

*Д. Г. МУЗИЧКА*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ ПРИ ОБРОБЦІ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ

Одним з прогресивних методів чистової обробки твердих сплавів є шліфування алмазними кругами. Підвищення продуктивності алмазного шліфування при забезпеченні якості обробленої поверхні та збереженні високих показників працездатності кругів є важною задачею машинобудування. Розглянуто вплив режимів обробки на вихідні параметри плоского шліфування торцем круга твердих сплавів. Працездатність алмазних шліфувальних кругів на металевій та полімерній зв'язках оцінювалася показниками: відносною витратою надтвердих матеріалів, продуктивністю шліфування, параметрами шорсткості обробленої поверхні зразків, питомою собівартістю обробки. В основу проведення експериментів покладено метод одночасного варіювання параметрами режимів різання. Отримані комплексні залежності, які дозволяють розрахувати відносну витрату алмазів, питому собівартість обробки, параметри шорсткості від режимів різання. Установлено, що при обробці на чорнових режимах різання для забезпечення підвищеної продуктивності доцільно застосовувати шліфувальні круги на металевих зв'язках, а на чистових операціях для забезпечення потрібної шорсткості застосовувати круги на полімерних зв'язках.

**Ключевые слова:** тверді сплави; алмазний шліфувальний круг; зв'язка; працездатність; відносна витрата; продуктивність; шорсткість; собівартість.

*Д. Г. МУЗИЧКА*

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Одним из прогрессивных методов чистовой обработки твердых сплавов является шлифование алмазными кругами. Повышение производительности алмазного шлифования при обеспечении качества обрабатываемой поверхности и сохранении высоких показателей работоспособности кругов является важной задачей машиностроительного производства. Рассмотрено влияние режимов обработки на выходные параметры плоского шлифования торцом круга твердых сплавов. Работоспособность алмазных шлифовальных кругов на металлической и полимерной связках оценивалась показателями: относительным расходом сверхтвердых материалов, производительностью шлифования, параметрами шероховатости обрабатываемой поверхности образцов, удельной себестоимостью обработки. В основу проведения экспериментов положен метод одновременного варьирования параметрами режимов резания. Получены комплексные зависимости, позволяющие рассчитать относительный расход алмазов, удельную себестоимость обработки, параметры шероховатости от режимов резания. Установлено, при обработке на черновых режимах резания для обеспечения повышенной производительности целесообразно применять шлифовальные круги на металлических связках, а на чистовых операциях для обеспечения требуемой шероховатости применять круги на полимерных связках.

**Ключові слова:** твердые сплавы; алмазный шлифовальный круг; связка; работоспособность; относительный расход; производительность; шероховатость; себестоимость.

*D. G. MUZYCHKA*

## PERFORMANCE RESEARCH OF GRINDING WHEELS IN CEMENTED CARBIDE COMPOSITIONS MACHINING

One of the progressive methods of cemented carbide compositions finishing of is grinding with diamond wheels. The productivity improvement of diamond grinding while ensuring the quality of the treated surface and high performance maintaining of wheels is an important task of machine-building production. The influence of machining modes on the output parameters of surface grinding with the wheel face of cemented carbide compositions has been considered. The performance of diamond grinding wheels on metal and polymer bonds was evaluated by the following indicators: specific consumption of superhard materials, grinding performance, roughness parameters of the machining sample surface and the specific cost of machining. The experiments were based on the method of simultaneous variation of the parameters of cutting conditions. Complex dependencies for calculation the relative consumption of diamonds, the specific cost of machining and roughness parameters of cutting conditions have been obtained. It was found that in machining on rough cutting conditions, it is advisable to use grinding wheels on metal bonds to ensure improved productivity, and to use the wheels on polymer bonds on finishing operations to ensure the required roughness.

**Key words:** cemented carbide compositions; diamond grinding wheel; bond; performance; specific consumption; operating efficiency; roughness; cost.

**Введение.** За останні десятиріччя обсяг різних типів інструментальних матеріалів для лезового інструменту, споживаного металообробними виробництвами технологічно розвинених країн, сильно змінився. Практично не використовуються для виготовлення лезового інструменту вуглецеві і леговані інструментальні сталі. Помітно знизилася споживання швидкорізальних сталей з 65–70 % до 35–40 %, у той час як обсяги використання твердих сплавів збільшилися з 30 до 55 % [1].

Застосування твердих сплавів в якості інструментального матеріалу дає великий економічний ефект. Маючи високу твердість, теплостійкість і зносостійкість, тверді сплави дозволили підвищити у

декілька разів швидкість різання при механічній обробці металів і неметалічних матеріалів, отримати високу чистоту оброблених поверхонь, тривалий час працювати без переточування. Проте внаслідок порівняно малої в'язкості і низької теплопровідності тверді сплави погано шліфуються, оскільки при їх обробці у результаті дії високих локальних температур на оброблюваній поверхні можлива поява мікротріщин, структурних і фазових перетворень, небажаної залишкової напруги та ін.

Застосування при шліфуванні твердих сплавів інструментів з традиційних абразивів недоцільно внаслідок швидкої втрати ними різальної здатності і, як результат, відносно низької продуктивності обробки.

© Д. Г. Музичка, 2018

Одним з прогресивних методів їх обробки є шліфування алмазними кругами, які знижують теплову напруженість процесу і забезпечують високу якість і точність оброблюваної поверхні. Маючи високу твердість і міцність, малі кути різання при вершинах, підвищену зносостійкість, ці інструменти дають можливість істотно підвищити якість і продуктивність процесів шліфування.

Ефективність експлуатації абразивних інструментів, особливо з надтвердих матеріалів, значною мірою визначаються витратами на інструмент, які залежать від інтенсивності зносу. Знос кругів безпосередньо впливає на вартість продукції, можливості автоматизації і темпи виробництва, а також визначає якість оброблюваних деталей. Тому вивченню механізму зносу шліфувальних кругів і виявленню шляхів його зниження присвячені численні дослідження, більшість яких носять емпіричний характер і спрямовані на практичне рішення конкретних технологічних завдань.

Найважливішим технологічним показником експлуатаційних властивостей шліфувального круга є відносна або питома витрата алмазів. Порівняльний аналіз відносної або питомої витрати алмазів при різних методах шліфування твердих сплавів [2–8] показав, що експериментальні дані суперечливі та залежать від умов експерименту.

У даному дослідженні розглянуто вплив режимів шліфування на вихідні параметри при шліфуванні твердих сплавів алмазними кругами.

**Методика експериментальних досліджень.** Працездатність шліфувальних кругів оцінювалася за наступними показниками: відносній витраті надтвердих матеріалів (НТМ)  $q_p$ , мг/г, продуктивності шліфування  $Q$ , мм<sup>3</sup>/хв., параметрам шорсткості обробленої поверхні зразків, питомої собівартості обробки  $C_v$ , грн./см<sup>3</sup>. Для оцінювання якості обробленої поверхні вибрані наступні показники шорсткості: середнє арифметичне відхилення профілю  $Ra$ , мкм; найбільша висота профілю  $R_{max}$  ( $Rt$ ), мкм; середній крок мікронерівностей  $S_m$ , мкм; відносна опорна довжина профілю  $t_p$ , %.

Для встановлення взаємозв'язку параметрів режимів різання з одного боку і відносного зносу і показників шорсткості – з іншого, обробляли тверді сплави ВК6 та Т15К6 з розмірами перерізу 7×15 мм<sup>3</sup>.

Дослідження впливу режимів різання на показники працездатності алмазних кругів виконувалося при шліфуванні зразків твердих сплавів на універсально-заточувальному верстаті ЗД642Е. При цьому твердий сплав марки Т15К6 оброблявся

алмазним кругом 12А2-45° 150×32×10×3 АС6 125/100 100 % на полімерній зв'язці В2-01, а твердий сплав марки ВК6 – кругом 12А2-45° 125×32×10×3 АС4 200/160 100 % на металевій зв'язці М1-04. Обробка велася з охолодженням 5 %-вим розчином Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> з додаванням 0,5 % NaNO<sub>2</sub>. Для зменшення впливу стану поверхні алмазовмісного шару на результати досліджень при переході на новий режим круги правилися.

Оскільки відносна витрата НТМ є одним з основних показників працездатності шліфування, то для розрахунку цього критерію застосовувався метод безпосереднього лінійного виміру зносу профілю круга до і після шліфування. Лінійний знос кругів вимірювався на спеціальному вимірювальному пристосуванні, сконструйованому на базі інструментального мікроскопа БМИ-1Ц та проєкційного вертикального вимірювача довжини ИЗВ-3. Вимірювання проводилися у шести рівнорозташованих радіальних перерізах. Вимір шорсткості обробленої поверхні проводився на профілометрі MITUTOYO SurfTest SJ-201.

В основу проведення експериментів покладено метод одночасного варіювання параметрами режимів різання: швидкості  $V$ , подовжньої подачі  $S_{пр}$ , поперечної подачі  $S_{п}$  [9]. Функціональна залежність параметра  $A$ , який має функціональний зв'язок з режимами різання, описується формулою:

$$A = C \cdot V^n \cdot S_{пр}^y \cdot S_{п}^x \quad (1)$$

Коефіцієнти рівняння полінома І-го порядку визначалися за допомогою матричного апарату з використанням основної формули:

$$b = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \quad (2)$$

де  $X$  – матриця незалежних змінних  $X(N \times k)$ .

Інтервали варіювання, рівні та натуральні значення факторів наведено у табл. 1. Продуктивність обробки залежно від призначених режимів різання варіювалася в діапазоні 450–1500 мм<sup>3</sup>/хв.

**Обробка результатів дослідження.** Після обробки експериментальних даних отримані двох- і трьохфакторні залежності відносної витрати НТМ від режимів різання:

– для круга на металевій зв'язці М1-04:

$$q_{p1} = 10,252 \cdot S_{пр}^{0,657} \cdot S_{п}^{0,664}, \quad (3)$$

– для круга на полімерній зв'язці В2-01:

$$q_{p2} = 18,376 \cdot V^{-0,065} \cdot S_{пр}^{0,601} \cdot S_{п}^{0,6} \quad (4)$$

Таблиця 1 – Умови обробки, рівні та інтервали варіювання факторів

Рівень	Круг 12А2-45° 125×32×10×3 АС4 200/160 М1-04 100%; ВК6			Круг 12А2-45° 150×32×10×3 АС6 125/100 В2-01 100%; Т15К6		
	$V$ , м/с	$S_{пр}$ , м/хв.	$S_{п}$ , мм/подв.хід	$V$ , м/с	$S_{пр}$ , м/хв.	$S_{п}$ , мм/подв.хід
Верхній (+)	16,5	0,5	0,2	25	0,5	0,2
Середній (0)	16,5	0,4	0,15	20	0,4	0,15
Нижній (-)	16,5	0,3	0,1	15	0,3	0,1

Аналіз ступеневих залежностей відносного зносу показав, що найбільший вплив на показники працездатності алмазних кругів при обробці твердих сплавів мають поперечна і подовжня подачі: показники ступеню у формулах (3) та (4) знаходяться у межах 0,657–0,664 для металевій зв'язці і 0,6–0,601 – для полімерної. При цьому вплив поперечного і подовжного подання практично рівнозначний, що дозволяє зробити висновок про залежність показників працездатності кругів від продуктивності процесу шліфування незалежно від поєднання значень подач. Вплив швидкості різання на показники працездатності алмазних кругів нижчий, ніж вплив продуктивності, про що свідчить показник ступеню при швидкості різання  $n = -0,065$ .

Аналіз впливу швидкості різання на питому витрату алмазів показав, що при шліфуванні пластин твердого сплаву Т15К6 кругами на полімерній зв'язці В2-01 у інтервалі швидкостей  $V = 15\text{--}25$  м/с спостерігалось незначне зниження відносної витрати НТМ: від 2,85 до 2,75 мг/г. Збільшення швидкості різання зменшує відносну витрату алмазів (у досліджуваному діапазоні), оскільки при цьому зменшується товщина зрізаного шару, що доводиться на одне зерно, зростає кількість зерен, які беруть участь у зніманні матеріалу в одиницю часу. Отже, сили різання і теплонапруженість процесу обробки зменшуються.

При обробці твердого сплаву Т15К6 з однаковою продуктивністю, але при різних поєднаннях подовжньої і поперечної подач у межах 0,3–0,5 м/хв. та 0,1–0,2 мм/подв.хід відповідно, зі збільшенням швидкості різання відносна витрата також зменшувалася незначно і його величина при різних варіантах подач змінювалася не істотно.

Аналіз впливу поперечної і подовжньої подач на питому витрату алмазів показав, що в дослідженому діапазоні він зростає пропорційно зніманню: чим вище продуктивність обробки, тим більше витрата алмазів. Так, збільшення поперечної подачі у два рази (з 0,1 до 0,2 мм/подв.хід) при обробці твердих сплавів ВК6 і Т15К6 (при  $V = 16,5$  м/с,  $S_{np} = 0,4$  м/хв.) збільшує відносну витрату алмазів у 1,58 рази для круга на металевій зв'язці М1-04 та у 1,52 рази – для круга на

полімерній В2-01. Збільшення подовжньої подачі з 0,3 до 0,5 м/хв. приводить до збільшення відносної витрати алмазів у 1,40 рази для круга на металевій зв'язці М1-04 та у 1,36 рази – для круга на полімерній В2-01 (при  $V = 16,5$  м/с;  $S_{np} = 0,15$  мм/подв.хід).

Збільшення подовжньої або поперечної подач приводить до збільшення сил різання, оскільки середньовірогідна товщина шару, що зрізується одним зерном,  $a_z$  і глибина закладення зерна  $\varepsilon$  зростають. Круги на полімерній зв'язці зношуються інтенсивніше, ніж на металевій, що пояснюється фізико-механічними параметрами зв'язок (межа міцності зв'язки на стиск, теплопровідність, температуропровідність, коефіцієнт лінійного температурного розширення), а значить алмазоутриманням.

Збільшення подач пов'язано з підвищенням інтенсивності шліфування, і, отже, з підвищенням питомої витрати НТМ. Тому для виявлення оптимальних умов шліфування необхідно оцінювати питомі витрати. Один з основних критеріїв економічності процесу шліфування – питому собівартість обробки  $C_V$  – розраховували за методикою [10].

Основні технологічні витрати при обробці твердих сплавів алмазним шліфувальним інструментом складаються з витрат на алмазний шліфувальний інструмент і вартості робочої сили. На рис. 1 приведені витрати на робочий інструмент (крива  $C_a$ ), віднесені до 1 см<sup>3</sup> знятого матеріалу, витрати на оплату праці робочої сили (крива  $C_{зп}$ ), і загальна питома собівартість видалення 1 см<sup>3</sup> матеріалу (крива  $C_V$ ) залежно від продуктивності шліфування  $Q$ .

Аналіз графіків (рис. 1, а) показав, що загальна питома собівартість обробки  $C_V$ , будучи функцією продуктивності, має чітко виражений мінімум. З підвищенням продуктивності обробки витрати на алмазний інструмент, віднесені до одиниці знятого твердого сплаву, зростають, а витрати, пов'язані з витратами на оплату праці робочої сили, зменшуються. Так, при обробці твердого сплаву ВК6 алмазним кругом 12А2-45° 125×32×10×3 АС4 200/160 200 % на металевій зв'язці М1-04 мінімальна питома собівартість досягається при продуктивності 450 мм<sup>3</sup>/хв. і відносній витраті алмазів 1,00 мг/г.

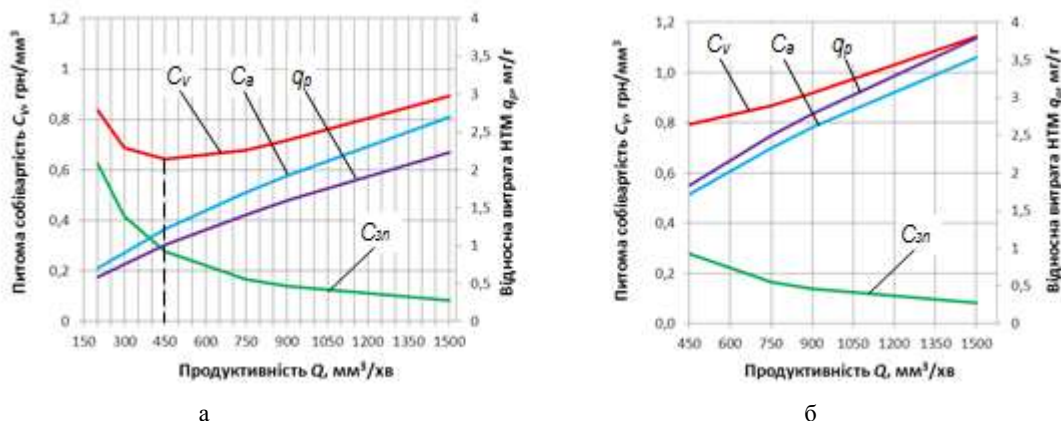


Рис. 1 – Залежність питомої собівартості обробки  $C_V$ , грн./мм<sup>3</sup>, і відносної витрати алмазів  $q_p$ , мг/г, від продуктивності  $Q$ , мм<sup>3</sup>/хв., при обробці: а – твердого сплаву ВК6; б – твердого сплаву Т15К6

Подальше збільшення продуктивності призводить до росту питомої собівартості обробки, оскільки витрати на алмазний інструмент вже не компенсуються підвищенням продуктивності обробки і зниженням витрат на оплату праці робочої сили. Отже, круги на металевій зв'язці доцільно застосовувати для забезпечення високої продуктивності при заданій якості оброблюваної поверхні.

При обробці твердого сплаву Т15К6 алмазним кругом 12А2-45° 150×32×10×3 АС6 125/100 100 % на полімерній зв'язці В2-01 у досліджуваному діапазоні мінімум кривий  $C_V$  не спостерігається внаслідок підвищеної витрати алмазів. В порівнянні з кругом на металевій зв'язці М1-04 у круга на полімерній зв'язці В2-01 при обробці твердих сплавів з однаковою продуктивністю спостерігається збільшення відносної витрати НТМ у 2,7–3,7 рази. Висока витрата алмазів і відсутність мінімальної питомої собівартості обробки твердих сплавів у вказаному діапазоні продуктивностей свідчить про неефективне використання кругів на полімерних зв'язках на продуктивніших операціях шліфування. Таким чином, рекомендована сфера застосування цих кругів – менш навантажені операції шліфування.

Двох- і трьохфакторні залежності показників якості оброблюваної поверхні від режимів різання, отримані після обробки експериментальних даних, мають вигляд:

а) середнє арифметичне відхилення профілю  $Ra$ :  
– для круга на металевій зв'язці М1-04:

$$Ra_1 = 5,796 \cdot S_{np}^{1,258} \cdot S_n^{0,88}; \quad (5)$$

– для круга на полімерній зв'язці В2-01:

$$Ra_2 = 105,086 \cdot V^{-1,414} \cdot S_{np}^{0,755} \cdot S_n^{0,624}; \quad (6)$$

б) найбільша висота профілю  $R_{max}$  ( $Rt$ ):  
– для круга на металевій зв'язці М1-04:

$$R_{max_1} = 31,898 \cdot S_{np}^{1,205} \cdot S_n^{0,664}; \quad (7)$$

– для круга на полімерній зв'язці В2-01:

$$R_{max_2} = 763,912 \cdot V^{-0,967} \cdot S_{np}^{1,137} \cdot S_n^{0,971}; \quad (8)$$

в) середній крок мікронерівностей  $Sm$ :

– для круга на металевій зв'язці М1-04:

$$Sm_1 = 176,417 \cdot S_{np}^{0,441} \cdot S_n^{0,412}; \quad (9)$$

– для круга на полімерній зв'язці В2-01:

$$Sm_2 = 2086 \cdot V^{-0,627} \cdot S_{np}^{0,415} \cdot S_n^{0,397}; \quad (10)$$

г) відносна опорна довжина профілю  $t_p$ :

– для круга на металевій зв'язці М1-04:

$$t_{p_1} = 58,289 \cdot S_{np}^{-0,158} \cdot S_n^{-0,076}; \quad (11)$$

– для круга на полімерній зв'язці В2-01:

$$t_{p_2} = 61,045 \cdot V^{-0,143} \cdot S_{np}^{-0,263} \cdot S_n^{-0,166}. \quad (12)$$

Відомо, що між приведеними параметрами існує взаємозв'язок. Аналіз залежностей, проведений автором [11, 12], показав, що кожна з отриманих дослідниками формул відображає окремі випадки обробки різних матеріалів. Виконані в цій роботі дослідження дозволили встановити залежність параметрів  $Sm$  та  $t_p$  від  $Ra$ .

Після узагальнення експериментальних даних за визначенням параметрів шорсткості при шліфуванні твердих сплавів з різними режимами різання і проведення математичної обробки, отримані статистичні залежності апроксимувалися різними функціями. Оцінюючи відносну похибку апроксимації, з отриманих функцій вибирали оптимальну (табл. 2).

Аналіз отриманих залежностей показав, що з ростом параметра  $Ra$  крок мікронерівностей  $Sm$  збільшується і залежить від марки оброблюваного матеріалу: чим вище твердість, тим більше крок мікронерівностей. Зі зростанням параметра  $Ra$  відносна опорна довжина профілю  $t_{50}$  зменшується.

Найбільш суттєвий вплив на шорсткість оброблюваної поверхні робить швидкість різання. При збільшенні швидкості круга збільшується кількість зерен, які беруть участь у зніманні припуску в одиницю часу. При цьому зменшується товщина шару, яка знімається одним різальним зерном, і сила різання, що призводить до зниження шорсткості оброблюваної поверхні.

Таблиця 2 – Вид апроксимуючих функцій параметрів  $Sm$  і  $t_p$  від  $Ra$

Характеристика інструменту	Оброблюваний матеріал	Параметр шорсткості	Вид функції	Похибка апроксимації $R^2$
12А2-45° 125×32×10×3 АС4 200/160 100% М1-04	ВК6	середній крок мікронерівностей $Sm = f(Ra)$	$24,629 + 103,5Ra - 54,148Ra^2$	0,9795
		відносна опорна довжина профілю $t_p = f(Ra)$	$91,696 - 53,81Ra + 39,233Ra^2$	0,9654
12А2-45° 150×32×10×3 АС6 125/100 100% В2-01	Т15К6	середній крок мікронерівностей $Sm = f(Ra)$	$27,07 + 382,84Ra - 250,02Ra^2$	0,9950
		відносна опорна довжина профілю $t_p = f(Ra)$	$105,74 - 216,96Ra + 260,58Ra^2$	0,9806

При обробці твердого сплаву Т15К6 з продуктивностями 450, 900 та 1500 мм<sup>3</sup>/хв. збільшення швидкості різання з 15 до 25 м/с зменшило показники шорсткості  $R_a$  і  $R_{max}$  у 2,06 та 1,64 рази відповідно для кожної зі вказаних продуктивностей.

Аналогічний вплив на параметри  $R_a$  і  $R_{max}$  має швидкість різання при обробці з однаковою продуктивністю, але з різним поєднанням подовжньої і поперечної подач: зі збільшенням швидкості круга висотні параметри шорсткості зменшуються, проте, для одного і того ж значення швидкості спостерігаються різні значення показників.

Аналіз отриманих залежностей як параметра  $R_a$ , так і  $R_{max}$ , показав, що, більшою мірою впливає подовжня подача, ніж поперечна, про що свідчить більше значення ступеневого показника у формулах (6) та (8).

Враховуючи, що при заточувальних і довідних операціях на поверхнях твердосплавного різального інструменту вимагається забезпечити шорсткість з параметром  $R_a = 0,08-0,32$  мкм, для зниження шорсткості рекомендується збільшити швидкість різання або зменшити продуктивність обробки шляхом підбору значень подач, що забезпечують необхідну шорсткість і якість оброблюваної поверхні.

Вплив подовжньої і поперечної подач на показники шорсткості  $R_a$  та  $R_{max}$  носять однаковий якісний характер: зі збільшенням подовжньої або поперечної подачі значення висотного показника шорсткості зростає. При цьому, як було вказано раніше, вплив подовжньої подачі переважає над впливом поперечної подачі. При збільшенні поперечної подачі різальні зерна, що найбільш виступають, занурюються в оброблюваний матеріал на велику глибину і залишають на поверхні виробу глибші й ширші сліди. Збільшення подовжньої і/або поперечної подач приводить до збільшення перерізу зрізу, при цьому зростає сила різання і знижується зносостійкість шліфувального круга. Усе це веде до збільшення шорсткості незалежно від марки оброблюваного матеріалу.

Зі збільшенням подовжньої подачі у діапазоні від 0,3 до 0,5 м/хв. при обробці твердого сплаву ВК6 алмазним кругом на металевій зв'язці М1-04 середнє арифметичне відхилення профілю  $R_a$  зростає у 1,9 рази, а найбільша висота профілю  $R_{max}$  – у 1,85 рази; при обробці твердого сплаву Т15К6 кругом на полімерній зв'язці В2-01 збільшення тих же показників шорсткості складо:  $R_a$  – у 1,5 рази,  $R_{max}$  – у 1,8 рази.

Зі збільшенням поперечної подачі у діапазоні від 0,1 до 0,2 м/хв. при обробці твердого сплаву ВК6 алмазним кругом на металевій зв'язці М1-04 параметр  $R_a$  збільшився у 1,84 рази, а параметр  $R_{max}$  – у 1,58 рази; при обробці твердого сплаву Т15К6 кругом на полімерній зв'язці В2-01 збільшення складо:  $R_a$  – у 1,54 рази,  $R_{max}$  – у 1,96 рази.

Отже, для зниження шорсткості рекомендується зменшити значення подовжньої і/або поперечної подач, що приведе до зниження продуктивності

обробки, яка забезпечує необхідну шорсткість і якість оброблюваної поверхні.

Таким чином, обробка твердих сплавів кругом на полімерній зв'язці В2-01 дозволяє отримати поверхню з шорсткістю нижчою, ніж після обробки кругом на металевій зв'язці М1-04. Це пов'язано з наявністю у полімерних зв'язок деякої еластичності, що забезпечить меншу шорсткість обробленої поверхні.

**Висновки.** В результаті обробки експериментальних даних отримані комплексні залежності, що дозволяють розрахувати відносну витрату алмазів, питому собівартість обробки, параметри шорсткості від режимів обробки. При цьому встановлено, що вплив поперечної і подовжньої подач на відносний знос алмазів практично рівнозначний. Це дозволяє зробити висновок про залежність показників працездатності кругів від продуктивності процесу шліфування незалежно від поєднання значень подач.

Аналіз отриманих комплексних залежностей параметрів шорсткості оброблених поверхонь твердих сплавів від режимів обробки показав, що для зниження шорсткості необхідно збільшити швидкість різання або зменшити подовжню і/або поперечну подачі, проте їх зменшення приведе до зниження продуктивності обробки.

Для обробки на чорнових режимах різання, коли потрібно забезпечити підвищену продуктивність обробки, доцільно застосовувати шліфувальні круги на металевих зв'язках, а на чистових операціях, коли необхідно отримати задану шорсткість, – використовувати шліфувальні круги на полімерних зв'язках.

#### Список литературы

1. Верещака А. С., Кушнер В. С. *Резание материалов: Учебник*. Москва: Высшая школа, 2009. 535 с.
2. Петруха П. Г., Каленов В. Н., Ленский В. В. Алмазное шлифование вольфрамового сплава ВПМ. *Финишная обработка абразивно-алмазными инструментами*. 1973. С. 132–134.
3. Захаренко И. П. *Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента*. Київ: Наукова думка, 1981. 300 с.
4. Галицкий А. Н., Курищук А. В., Муровский В. А. *Алмазно-абразивный инструмент на металлургических связках для обработки твердого сплава и стали*. Київ: Наукова думка, 1986. 144 с.
5. Захаренко И. П. *Алмазные инструменты и процессы обработки*. Київ: Техніка, 1980. 215 с.
6. Булошников В. С., Малевский Н. П., Попов С. А., Л. С. Сенченкова. Глубинное шлифование многогранных пластинок из твердого сплава. *Труды Московского высшего технического училища им. Н. Э. Баумана*. Москва, 1974. С.119–129.
7. Захаренко И. П., Савченко Ю. А., Лавриненко В. И., Дегтяренко С. М. *Прогрессивные методы абразивной обработки металлов*. Київ: Техніка, 1990. 152 с.
8. Попов С. А., Малевский Н. П., Терещенко Л. М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. Москва: Машиностроение, 1977. 314 с.
9. Маргулес А. У. *Резание металлов керметами*. Москва: Машиностроение, 1980. 160 с.
10. Захаренко И. П., Савченко Ю. Я. Алмазно-электролитическая обработка инструмента. Київ: Наукова думка, 1978. 224 с.
11. Лавриненко В. И. Электрошлифование инструментальных материалов. Київ: Наукова думка, 1993. 156 с.
12. Лавриненко В. И., Лещук И. В., Смоквина В. В., Солод В. Ю., Музыка Д. Г., Орленко С. А. Особенности формирования шероховатости обработанной поверхности при многопроходном и глубинном торцовом шлифовании кругами из СТМ с использованием опорных элементов в виде компактов из КНБ.

Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Матер. 12-го Межд. науч.-техн. семинара (20–24 февраля 2012 г., Свалыва). Киев: АТМ України, 2012. С. 143–145

#### References (transliterated)

1. Vereshhaka A. S., Kushner V. S. *Rezanie materialov: Uchebnik. [Cutting of materials: textbook]*. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 2009. 535 p.
2. Petruha P. G., Kalenov V. N., Lenskij V. V. *Almaznoe shlifovanie vol'framovogo splava VPM [Diamond grinding of tungsten alloy VPM]. Finishnaja obrabotka abrazivno-almaznymi instrumentami*, 1973, pp. 132–134.
3. Zaharenko I. P. *Osnovy almaznoj obrabotki tverdosplavnogo instrumenta [Fundamentals of diamond machining of carbide tools]*. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1981. 300 p.
4. Galickij A. N., Kurishhuk A. V., Murovskij V. A. *Almazno-abrazivnyj instrument na metallicheskih svyazkah dlja obrabotki tverdogo splava i stali [Diamond abrasive tool with metal bonds for machining of cemented-carbide composition and steel]*. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1986. 144 p.
5. Zaharenko I. P. *Almaznye instrumenty i processy obrabotki [Diamond tools and machining processes]*. Kyiv: Tehnika Publ., 1980. 215 p.
6. Buloshnikov V. S., Malevskij N. P., Popov S. A., L. S. Senchenkova. *Glubinnoe shlifovanie mnogogrannyh plastinok iz tverdogo splava [Deep grinding of throwaway sintered-carbide inserts]. Trudy Moskovskogo vysshego tehničeskogo uchilishha im. N. Je. Baumana*. Moscow, 1974, pp. 119–129.
7. Zaharenko I. P., Savchenko Ju. A., Lavrinenko V. I., Degtjarenko S. M. *Progressivnye metody abrazivnoj obrabotki metallov [Progressive methods of abrasive machining of metals]*. Kyiv: Tehnika Publ., 1990. 152 p.
8. Popov S. A., Malevskij N. P., Tereshhenko L. M. *Almazno-abrazivnaja obrabotka metallov i tverdyh splavov [Diamond abrasive machining of metals and cemented-carbide compositions]*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 314 p.
9. Margules A. U. *Rezanie metallov kermetami [Cutting of metals by ]*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 160 p.
10. Zaharenko I. P., Savchenko Ju. Ja. *Almazno-jelektroliticheskaja obrabotka instrumenta [Diamond electrolytic machining of tool]*. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1978. 224 p.
11. Lavrinenko V. I. *Jelektroshlifovanie instrumental'nyh materialov [Electrical grinding of tool materials]*. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1993. 156 p.
12. Lavrinenko V. I., Leshhuk I. V., Smokvina V. V., Solod V. Ju., Muzychka D. G., Orlenko S. A. *Osobennosti formirovanija sherohovatosti obrabotannoj poverhnosti pri mnogoprohodnom i glubinnom torcovom shlifovanii krugami iz STM s ispol'zovaniem opornyh jelementov v vide kompaktoz iz KNB [Features of the formation of the treated surface roughness with multistep and deep face grinding with wheels from SHM using reference elements in the form of compacts from CBN]. Sovremennye problemy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte: Mater. 12-go Mezhd. nauch.-tehn. seminara (20–24 fevralja 2012 g., Svaljava)*. [Modern problems of production and repair in industry and transport: Proc. 12th Int. Sci.-Tech. Seminar (20–24 February 2012, Svalyava)]. Kyiv: AMET of Ukraine, 2012. Pp. 143–145.

Поступила (received) 23.11.2018

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

**Музичка Діана Геннадіївна (Музычка Диана Геннадьевна, Muzychka Diana Gennadyivna)** – кандидат технічних наук, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри технології машинобудування; м. Кам'янське, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2914-9672>; e-mail: muzichka@ua.fm