

2. Pomogailo, A.D., & Uflyand, I.E. (1991). *Macromolecular metal chelates [Macromolecular metal chelates]*. Moscow: Chemistry [In Russian].
3. Pashchenko, E.O., Savchenko, D.O., Kukharenko, S.A., et al. (2020). Osoblyvosti syntezy hibrydnykh olihomeriv v prysutnosti pokhidnykh perekhidnykh metaliv z riznoi enerhieiu zviazku z kysnem [Features of the synthesis of hybrid oligomers in the presence of old transition metals with a healthy energy link with oxiden]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling materials science*, 23, 349–356. [In Ukrainian].
4. Pashchenko, E.A., Savchenko, D.O., Kukharenko, S.A., et al. (2020). Optymizatsiia vykhodu metaloolihomeru v zalezhnosti vid umov syntezy [Optimization of metal oligomer yield depending on synthesis conditions]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling material science*, 23, 356–362. [In Ukrainian].
5. Savchenko, D.O., Pashchenko, E.O., Kaidash, O.M., et al. (2020). Mechanism of synthesis and structure formation of hybrid oligomers based on complex oligophenylene compounds with metals. *J. Superhard Mater.* 42, 6. 443–445.
6. Savchenko, D.A. (2013). Gibridnye organo-neorganicheskie polimery kak novyi klass instrumentalnykh materialov. Optymizatsiia sinteza i mekhanizm reaktsii. [Hybrid organic-inorganic polymers as a new class of instrumental materials. Optimization of synthesis and reaction mechanism]. *Porodorazrushaiushchii i metallobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 16, 381–390 [In Russian].
7. Calvert, J. M. (1983). Synthetic and mechanistic investigations of the reductive electrochemical polymerization of vinyl-containing complexes of iron (II), ruthenium (II), and osmium (II). *Inorganic Chemistry*, 22, 15, 2151–2162.

УДК 621.923

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-464-470

С.В. Рябченко, канд. техн. наук¹; **О.М. Ковальчук**, **В.В. Нежебовський**, **Р.А. Бережний**,
канд. техн. наук², **О.О. Шилков**, інж.²; **О.О. Клочко**, д-р техн. наук³

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,
04074 м. Київ, e-mail: s.riabchenko@ukr.net

²АТ «Світло Шахтаря», м. Харків e-mail: nezhebovsky.vladimir@corum.com

³Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»,
м. Харків, e-mail: ukr-stanko21@ukr.net

ПРОФІЛЬНЕ ШЛІФУВАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС РЕДУКТОРІВ ОЧИСНИХ КОМБАЙНІВ

Зубошліфування є одним з методів фінішної обробки зубчастих коліс. Розглядається питання підвищення ефективності профільного шліфування зубчастих коліс, заснованого на використанні інструменту з різного монокорунду. Експериментальні дослідження процесу шліфування зубчастих коліс проводилися на зубошліфувальному верстаті «HÖFLER RAPID 1250». Працездатність шліфувальних кругів оцінювали за потужністю шліфування і точності обробки зубчастих коліс.

Аналіз результатів шліфування показав, що ефективна потужність шліфування зубчастих коліс при обробці кругами з монокорунду в 2 рази нижче, ніж кругами з білого електрокорунду і в 1,5 рази нижче, ніж кругами з хромистого електрокорунду.

Встановлено, що зубошліфування кругами з монокорунду забезпечує 2 клас точності зубчастих коліс.

Ключові слова: шліфування, зубчасті колеса, профільні круги, монокорунд, точність обробки

Постановка задачі

При виготовленні приводів шахтних комбайнів виникають проблеми технологічного забезпечення якості обробки зубчастих коліс на фінішних операціях. У значній мірі це обумовлено утворенням на операціях зубошліфування температурних дефектів на оброблюваних поверхнях, а також відносно низькими показниками точності й шорсткості їх обробки [1].

Зубошліфування є одним із основних способів фінішної обробки загартованих зубчастих коліс, яке забезпечує 3–6 ступені точності та шорсткість поверхні Ra 0,20–1,2 [2].

Шліфування зубчастих коліс проводиться методом обкатки з неперервним або періодичним діленням і методом копіювання з періодичним діленням (профільне зубошліфування) [3]. Аналізуючи різноманітні методи шліфування зубчастих коліс, можна відмітити, що метод профільного зубошліфування забезпечує 2 клас точності і шорсткість поверхні зубчастих коліс до Ra 0,32 та забезпечує високу продуктивність обробки.

При сучасному розвитку технології можливе створення алмазно-абразивного інструменту з показниками, необхідними для забезпечення обробки деталей з найбільшою ефективністю щодо заданих вимог якості і точності розмірів. При розробці нового абразивного інструменту важлива роль належить абразивним матеріалам і зв'язкам шліфувальних кругів [4].

До абразивних матеріалів відносяться наступні синтетичні матеріали: карбід бора – абразивний матеріал сірувато-чорного кольору, за твердістю (по Моосу – 9,32) поступається тільки алмазу і КНБ; карбід кремнію – абразивний матеріал чорного або зеленого кольору (твердість по Моосу 9,1); електрокорунд – абразивний матеріал, складається з корунду та невеликої кількості домішок. Промисловість виробляє різноманітні види електрокорунду: нормальний, білий, хромистий, титанистий, цирконієвий, монокорунд і різноманітні суміші корундів. В останній час з'явилася особлива різновидність електрокорунду – золь-гелієвий монокорунд. Особливістю даного матеріалу є мікросколювання зерен в процесі навантаження інструменту при шліфуванні, що наближує його по якості до зерен кубічного нітриду бора (КНБ).

Надтверді матеріали – синтетичний алмаз і КНБ. Алмаз є найтвердішим абразивним матеріалом. КНБ – штучний матеріал, синтезується з гексагонального нітриду бора. За твердістю КНБ поступається тільки алмазу.

У виробництві шліфувальних кругів для обробки зубчастих коліс використовують різні електрокорунди, зокрема, хромистий монокорунд, який за його червоний колір називають рубін-корунд, а також КНБ [5].

Перспективним напрямком шліфування зубчастих коліс є використання високопористих абразивних кругів. Високопористі шліфувальні круги мають гарну самозаточуваність та технологічні переваги з точки зору профілювання і правки, що дозволяє шліфувати деталі з меншим виділенням тепла в зоні різання в порівнянні зі звичайними кругами. Останнім часом з'явилися ефективні рецептури і технології виготовлення високопористого абразивного інструменту з сучасних монокристалічних електрокорундів. Особливо це відноситься до зубошліфування, коли інструмент безпосередньо впливає на формування стану поверхневого шару зубчастих коліс [6].

Мета роботи полягає в розробці нової технології профільного шліфування зубчастих коліс з використанням алмазно-абразивного інструменту та технології його правки алмазнимиправлячими роликками. Така технологія дозволяє порівняно з іншими методами обробки суттєво підвищити зносостійкість, знизити коефіцієнт тертя, підвищити точність

обробки та знизити висотні параметри шорсткості зубчастих коліс і, тим самим, підвищити надійність і ресурс зубчастих передач.

Методика проведення роботи

Випробування процесу профільного шліфування зубчастих коліс проводили на ПАТ «ХМЗ «Світло шахтаря» (м. Харків) на зубошліфувальному верстаті з ЧПК мод. «HÖFLER RAPID 1250» (рис. 1).

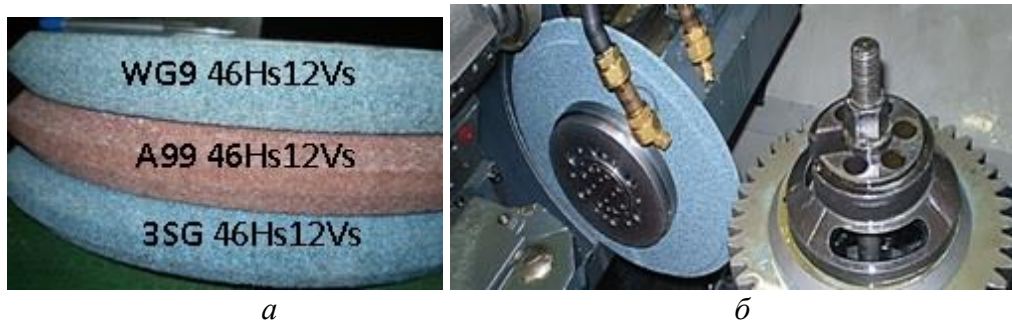


Рис. 1. Високопористі шліфувальні круги (а) та зона обробки на шліфувальному верстаті кругом з золь-гелевого монокорунду (б)

При дослідженні процесу фіксували потужність зубошліфування (P , $P_{\text{ср}}$ – поточне і середнє значення потужності приводу верстату при потужності холостого ходу $P_{\text{хх}} = 600$ Вт) та параметри точності оброблених зубчастих коліс: F_{α} – повна похибка профілю, $f_{f\alpha}$ – похибка форми профілю; $f_{H\alpha}$ – похибка кута профілю; F_{β} – повна похибка лінії зубу; $f_{f\beta}$ – похибка форми лінії зубу; $f_{H\beta}$ – похибка кута нахилу зубу; f_p – похибка шагу; F_p – накопичена похибка шагу; F_r – радіальне биття. Параметри профілю і параметри лінії зуба вимірювали на 3-х западинах, рівномірно розташованих по колу (западини № 1, 10, 20) [7].

Шліфували зубчасті колеса однакового типорозміру із загартованих сталей твердістю до 60 HRC. Зовнішній діаметр зубчастого колеса $d = 233,4$ мм; число зубів $z = 29$; модуль $m = 7$; кут нахилу зубів $\beta = -18^\circ$; ширина вінця $B = 60$ мм.

Були використані наступні абразивні високопористі круги:

- 400×32×127 WG946 Hs12 VS – монокорунд,
- 400×32×127 3SG46Hs 12 VS – золь-гелевий монокорунд,
- 400×32×127 A9946Hs 12 VS – електрокорунд,

та круги зі звичайною пористістю:

- 400×32×127 A8960K9V – хромистий корунд (рубін-корунд),
- 400×32×127 25AF46L6V – звичайній білій корунд.

Результати дослідження

Результати випробувань шліфувальних кругів з монокристалічного і золь-гелевого корунду показали їх високу ефективність у порівнянні з кругами зі звичайного білого електрокорунду. Ці круги забезпечують зменшення потужності шліфування і кращі показники за точністю та якістю обробки.

Наприклад, дослідженні процесу зубошліфування високопористими кругами із золь-гелевого монокорунду 3SG46Hs12VS проводили при шліфуванні двох зубчастих коліс (дали ЗК №1 і ЗК №2) одного і того ж типорозміру. Припуск на обробку – $t_{\text{об}} = 0,51$ мм. Число етапів обробки – 3 (при чорновій – $t_{\text{об}} = 0,24$ мм, при напівчистовій – $t_{\text{об}} = 0,24$ мм, при чистовій – $t_{\text{об}} = 0,03$ мм).

Чорновий (1) та напівчистовий (2) етапи. Число робочих ходів $i = 16$; глибина різання (по нормалі до профілю) $t = 0,015$ мм; радіальна подача (вертикальна глибина шліфування) $S_{\text{рад}} = 0,032$ мм; осьова подача (швидкість деталі) на перший робочий хід $V = 500$ мм/хв., на наступні робочі ходи – $V = 5000$ мм/хв.

Чистовий (3) етап – число робочих ходів $i = 4$; глибини різання (по нормалі до профілю) на перший і другий робочі ходи $t = 0,010$ мм; $S_{\text{рад}} = 0,022$ мм; осьова подача на перший і другий робочі ходи $V = 2000$ мм/хв.; для третього і четвертого робочих ходів: $t = 0,005$ мм; $S_{\text{рад}} = 0,011$ мм; $V = 2000$ мм/хв.

Результати дослідження процесу шліфування зубчастих коліс приведені в табл. 1 та 2. Результати процесу шліфування кругом із золь-гелевого монокорунду $400 \times 32 \times 127$ 3SG46Hs12VS показали, що потужність зубошліфування складає в середньому $P_{\text{сер}} = 566,5$ Вт при напівчистовому (2) етапі і $P_{\text{сер}} = 400$ Вт при чистовому (3) етапі. Точність обробки зубчастого колеса відповідає 2 ступеню точності (по DIN 3962).

Таблиця 1. Потужність шліфування кругами з білого та золь-гелевого корунду

2 і 3 етапи зубошліфування	Шліфувальний круг	
	25AF46L6V (білий корунд)	3SG46Hs12VS (золь-гелевий корунд)
Етап 2 (правка через 6 западин)	$P_{\text{сер}} = 1811,15$ Вт Інтервал змін P 2411,15–600,00 Вт	$P_{\text{сер}} = 566,5$ Вт Інтервал змін P 1166,5–600,0 Вт
Етап 3 (правка через 10 западин)	$P_{\text{сер}} = 1333,3$ Вт Інтервал змін P 1933,3–600,0 Вт	$P_{\text{сер}} = 400$ Вт Інтервал змін P 1000–600 Вт

Таблиця 2. Результати вимірювань параметрів точності зубчастих коліс

Контрольовані параметри	Шліфувальний круг			
	25AF46L6V (білий корунд)		3SG46Hs12VS (золь-гелевий корунд)	
	ЗК №1		ЗК №2	
	ліва сторона	права сторона	ліва сторона	права сторона
Параметри профілю, мкм				
F_{α}	2,8	4,0	3,5	2,5
$f_{f\alpha}$	2,2	2,5	2,0	2,7
$f_{H\alpha}$	-2,7	2,8	-3,5	-1,2
Параметри лінії зуба, мкм				
F_{β}	5,3	8,5	5,0	3,5
$f_{f\beta}$	1,8	3,7	1,3	0,8
$f_{H\beta}$	5,7	-8,7	5,3	-4,7
f_p	3,0	4,0	3,0	5,0
F_p	13,0	12,5	6,5	10,5
F_r	9,5		7,5	

Аналогічні дослідження процесу зубошліфування були проведені при використанні високопористих шліфувальних кругів $400 \times 32 \times 127$ з монокорунду WG946Hs12VS. При випробуванні фіксували потужність зубошліфування та виміри параметрів точності оброблених зубчастих коліс.



Рис. 2. Зона обробки на шліфувальному верстаті кругом з рубін-корунду

Результати дослідження процесу шліфування зубчастих коліс кругом з монокорунду WG946Hs12VS показали, що потужність зубошліфування складає в середньому $P_{\text{сер}} = 900$ Вт при напівчистовому (2) етапі і $P_{\text{сер}} = 800$ Вт при чистовому (3) етапі. Точність обробки зубчастого колеса відповідає 2 ступеню точності (DIN 3962).

Результати дослідження процесу шліфування зубчастих коліс кругом $400 \times 32 \times 127$ з хромистого монокорунду A8960K9V показали, що потужність зубошліфування складає в середньому значенні $P_{\text{сер}} = 1100$ Вт при напівчистовому (2) етапі і $P_{\text{сер}} = 900$ Вт при чистовому (3) етапі (рис. 2). Точність обробки зубчастого колеса також відповідає 2 ступеню точності.

Окремо розглядалась проблема правки абразивних кругів для зубошліфування [8]. Вирішення згаданої проблеми полягає у створенні правлячих інструментів з комбінованою робочою поверхнею з використанням елементів (вставок) з CVD алмазу (рис. 3). Це є доцільним в зв'язку з його надзвичайно високою стійкістю до ерозійного впливу шламу в зоні правки та з особливими трибологічними характеристиками в контакті з основними складовими абразивних кругів.

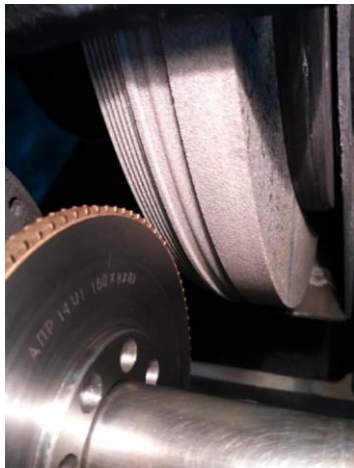


Рис. 3. Правка шліфувального круга роликом з CVD алмазу

Останнє забезпечує стабільний режим вібрацій в процесі правки, тобто, відтворюваність й стабільність параметрів різального профілю абразивного інструменту, з одного боку, та геометричних параметрів і структури обробленої деталі – з іншого. Проблема полягає в тому, що правлячий інструмент з CVD алмазу ніколи не розроблявся та не виготовлявся в Україні. Тому вирішення цього науково-технічного завдання для потреб вітчизняного машинобудування є доцільним та актуальним.

Проведені випробування показали, що використання елементів (вставок) з CVD алмазу в правлячих роликах забезпечує надійну правку профільних шліфувальних кругів, які використовуються при обробці зубчастих коліс на зубошліфувальних верстатах з ЧПК.

Висновки

Використання високопористих шліфувальних кругів з монокристалічного корунду (монокорунду WG9 та золь-гелевого монокорунду 3SG) дозволяє зменшити ефективну потужність зубошліфування в 3 рази у порівнянні з шліфуванням кругами з білого електрокорунду і в 1,5 рази – з шліфуванням кругами з хромистого електрокорунду. Правку кругів з монокорунду та рубін-корунду проводили через 7–8 западін заготовки, в той час як для звичайного круга з білого корунду вона проводиться через 4–5 западини. Зменшення

частоти правки для одного і того ж круга з монокорунду або не впливає на точності обробки, або пов'язане з її покращенням. Наприклад, в результаті збільшення часу між правками на етапах 2 і 3 похибки обробки практично не змінюються. Похибки лінії зуба (F_β , $f_{f\beta}$, $f_{H\beta}$), а також індивідуальної (f_p) і накопиченої (F_p) похибки кроків в цілому зменшуються. Радіальне биття (F_r) трохи вище, але всі параметри в межах допуску і по DIN 3962 зубчасті колеса (ЗК № 1 і ЗК № 2) відповідають 2 ступеню точності.

Застосування високопористих шліфувальних кругів з монокорунду та рубін-корунду на машинобудівних підприємствах України показали високу ефективність інструментів з даних абразивних матеріалів в процесах шліфування зубчастих коліс високої якості.

**S.V. Riabchenko¹, A.N. Kovalchuk², V.V. Nezhebovskiy², R.A. Berezhnyi²,
A.A. Shyilkov², A.A. Klochko³**

¹*V.N. Bakul Institute for Super hard Materials NAS of Ukraine*

²*Kharkiv Machine Building Plant «SVET SHAKHTYORA», Kharkov*

³*National Technical University «Kharkov Polytechnic University*

PROFILE GRINDING OF GEARS OF REDUCERS OF CLEANING COMBINES

Gear grinding is one of the methods for finishing gears. The article considers the issues of increasing the efficiency of profile grinding of gear wheels based on the use of tools made of mono-corundum of various types. Experimental studies of the gear grinding process were carried out on a HÖFLER RAPID 1250 gear grinding machine. Evaluation of the performance of grinding wheels was carried out according to the power of grinding and the accuracy of processing gear wheels.

The analysis of the grinding results showed that the effective grinding power of gear wheels when machining with mono-corundum wheels is 2 times lower than with white electrocorundum wheels and 1.5 times lower than with chromium electrocorundum wheels.

It was found that after gear grinding with mock alumina wheels, gears corresponding to the 2nd class of accuracy are obtained.

Key words: grinding, gear wheels, profile wheels, mono-corundum, processing accuracy.

**С.В. Рябченко¹, А.Н. Ковальчук², В.В. Нежебовський², Р.А. Бережной²,
А.А. Шилков², А.А. Клочко³**

¹*Институт сверхтвердых материалов им. В.М. Бакуля НАН Украины*

²*АТ «Свет Шахтера», г. Харьков*

³*Национальный технический университет «Харьковский политехнический университет»,*

ПРОФИЛЬНОЕ ШЛИФОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС РЕДУКТОРОВ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

Зубошлифование является одним из методов финишной обработки зубчатых колес. Рассматриваются вопросы повышения эффективности профильного шлифования зубчатых колес, основанного на использовании инструментов из различных монокорундов. Экспериментальные исследования процесса шлифования зубчатых колес проводились на зубошлифовальном станке «HÖFLER RAPID 1250». Работоспособность шлифовальных кругов оценивали по мощности шлифования и точности обработки зубчатых колес.

Анализ результатов шлифования показал, что эффективная мощность шлифования зубчатых колес при обработке кругами из монокорунда в 2 раза ниже, чем кругами из белого электрокорунда и в 1,5 раза ниже, чем кругами из хромистого электрокорунда.

Установлено, что зубошлифование кругами из монокорунда обеспечивает 2 класс точности зубчатых колес.

Ключевые слова: шлифование, зубчатые колеса, профильные круги, монокорунд, точность обработки.

Література

1. Нежебовський В.В., Рябченко С.В. Профільне шліфування зубчатих коліс вугледобувних комбайнів // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості

- і транспорті. Матеріали 21-ого Міжнародного науково-технічного семінару, Львів, 15–19 березня 2021 р.: зб. наук. праць. Київ: АТМ України. – 2021. – С. 139–141.
2. Ларшин В. П., Лищенко Н. В. Оптимизация процесса зубошлифования на станках, работающих по методу обката // Труды Одесского политехнического университета: научный и производственно–практический сборник по техническим и естественным наукам – 2003. – Вып. 2 (20). – С. 57–61.
 3. Калашников А. С. Современные методы чистовой обработки зубьев цилиндрических колес // Металлообработка. – 2009. – № 6. – С. 38–42.
 4. Рябченко С. В., Середа Г.В. Абразивные круги для шлифования зубчатых колес // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2011. – № 6 (142). – С. 54–56.
 5. Рябченко С. В. Шлифование зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 2014. – № 6. – С. 81–89.
 6. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
 7. Ларшин В.П., Лищенко Н.В., Рябченко С.В., Нежебовський В. В., Середа Г. В. Середа Профильное шлифование зубчатых колес высокопористыми абразивными кругами // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2016. – № 5 (190). – С. 20–23.
 8. Пашченко Є. О., Рябченко С. В., Шатохін В. В., Кухаренко С. А. Правлячі інструменти з CVD-алмазу для абразивного шліфування зубчастих коліс // Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 19-го Международного научно-технического семинара, Кошице, 18–22 февраля 2019 г. – Киев: АТМ України.– 2019. – С. 145–147.

Надійшла 10.06.21

References

1. Nezhebovskiy, V. V, Riabchenko, S. V. (2021). Profilne shlifuvannia zubchatykh kolis vuhledobuvnykh kombayniv [Profile grinding of gear wheels of coal mining combines]. Proceedings from Modern issues of production and repair in industry and transport'21: XXI Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi seminar (15–19 bereznya 2021 roku) – 21st International Scientific and Technical Seminar. (pp. 139–141). Lviv–Kyiv: ATM Ukraine [in Ukrainian].
2. Larshin, V. P., & Lishchenko, N. V. (2003). Optimizatsiia protsessa zuboshlifovaniia na stankakh, rabotaiushchikh po metodu obkata. *Trudy Odesskoho politekhnicheskoho universiteta – Proceedings of the Odessa Polytechnic University*, 2, 20, 57–61 [in Russian].
3. Kalashnikov, A. S. (2009). Sovremennye metody chistovoi obrabotki zubiev tsilindricheskikh koles. *Metalloobrabotka – Metalworking*, 6, 38–42 [in Russian].
4. Riabchenko, S. V., & Sereda, G.V. (2011). Abrazivnye kruhi dlia shlifovaniia zubchatykh koles. *Oborudovanie i instrument dlia professionalov – Equipment and tools for professionals*, 6 (142), 54–56 [in Russian].
5. Riabchenko, S. V. (2014). Shlifovanie zubchatykh koles tarelchatymi kruhami iz STM. *Sverkhtverdye materialy – Superhard materials*, 6, 81–89 [in Russian].
6. Starkov, V. K. (2007). *Shlifovanie vysokoporistymi kruhami*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
7. Larshin, V. P., Lishchenko, N. V., Riabchenko, S. V., et al. (2016). Profilnoe shlifovanie zubchatykh koles vysokoporistymi abrazivnymi kruhami. *Oborudovanie i instrument dlia professionalov – Equipment and tools for professionals*, 5(190), 20–23 [in Russian].
8. Pashchenko, E. O., Riabchenko, S. V., Shatokhin, V. V., Kukharenko, S. A. 2019. Pravliachi instrumenty z CVD-almazu dlia abrazivnoho shlifuvannia zubchastykh kolis. Proceedings from Modern issues of production and repair in industry and transport'19: XIX Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi seminar (18–22 fevralia 2019 roku) – 19th International Scientific and Technical Seminar. (pp. 145–147). Kosice–Kyiv: ATM Ukraine [in Ukrainian].