M. V.**

## **MODELLING OF SHAPING OF ROLL-FORMED SECTION WITH VARIABLE SECTION**

In article the generalizing overview of approaches to production of the roll-formed sections of variable section used in the world is carried out. The relevance of use of modeling of tensely deformed condition of a profile by a finite element method for the purpose of forecasting of appearance of defects by its production is considered. It is pointed out demand of profiles with variable section. The scheme of molding is described, and the possibility of reasonable reduction of number of technological transitions is specified. Modeling of shaping of trough roll-formed section with variable cross-section with the lower horizontal wall is executed, the algorithm of a task of boundary conditions is shown. Change of the intense deformed condition of preparation at its passing through a cage of a camp is considered.

**Keywords:** profile, molding, tension, deformation, section, modeling, finite element method, forecasting, defect, boundary conditions

**1. Вступ.** Виготовлення профілю з поступовою деформацією кромки в клітях є типовим технологічним процесом. В більшості випадків даний технологічний процес використовують для виготовлення гнутих профілів з постійним поперечним перерізом. Процес формозміни заготовки при виготовленні профілів з постійним перерізом досить широко вивчений. Але наразі в автомобільній, залізничній, авіаційній промисловості, суднобудуванні та в будівництві споруд (особливо каркасне будівництво) є потреба профілів зі змінним перерізом, що виготовлені з поступовою деформацією кромки в клітях. В 2001 році шведська компанія-виробник Ortic розробила нову технологію виготовлення гнутих профілів зі змінним перерізом для 3D-панелей для дахів. В праці [1] було запропоновано виробляти П-подібні гнуті профілі зі змінним перерізом шляхом використання стандартних клітей для профілювання, але з можливістю зміни відстані між симетричними частинами валків в поперечному напрямі до вісі руху заготовки. Це досягалося завдяки сервоприводам, що отримували керуючі команди в залежності від швидкості подачі заготовки та заданої геометрії. В праці [2] пропонується виробництво гнутих профілів зі змінним перерізом по ширині та висоті, при цьому розглядається можливість використовувати для виготовлення профілів з високоміцної сталі.

**2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питанням моделювання формування та дослідження напружено-деформованого стану профілю зі змінним перерізом при його формуванні висвітлюється в наукових працях [1-6]. В більшості праць розглядається процес моделювання виникнення змінання кромки профілю при профілюванні криволінійних переходів, та висновки направлені на прогнозування виникнення та недопущення виникнення даного дефекту. В працях [2, 6] моделюють процес формування змінного перерізу профілю по ширині та висоті. В переважній більшості дані дослідження виконані з використанням програмного комплексу САЕ-системи ABAQUS. В цілому, досі немає єдиного підходу до моделювання напружено-деформованого стану профілю зі змінними перерізами по його довжині методом кінцевих елементів з метою прогнозування виникнення дефектів при його виробництві. В програмному комплексі Qform моделювання формування при виготовленні профілю зі змінним перерізом по його довжині з поступовою деформацією кромки в клітях в наукових працях висвітлено не достатньо. Можливість моделювати пружно-пластичні деформації в тонкостінному металі в Qform дозволяють досліджувати, наприклад, формування при виробництві гнутих профілів методом поступового підгинання кромки.

**3. Мета дослідження.** Дослідження формування при виготовленні профілю зі змінним перерізом по його довжині шляхом моделювання в програмному комплексі Qform.

© С.О. Губський, В.Л. Чухліб, М.В. Біба 2022



**4. Викладення основного матеріалу.** Для моделювання обрана заготовка зі Ст3 з габаритними розмірами: товщина 2 мм, ширина 134 мм, довжина 2400 мм (умовне позначення (34...56)x19x(27,5...38,5)x2 мм), швидкість профілювання 10 м/хв., відстань між клітьми 300 мм. З даної заготовки виготовляється гнутий коритний профіль зі змінним поперечним перерізом з нижньою горизонтальною стінкою від 34 мм (на початку сформованого профілю) до 56 мм (в кінці сформованого профілю), схема формування переходів I – IX з кутами підгинання в клітях 10°-18°-30°-42°-54°-66°-78°-88°-90° зображена на рис. 1.

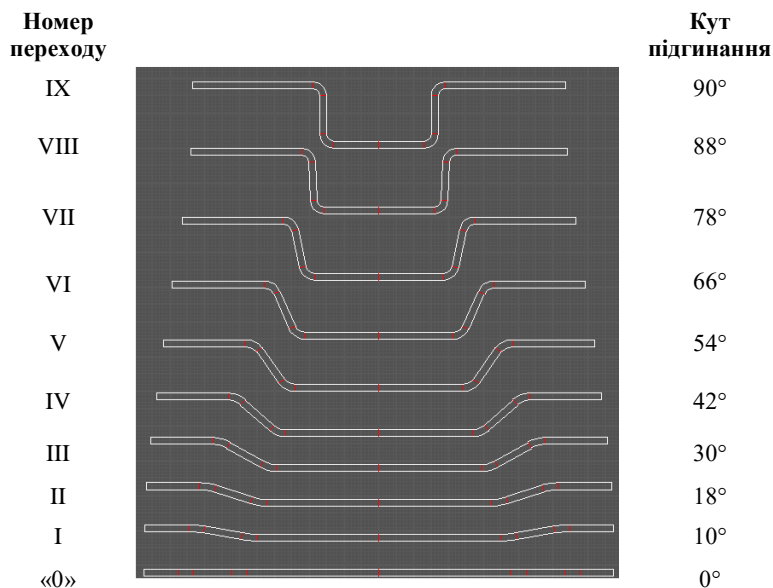


Рис. 1 – Схема формування переходів I – IX гнутого коритного профілю зі змінним поперечним перерізом з кутами підгинання в клітях 10°-18°-30°-42°-54°-66°-78°-88°-90°

Схема формування коритного гнутого профілю (рис. 1) виконана за класичною схемою з калібруванням валків для профілювання по третьому методу та одночасному формуванні всіх елементів профілю на одні і ті ж кути підгинання [7, 8]. Вісь формування профілю розміщується посередині нижньої горизонтальної стінки. Розглядається поштучне формування профілю з розміщенням полок вгору. Кількість переходів 9 – це класичний підхід. Як показує досвід цю кількість можливо обґрунтовано зменшити [9], але даний підхід в цій роботі не розглядається.

Кожен валок кліті складається з двох симетричних частин, які обертаються навколо своєї вісі з необхідною швидкістю. Також дві симетричні частини кожного валка мають можливість поперечного руху вздовж вісі обертання. На рис. 2 зображено 3D-моделі валків двох останніх клітей (стрілками позначені напрями обертання та руху заготовки). В центрі кожного валка зображені вирізи квадратної форми – це умовний виріз для контролю обертання валків при моделюванні, що не вносить суттєвого впливу на результати моделювання.

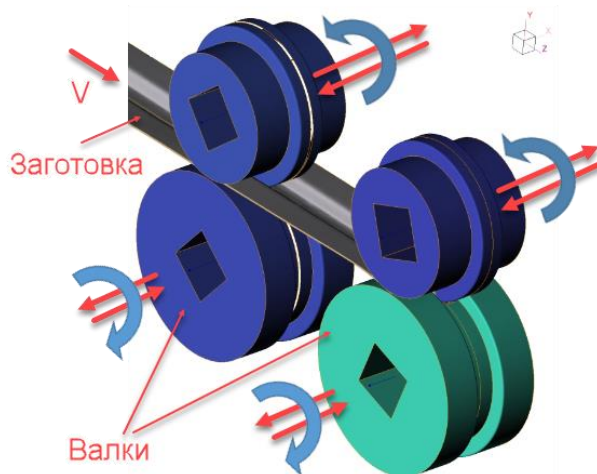


Рис. 2 – 3D-моделі валків двох останніх клітей (стрілками позначені напрями обертання та руху заготовки)

Попереднє формоутворення було виконано та проаналізовано в програмному комплексі UBESCO – рис. 3. Латинськими літерами A...J позначені перерізи по довжині сформованого профілю.

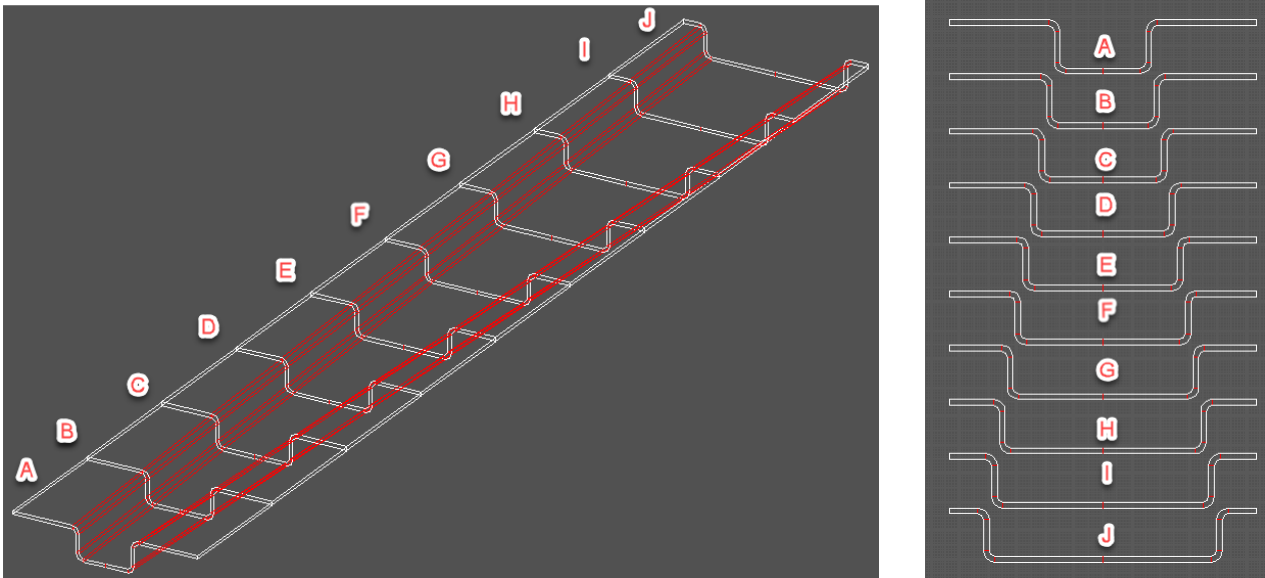


Рис. 3 – Схема поперечних перерізів коритного профілю зі змінним поперечним перерізом по довжині з основою від 34 мм до 56 мм

При переміщенні заготовки по клітках профілезгинального стану відбувається не тільки обертання валків, а ще й їх поперечний рух (розходження) перпендикулярно вісі заготовки валків за наступним алгоритмом. При заходженні заготовки в кліть – починається розходження симетричних частин валка (верхнього та нижнього) даної кліть з певною постійною швидкістю. Цей поперечний рух симетричних частин валка (верхнього та нижнього) буде продовжуватися до закінчення проходження заготовки через дану кліть.

При моделюванні процесу формоутворення коритного профілю зі змінним поперечним перерізом по довжині в Qform, необхідно для кожного проходу заготовки через кліть створити окрему операцію. Тип операції для даного завдання потрібно обирати «Деформація», з заданням додаткового параметру «З врахуванням пружно-пластичних деформацій». Це дає можливість врахувати в моделі деформованого матеріалу пружні властивості. Також обирається тип задачі «3D».

Всі 3D-моделі для моделювання формоутворення профілю створюються в будь-якій CAD-системі, а далі імпортуються в Qform. Після цього потрібно зазначити де «Заготовка», а де «Інструмент» та виконати позиціювання. Так як задача формоутворення при виготовленні профілю зі змінним перерізом по його довжині симетрична, то задається площина симетрії, це прискорить розрахунок поставленого завдання. Для валків, що обертаються навколо своєї вісі – потрібно задати вісі обертання. Також є можливість додати до завдання «Параметричну геометрію» певної форми із заданням її розміщення та геометрії з типом сітки «Кубічна», але в даному завданні дана опція не використовується.

Далі потрібно задати матеріал заготовки – Ст3, процес деформування проходить без підігріву. Більше властивостей заготовки для даного завдання задавати не потрібно.

Матеріал валків – сталь Х12МФ. Привод валків створюємо «Універсальний». Для перших валків (верхнього та нижнього), що не деформують заготовку, а подають в першу кліть задається тільки параметри «Обертання навколо вісі 1», швидкість та напрям обертання. Для всіх інших валків, при деформуванні заготовки, потрібно задавати в параметрах приводу «Універсальний» ще додатково «Напрямок руху», тобто розходження валків відносно заданої площини симетрії з параметром «Подача інструменту», де задається швидкість розходження валків. Також потрібно задати, що контакт валків та заготовки відбувається без змашування, тобто відбувається взаємодія сталь-сталь. В параметрах «Звести в контакт» потрібно задати – не зводити.

Кожна операція буде завершуватися при виконанні умови – обертання на певний кут заданого валка.

При необхідності можливо задати додаткову граничну умову «Штовхач», що призначений для штовхання заготовки в заданому напрямі та заборону переміщення поверхневих вузлів, для яких воно визначено, в площинах, що перпендикулярні напрямку штовхання. Для цієї умови задаються габарити, напрям та швидкість руху.

Кількість ітерацій моделювання (операцій) формування коритного гнучого профілю зі змінним поперечним перерізом з нижньою горизонтальною стінкою буде складати вдвічі більше від кількості клітей, в яких проходить пружно-пластична деформація. В нашому кількості операцій складає 18.

Результати моделювання формування коритного гнучого профілю показано на рис. 4.

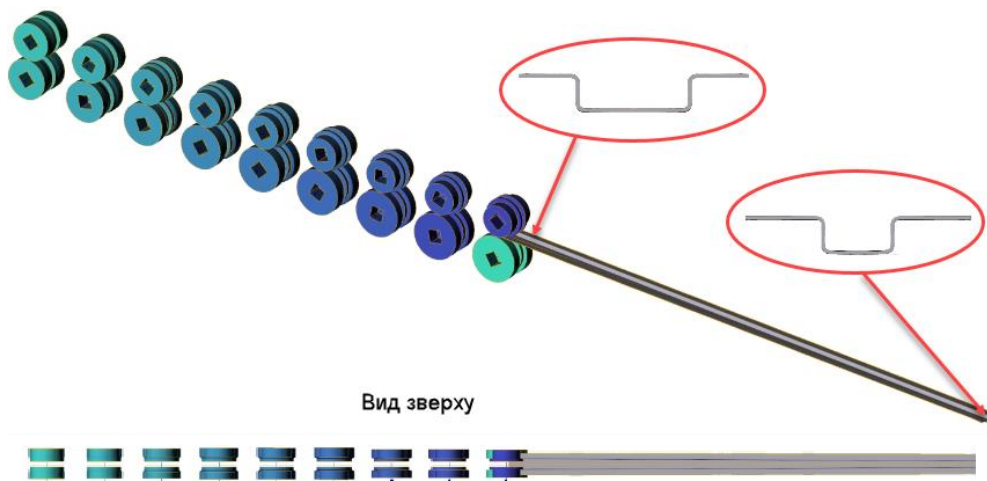


Рис. 4 – Результати моделювання формування коритного гнутого профілю зі змінним поперечним перерізом з нижньою горизонтальною стінкою

На рис. 5,а показаний переріз передостанньої кліті стана, обрані для аналізу найбільш характерні точки на верхній частині заготовки – т. 167 (на відстані 8 мм від краю заготовки), т. 173 (перегин заготовки), т. 177 (на відстані 10 мм від середини заготовки). На рис. 5,б-г показані пластичні деформації та зміни інтенсивності напружень в даних точках при проходженні їх через передостанню кліть, що отримані після моделювання напружено-деформованого стану заготовки в Qform.

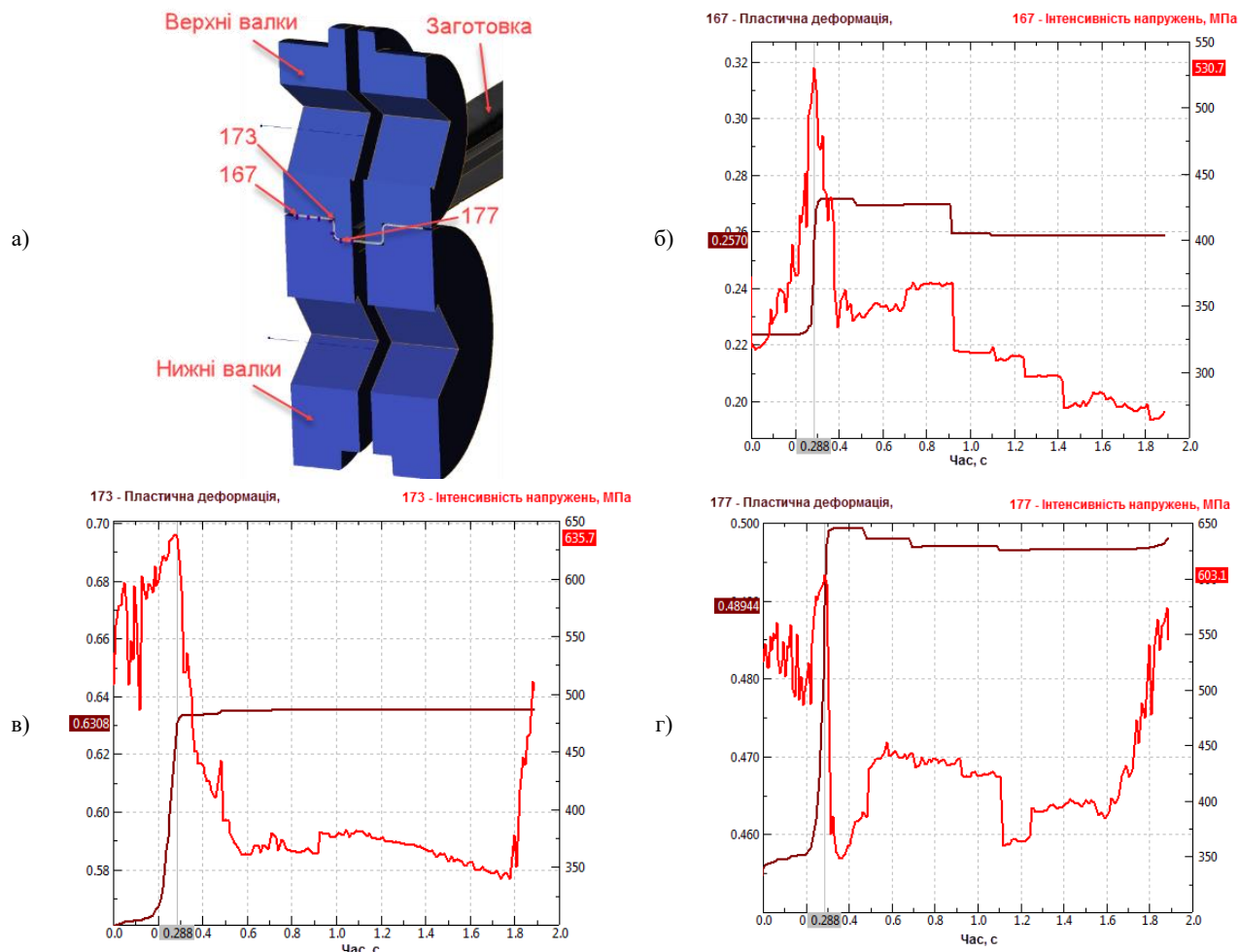


Рис. 5 – Переріз передостанньої кліті стана (а), пластичні деформації та зміни інтенсивності напружень в найбільш характерних точках (т.167, т.173, т.177) на верхній частині заготовки при проходженні їх через передостанню кліть (б-г)

Як видно з рис. 5,б-г напруження в заготовці в т.167, т.173, т.177 починають заздалегідь збільшуватися при приближенні їх до кліті, і поступово зменшуватися при віддаленні їх від кліті. Пластична деформація зменшується в т.167 та т.177 при виходу заготовки із кліті, внаслідок пруження.

**Висновки.** В роботі зроблений узагальнюючий огляд підходів до виробництва гнутих профілів змінного

перерізу, що використовуються в світі. Немає єдиного підходу до моделювання напружено-деформованого стану профілю зі змінними перерізами по його довжині методом кінцевих елементів з метою прогнозування виникнення дефектів при його виробництві. З допомогою програмного комплексу Qform промодельоване формоутворення коритного гнучого профілю зі змінним поперечним перерізом з нижньою горизонтальною стінкою, описаний алгоритм задання граничних умов. Показано зміну напружено-деформованого стану заготовки при проходженні її через кліт профілезгинального стану. Встановлено, що напруження в заготовці починають заздалегідь збільшуватися при приближенні їх до кліті, і поступово зменшуватися при віддаленні їх від кліті. Зменшення пластичних деформацій при виходу заготовки із кліті, відбувається внаслідок пруження.

Зміна напружено-деформованого стану заготовки та інструменту, конструкції клітей стану, електрична схема, алгоритм роботи програмного забезпечення мікропроцесорного керування в даній роботі не розглядалися та будуть висвітлені в наступних працях.

#### Список літератури:

- 18 Groche, P. *New tooling concepts for future roll forming applications* / Groche, P., von Breitenbach, G., Jckel, M., Zettler, A. – 4th International Conference on Industrial Tools, ICIT Conference. – Celje, Slovenia, 2003.
- 19 L.-O. I. Michael Lindgren *3D roll-forming of hat-profile with variable depth and width* / 1st International Congress on RollForming, RollFORM'09. – Bilbao, Spain, 2009.
- 20 Guë İcxecken E. *Finite element simulation of flexible roll forming: a case study on variable width U channel* / Guë İcxecken E, Abeer A, Sedlmaier A, et al. – In: The 4th international conference and exhibition on design and production of machines and dies/molds, Cesme, 21–23 June 2007.
- 21 Zhao W. *Finite element analysis and fracture forecast of U channel flexible roll forming* / Zhao W, Yan Y, Wang H, et al. – Adv Mat Res 683, 2013. – P. 604–607.
- 22 *Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming* / Kasaei M.M., Moslemi Naeini H., Liaghat G.H, et al. – The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. Vol. 50(7), 2015. – P. 529–541.
- 23 *Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles* / Ahmad Erfani Moghadam. – Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, Institute for Frontier Materials Deakin University, 2017. – 159 p.
- 24 Тришевский И.С. *Калибровка валков для производства гнутых профилей проката* / Тришевский И.С., Мирошниченко В. И., Стукалов В. П. и др. // Київ: Техніка, 1980. 168 с.
- 25 Halmos T. *Roll Forming Handbook* / Edited by George T. Halmos Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. 583 p.
- 26 Чухліб В. Л. *Формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів при виробництві гнутих профілів* / В. Л. Чухліб, С. О. Губський, А. О. Окунь // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 2. – С. 169-173.

#### References (transliterated)

1. Groche, P. *New tooling concepts for future roll forming applications* / Groche, P., von Breitenbach, G., Jckel, M., Zettler, A. – 4th International Conference on Industrial Tools, ICIT Conference. – Celje, Slovenia, 2003.
2. L.-O. I. Michael Lindgren *3D roll-forming of hat-profile with variable depth and width* / 1st International Congress on RollForming, RollFORM'09. – Bilbao, Spain, 2009.
3. Guë İcxecken E. *Finite element simulation of flexible roll forming: a case study on variable width U channel* / Guë İcxecken E, Abeer A, Sedlmaier A, et al. – In: The 4th international conference and exhibition on design and production of machines and dies/molds, Cesme, 21–23 June 2007.
4. Zhao W. *Finite element analysis and fracture forecast of U channel flexible roll forming* / Zhao W, Yan Y, Wang H, et al. – Adv Mat Res 683, 2013. – P. 604–607.
5. *Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming* / Kasaei M.M., Moslemi Naeini H., Liaghat G.H, et al. – The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. Vol. 50(7), 2015. – P. 529–541.
6. *Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles* / Ahmad Erfani Moghadam. – Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, Institute for Frontier Materials Deakin University, 2017. – 159 p.
7. Trishevskij I.S. *Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutikh profilej prokata* [Calibration of rolls for production of gnuty profiles of rolling]. – Kiyiv: Tekhnika. 168 s. (1980).
8. Halmos T. *Roll Forming Handbook* / Edited by George T. Halmos Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. 583 p.
9. Gub'skij S.O. *Formalizovani` piddkhodi do viznachennya chisla tekhnologichnikh perekhodi`v pri virobnicztvi` gnutikh profi`liv`* [Formalized approaches to determining the number of technological transitions in the production of bent profiles] *Visnik Naczi`onal'nogo tekhnichnogo uni`versitetu «KhPI»*. Seriya: Mashinoznavstvo ta SAPR : zb. nauk. pr. – Kharkiv : NTU «KhPI», # 2. – S. 169-173. (2020).

Поступила (received) 15.03.2022

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Губський Сергій Олександрович (Губский Сергей Александрович, Hubskeyi Serhii)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Комп'ютерного моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; тел.: (066) 219-20-50; e-mail: [gubskiyso@gmail.com](mailto:gubskiyso@gmail.com).

**Чухліб Віталій Леонідович (Чухлеб Виталий Леонидович, Chukhlib Vitalij)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Комп'ютерного моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: [profdnepro@gmail.com](mailto:profdnepro@gmail.com).

**Біба Микола Вікторович (Бива Николай Викторович, Biba Mykola)** – кандидат технічних наук, директор MICAS Simulations Ltd; м. Оксфорд, Велика Британія; e-mail: [nick@qform.com](mailto:nick@qform.com).

**ГЛАВЧЕВА Ю.М., ГЛАВЧЕВ М.І.**

### **ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ: НАУКОВИЙ ЛАНДШАФТ**

У статті проведено аналіз джерел та публікацій за темою «технології машинобудування». Джерело даних – інформаційно-аналітична система Scopus. На основі публікаційних даних створено карту спів-авторів та науковий ландшафт за темою «технології машинобудування». Виявлено науковців, які є лідерами за кількістю публікацій та актуальні наукові напрями для формування стратегії наукових досліджень.

**Ключові слова:** технології машинобудування, науковий ландшафт, карта співавторів, інформетрія.

**ГЛАВЧЕВА Ю.Н, ГЛАВЧЕВ М.И.**

### **ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ: НАУЧНЫЙ ЛАНДШАФТ**

В статье проведен анализ источников и публикаций на тему «технологии машиностроения». Источник данных – информационно-аналитическая система Scopus. На основе публикационных данных создана карта соавторов и научный ландшафт по теме «технологии машиностроения». Выявлены ученые, которые являются лидерами по количеству публикаций и актуальные научные направления для формирования стратегии научных исследований.

**Ключевые слова:** технологии машиностроения, научный ландшафт, карта соавторов, информетрия.

**HLAVSCHEVA Y.M., GLAVSCHEV M.I.**

### **MECHANICAL ENGINEERING: SCIENTIFIC LANDSCAPE**

The article analyzes sources and publications on the topic of "engineering technologies". The data source is the Scopus information and analytical system. On the basis of publication data, a map of co-authors and a scientific landscape on the topic "engineering technologies" was created. Scientists who are leaders in the number of publications and relevant scientific areas for the formation of a research strategy have been identified.

**Keywords:** engineering technology, scientific landscape, collaborators map, informetrics.

**Вступ.** Наукова публікація – важливий засіб наукових комунікацій та апробації результатів наукових досліджень для кожного науковця. Для ефективного аналізу публікацій за будь-яким напрямом використовуються інформаційно-аналітичні системи.

З метою отримання повноти даних найчастіше використовуються мультидисциплінарні глобальні інформаційно-аналітичні системи: Scopus, Web of Science Core Collection, Google Scholar, Dimensions, інші. Дві перші системи з переліку кардинально відрізняються від інших принципами відбору джерел, а саме, для включення видання до бази даних проводиться ретельний відбір за певними критеріями. Таким чином, в базі присутні лише ті видання, які пройшли наукове рецензування та підтвердили науковий зміст.

Інформаційно-аналітичні системи надають можливість аналізу не лише публікаційних даних, а й дослідження наукометричних показників, які

визначаються на основі підрахунку цитувань. Ці дані широко використовуються в інформетрії. Під інформетрією розуміється використання різноманітного математичного апарату для аналізу, виявлення закономірностей, формулювання законів інформаційної діяльності та наукової інформації, а також для прийняття рішень в інформаційній практиці [1].

#### **Мета дослідження:**

1. провести кількісний аналіз та розподіл за квантилями CiteScore видань за темою «технології машинобудування»;

2. на основі публікацій учених України визначити науковців, які є лідерами за кількістю публікацій та актуальні наукові напрями для формування стратегії наукових досліджень.

**Джерело даних, методи, програмні засоби.** В дослідженні були використані дані наукометричної системи Scopus. Scopus – це реферативна база даних (БД), яка містить відомості про більше ніж 82 млн. документів з 1788 року, 17 млн. авторських профілів, 70 млн. профілів академічних та наукових установ, тощо [2].

В статті аналізуються метадані публікацій за темою «технології машинобудування» та джерела, включені до Scopus. Впливовість видань ми пов'язуємо з приналежністю до певного квантилю CiteScore [3]. Розрахунок рейтингу CiteScore ґрунтується на середній кількості цитувань однієї статті. Рейтинг CiteScore – це відношення кількості цитувань за рік статей, опублікованих у журналі за попередні три роки, до загальної кількості статей цього журналу, проіндексованих у Scopus за ці ж три роки. Найвпливовіші видання відносяться до 1 квантилю.

Для аналізу застосовуються бібліометричні та статистичні методи.

Для візуалізації даних та створення наукового ландшафту використано програмне забезпечення VOSviewer [4]. Це програмний інструмент для побудови та візуалізації карти співавторів та наукового ландшафту (бібліометричних мереж) на основі публікаційних даних. Карта співавторів та науковий ландшафт формується на базі змістовних текстових даних: відомостей про автора, назви, анотації, ключових слів.

**Аналіз публікацій.** Проведемо відбір публікацій за темою «технології машинобудування» (TITLE-ABS-KEY («mechanical engineering»)). За БД Scopus доступні 61405 публікацій за період з 1840 по 2022 рік. Для аналізу актуальних публікацій обмежмо результати пошуку за роками (з 2017 по 2022 рік).

Таким чином маємо 8658 публікацій документів усіх типів. Науковцям з України належить 118 статей з цього масиву. Динаміку публікацій за темою по роках 2017-2021 представлено на Рис. 1.

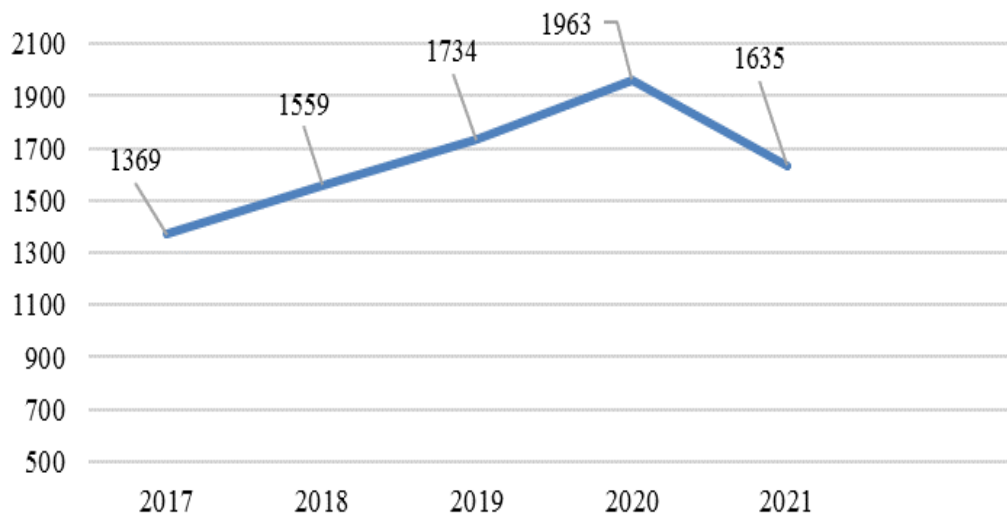


Рис. 1 – Динаміка публікацій за темою по роках

Максимальна кількість публікацій – 1963 припадає на 2020 рік. У 2021 році відбулося невелике зменшення – до 1635 статей. Показники 2022 року на даний момент враховувати недоцільно, рік не завершив формування даних. В Табл. 1 наведено перелік ТОП-10 видань за кількістю опублікованих статей з 2017 по 2022 рік.

Таблиця 1 – ТОП-10 видань за кількістю опублікованих

	Назва видання	Кількість статей
1.	Iop Conference Series Materials Science And Engineering	281
2.	Nonlinear Dynamics	231
3.	Russian Engineering Research	229
4.	Journal Of Physics Conference Series	188
5.	Heliyon	164
6.	Lecture Notes In Mechanical Engineering	146
7.	ASHRAE Journal	99
8.	Aip Conference Proceedings	93
9.	Acta Mechanica	80
10.	Transportation Research Part D Transport And Environment	68

В розділі «Джерела» БД Scopus маємо 872 видання за галуззю знань «*mechanical engineering*». Але не всі вони індексуються БД на поточний момент. Моніторинг видань триває постійно, тому і процеси включення та вилучення видань не припиняються. 100 видань – є виданнями відкритого доступу.

Визначимо розподіл за квартилями CiteScore видань за галуззю знань «*mechanical engineering*», що індексуються в Scopus (Рис. 2).

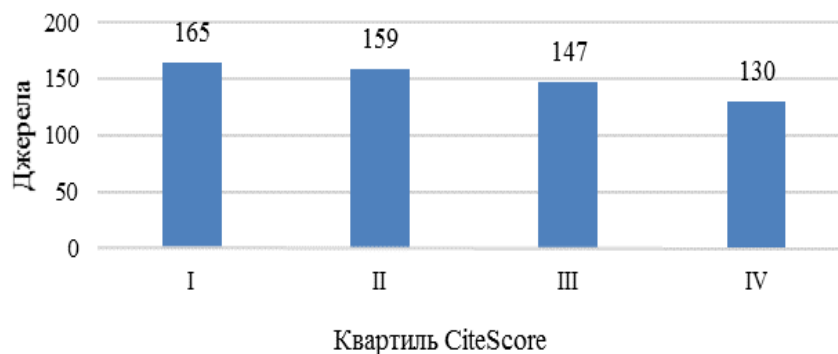


Рис. 2 – Квартиль CiteScore

Загальна кількість видань, що мають CiteScore та розподіляються за кuartилями – 601, що складає 69 % від загальної кількості джерел за галузь знань «*mechanical engineering*».

При формуванні стратегії публікаційної діяльності найефективнішими з точки зору використання та цитування є публікації у виданнях вищих кuartилів. В Табл. 2 наведено ТОП-10 видань першого кuartилю CiteScore за галузь знань «*mechanical engineering*».

Таблиця 2 – ТОП-10 видань першого кuartилю CiteScore

Назва джерела	CiteScore	Цитування (2018-2021)	Статей (2018-2021)	% цитування	SNIP	SJR	Видавець
Nature Materials	55,5	39783	717	93	6,446	12,229	Springer Nature
Advanced Materials	47,7	271912	5699	92	3,903	8,663	Wiley-Blackwell
Materials Science and Engineering: R: Reports	43	3783	88	90	6,593	6,443	Elsevier
Materials Today	33	16020	485	88	4,202	6,3	Elsevier
International Materials Reviews	30,8	2158	70	99	5,647	2,983	Taylor & Francis
Progress in Aerospace Sciences	21,7	2906	134	89	5,208	2,514	Elsevier
Applied Energy	20,4	134001	6558	93	2,652	3,062	Elsevier
Composites Part B: Engineering	18,6	67188	3614	93	2,511	2,119	Elsevier
Nano Letters	18	85448	4734	86	1,97	3,761	American Chemical Society
International Journal of Machine Tools and Manufacture	17	4848	286	91	3,42	3,165	Elsevier

Жодне з ТОП-10 видань першого кuartилю CiteScore не є присутнім в переліку ТОП-10 видань за кількістю опублікованих статей з 2017 по 2022 рік. Це пов'язано з тим, що статті мають міждисциплінарний характер. Тобто одночасно відноситися до двох тематичних галузей. Однією з тем є «*engineering*», а друга галузь визначається сферою застосування. Тому ці переліки значно відрізняються.

#### Візуалізація

Для формування даних в БД Scopus проведено пошук за темою (TITLE-ABS-KEY (*mechanical AND engineering*)) – отримано 220648 результатів.

Для автоматизованої обробки та формування карти співавторів та наукового ландшафту результати обмежили лише авторами з України – отримано 819 результатів (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY, «Ukraine»)). Публікаційний період не обмежувався.

Для підвищення точності при обробці даних сформовано тезауруси: імена авторів; терміни. Тезаурус авторів враховує варіанти написання прізвищ науковців за різними таблицями транслітерації, що заважає їх ідентифікації. Тезаурус термінів враховує вживання синонімів та слів у різних формах.

Для побудови карти співавторів, з експериментальних метаданих виділено 2606 імен науковців. Карту сформовано на основі імен науковців, що мають 3 та більше статей у виборці (819 статей).

Карта співавторів представлено на рисунку 3.

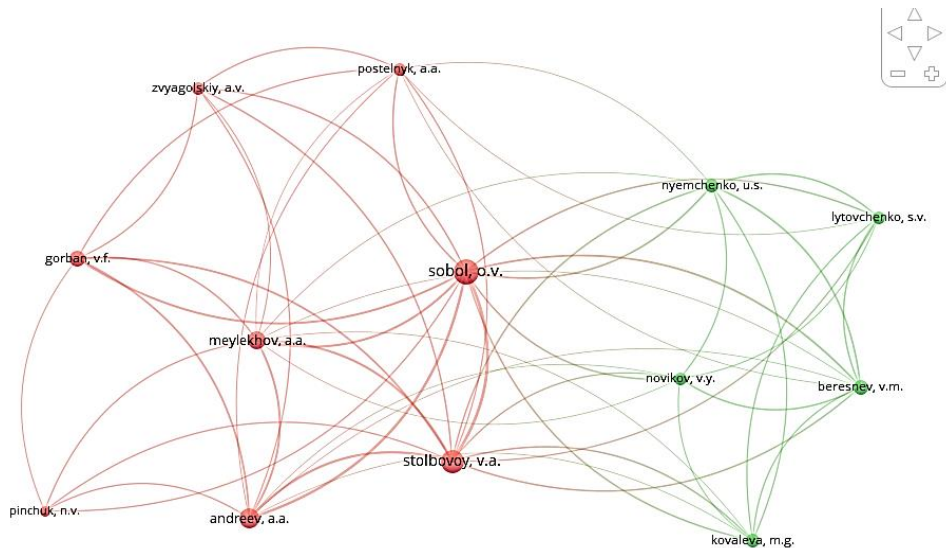


Рис. 3 – Карта співавторів

Відомості про авторів, що мають найбільшу кількість статей представлено в Табл. 3.

Таблиця 3 – ТОП-3 авторів

	Автор	Scopus Author ID	Документи
1.	Sobol O. V. (Соболь О. В.)	6602346708	17
2.	Stolbovoy V. A. (Столбовой В. А.)	36633177300	14
3.	Andreev A. A. (Андреев А. А.)	8291743700	11

Лідери за кількістю статей представляють такі установи: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; Національна академія наук України; Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний Інститут». Слід зазначити, що результат демонструє успіхи та лідерські позиції НТУ «ХПІ» за публікаційними даними в Scopus.

Про **формуванні наукового ландшафту**, з експериментальних метаданих 819 статей виділено 6979 термінів. Для наукового ландшафту використано терміни, що вживаються 3 та більше разів – 577 термінів. Найбільшу вживаність мають терміни в Табл. 4.

Таблиця 4 – Найбільш вживані терміни

	Термін	Використання	Посилання
1.	<i>mechanical properties</i>	104	678
2.	<i>mechanical engineering</i>	172	666
3.	<i>mechanics</i>	78	271

Весь масив термінів система розподілила на 12 тематичних кластерів. Розподіл термінів за тематичними кластерами представлено в Табл. 5.

Таблиця 5– Розподіл термінів за тематичними кластерами

№	Кількість термінів	№	Кількість термінів	№	Кількість термінів
1	81	5	57	9	32
2	81	6	53	10	23
3	76	7	40	11	19
4	74	8	36	12	4

Для прикладу, тема кластера № 12 має морську тему, що пов'язано з напрямом застосування. Вона складається: *marine engineering, black sea, transportation, economic efficiency*. Ці терміни мають зв'язок з *mechanical engineering*.

Повну візуалізацію наукового ландшафту представлено на Рис. 4.





України. Найбільшу кількість статей має Соболев О. В., який має статті в Scopus за період з 1989 по 2021 роки, працював в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», та зробив значний вклад в його науковий доробок. Цей факт підтверджує якість наукових досліджень, які проводяться в НТУ «ХПІ», сприяє укріпленню позицій університету у світових наукових колах.

Візуалізований науковий ландшафт демонструє актуальні наукові напрями (проблеми), та може бути використаний при формуванні стратегії наукових публікацій. В світі підтверджено доцільність використання наукового ландшафту для ефективного планування наукових досліджень. Таким чином, забезпечується не лише актуальність й результативність досліджень, а й оптимальне використання коштів.

#### Список літератури:

1. Pindlowa W. Wokol informetrii, bibliometrii i naukometrii / W. Pindlowa // Aktual. Probl. Inf. i dok. – 1989. – Vol. 34. – № 1-2. – P. 3-7.
2. Content – How Scopus Works – Scopus – Elsevier solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.elsevier.com/solutions/scopus/how-scopus-works/content>.
3. CiteScore Journal Metric – FAQs [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/ceyaw>.
4. VOSviewer – Visualizing scientific landscapes [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.vosviewer.com>.

#### Bibliographi (transliterated)

1. Pindlowa W. Wokol informetrii, bibliometrii i naukometrii. Aktual. Probl. Inf. i dok. 1989. Vol. 34. № 1-2. P. 3-7.
2. Content – How Scopus Works – Scopus – Elsevier solutions. URL: <https://www.elsevier.com/solutions/scopus/how-scopus-works/content>.
- 3 CiteScore Journal Metric – FAQs. URL: <http://surl.li/ceyaw>.
4. VOSviewer – Visualizing scientific landscapes. URL: <https://www.vosviewer.com>.

Поступила (received) 10.02.2022

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Главчева Юлія Миколаївна (Hlavcheva Yuliia)** – PhD, директор науково-технічної бібліотеки; Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м.Харків; вул. Кирпичова, 2, Україна, e-mail: [yuliia.hlavcheva@khp.edu.ua](mailto:yuliia.hlavcheva@khp.edu.ua); <https://orcid.org/0000-0001-7991-5411>

**Главчев Максим Ігорович (Glavchev Maksym)** – к.е.н., доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м.Харків; вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.:+38073-784-82-27; e-mail: [maksym.glavchev@khp.edu.ua](mailto:maksym.glavchev@khp.edu.ua); <https://orcid.org/0000-0001-9670-9118>

## ЗМІСТ

<i>Клименко С.А., Манохін А.С., Чумак А.О., Клименко С.Ан., Конськіна М.Ю., Саленко О.Ф.</i> Моделювання стану зони стружкоутворення при торцевому фрезеруванні загартованої сталі.....	3
<i>Клочко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охрименко О.О., Федоренко В.С.</i> Технологічні передумови деформації і рушення зрізуемого шару при швидкісному зубофрезеруванні загартованих циліндричних зубчатих коліс на основі атомного підходу.....	10
<i>Yakovenko I.E., Permyakov A.A., Kharchenko O.S.</i> Development of the component base of unified assembly and parts of installation clamping devices.....	21
<i>Степанов М.С., Літовченко П.І., Іванова Л.П., Іванова М.С.</i> Експериментальні дослідження температури робочої рідини в підшипниках шпинделя круглошліфувальних верстатів.....	27
<i>Фесенко А. В., Євсюкова Ф. М., Сліпченко С. Є., Линник О. І.</i> Підвищення ефективності фінішної механічної обробки.....	33
<i>Клочко О. О., Камчатна-Степанова К. В., Охрименко О.А., Манохін А. С.</i> Динаміка процесу різання при зубофрезеруванні шевронних коліс.....	44
<i>Мироненко Є.В., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Клименко Г.П., Фадєєв.В.А., Шановалов М.В.</i> Моделювання параметрів точності при чистовому зубофрезеруванні.....	48
<i>Хавін Г. Л., Чжівень Х.</i> Вплив куту орієнтації армуючих елементів на інтенсивність зношування інструменту при обробці полімерних композитів.....	59
<i>Майборода В.С., Джулій Д.Ю., Слободянюк і.В., Бесарабець Ю.Й.</i> Особливості магнітно-абразивного оброблення твердосплавного інструмента з захисними фасками на різальних кромках.....	66
<i>Охрименко О.А., Клочко О.О., Набока О.В., Стрілець О.С., Горбулик В.І.</i> Розширення технологічних можливостей верстатів для нарізання конічних коліс з круговим зубом зі збільшеною зовнішньою конусною відстанню.....	74
<i>Губський С.О., Чухліб В.Л., Біба М.В.</i> Моделювання формоутворення гнutoго профілю зі змінним перерізом.....	80
<i>Главчева Ю.М., Главчев М.І.</i> Технології машинобудування: науковий ландшафт.....	85

## CONTENTS

<i>Klimenko S.A., Manokhin A.S., Chumak A.O., Klimenko S.An., Kopeykina M.Yu., Salenko O.F.</i> Modeling of the chip-cutting zone during face milling of hardened steel.....	3
<i>Klochko O.O., Gasanov M.I., Zakovorotny O.Yu., Mayboroda V.S., Okhrimenko O.O., Fedorenko V.S.</i> Technological rethinking of deformation and destruction of the visible ball in the case of shvidky gear-milling of hardened cylindrical gear wheels on the basis of atomic drive.....	10
<i>Yakovenko I.E., Permyakov A.A., Kharchenko O.S.</i> Development of the component base of unified assembly and parts of installation clamping devices.....	21
<i>Stepanov M.S., Litovchenko P.I., Ivanova L.P., Ivanova M.S.</i> Experimental studies of the temperature of the working surface in the bearings of the spindle of circular grinding benches.....	27
<i>Fesenko A. V., Evsyukova F. M., Slipchenko S. E., Linnik O. I.</i> Improving the efficiency of finishing mechanical processing.....	33
<i>Klochko O. O., Kamchatna-Stepanova K. V., Okhrimenko O. A., Manokhin A. S.</i> Dynamics of the process of cutting when hobbing chevron wheels.....	44
<i>Mironenko E.V., Kovalyov V.D., Vasilchenko Ya.V., Klimenko G.P., Fadeev.V.A., Shapovalov M.V.</i> Modeling parameters in accuracy during finishing gear hobbing.....	48
<i>Khavin G. L., Chzhiven H.</i> Injection of the orientation of reinforcing elements on the intensity of tool wear during the processing of polymer composites.....	59
<i>Mayboroda V.S., Juliy D.Yu., Slobodyanyuk I.V., Besarabets Yu.Y.</i> Features of magnetic-abrasive processing of hard-alloy tools with hard bevels on cutting edges.....	66
<i>Okhrimenko O.A., Klochko O.O., Naboka O.V., Strilets O.S., Gorbulik V.I.</i> Expansion of technological possibilities of versatility for cutting end wheels with a circular tooth with a larger oval conical shaft.....	74
<i>Gubsky S.O., Chukhlib V.L., Biba M.V.</i> Modeling the shape of a bent profile with a change of cut.....	80
<i>Glavcheva Yu.M., Glavchev M.I.</i> Mechanical engineering: scientific landscape .....	85

□

□

## ДЛЯ ПОДАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ». СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В**

*Збірник наукових праць*

*№ 1'(5) 2022*

<i>Відповідальний редактор</i>	<i>О.О. Пермяков, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна</i>
<i>Зам. відповідального редактора</i>	<i>О.О. Клочко, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна</i>
<i>Технічний редактор:</i>	<i>О. В. Набока, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна</i>
<i>Відповідальний секретар:</i>	<i>О. В. Набока, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна</i>

**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@kpi.edu.ua](mailto:oleksandr.klochko@kpi.edu.ua), [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net)

Підп. до друку 07.05.2022 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.