

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.921

В. І. Лавріненко

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

lavrinen52@gmail.com

Круги з КНБ для шліфування швидкорізальної сталі без охолодження: питома енергоємність обробки та енергетичний коефіцієнт корисної дії

За дослідженнями шліфування швидкорізальної сталі кругами з кубічного нітриду бору показано, що для оцінки енергоефективності шліфування алмазно-абразивними кругами з надтвердих матеріалів (НТМ) важкооброблюваних інструментальних матеріалів через показник питомої енергоємності процесу шліфування, що визначають як відношення ефективної потужності шліфування до продуктивності шліфування, для отримання даних, відповідних процесу обробки, необхідно у показниках питомої енергоємності та енергетичного коефіцієнта корисної дії додатково враховувати зношуваність алмазно-абразивних кругів через показник відносних витрат зерен НТМ в робочому шарі круга під час шліфування. Запропоновано нову залежність для розрахунку енергетичного коефіцієнта корисної дії (ККД) для процесів алмазно-абразивної обробки кругами з НТМ. Показано, що зниження температури в зоні шліфування підвищує енергетичний ККД. Визначено, що для зниження температури в зоні шліфування бажано уникати металічного покриття на зернах НТМ та використовувати підвищену концентрацію зерен НТМ в робочому шарі круга, що, як наслідок, підвищить енергетичний ККД. Останнє підтверджується і аналізом наданої формули розрахунку ККД.

Ключові слова: *питома енергоємність шліфування, енергетичний коефіцієнт корисної дії, швидкорізальна сталь, круги з кубічного нітриду бору.*

В сучасних публікаціях [1–5] дослідники велику увагу приділяють питанням зниження енергоємності процесів механічної обробки. Пов'язано це з тим, що, наприклад, у процесі виготовлення продукції машинобудування питома частка вартості енерговитрат тільки на обробку становить від 15 до 25 % [2], це підтверджують й інші автори. Питома частка енергетичної складової у собівартості машинобудівних виробів раніше не пере-

вищувала 5–7 %, а за останні десятиріччя вона збільшилася до 18–25 % [3] і має тенденцію до подальшого зростання, це відбувається в значній мірі через те, що досягнення необхідної точності обробки потребує збільшення питомої енергії.

Основним напрямом зниження витрат енергії на фізичні процеси у зоні різання є оптимізація режимів обробки за критеріями, пов'язаними з рівнем питомих енерговитрат під час різання. Таким є критерій мінімуму питомої енергомісткості різання [3, 4]

$$e = A_{\text{різ}}/V = N_{\text{різ}}/\Pi_{\text{різ}} = N_{\text{різ}}/(vSt) \rightarrow \min \quad (1)$$

і критерій максимуму енергетичного коефіцієнта корисної дії (ККД) процесу різання

$$K_e = \Delta w V / N_{\text{різ}} = \Delta w / e \rightarrow \max, \quad (2)$$

де $A_{\text{різ}}$ – робота різання; V – об'єм зрізаного шару матеріалу; $N_{\text{різ}}$, $\Pi_{\text{різ}}$ і v – ефективна потужність, продуктивність і швидкість різання відповідно; S – подача; t – глибина різання; Δw – питома енергомісткість оброблюваного матеріалу.

В [4] показано, що для лезової обробки керованими факторами оптимізаційної моделі слугують подача S та швидкість різання v , у якості вхідних факторів, крім глибини різання t та механічних властивостей оброблюваного матеріалу, можуть бути враховані геометрія різця, а також додаткові умови здійснення процесу різання, такі як наявність покриття на різальній пластині чи введення додаткової теплової енергії до зони різання. Останні два фактори за рахунок полегшення умов деформації оброблюваного матеріалу суттєво знижують силове навантаження та питомі енерговитрати у зоні різання [4].

У зв'язку з постійним зростанням вартості енергетичних ресурсів виникає необхідність використання енергозберігаючих технологій, що детально розглянуто в [5]. Для зменшення енергоємності процесів механічної обробки в машинобудуванні використовують додаткові джерела тепла. Ідеальне штучне джерело тепла, що застосовують у технологічному методі поверхневого зміцнення, повинно забезпечувати швидкісне нагрівання металу, піддаватися контролю та регулюванню в строго нормованих дозах в одиницю часу, забезпечувати широкий діапазон температур. Під час вибору методу оброблення велике значення мають питомі витрати енергії на нагрівання одиниці об'єму металу. Найменші витрати енергії (питомі витрати енергії) спостерігають у разі використання електричних джерел тепла ($< 1,0$ Дж/см³), а найбільші – у разі використання плазмових ($4,5$ Дж/см³) та лазерних ($> 6,5$ Дж/см³) джерел тепла [5].

Для аналізу викладеного в [3–5] було розглянуто формулу (2) для визначення критерію максимуму енергетичного ККД процесу різання, в яку входить питома енергомісткість оброблюваного матеріалу (фізичне значення цього терміну не пояснено). В [6] досліджено напрямки зниження енергоємності обробки через запропонований “енергетичний ККД процесу різання”, який є відношенням корисної енергетичної складової до питомої роботи різання. У висновку автор вказує, що корисна енергетична складова для кінцевої обробки, а саме шліфування, має трактуватися як питома теплота плавлення. У [7] наведено конкретні цифри питомої теплоємності різних видів обробки, а також визначено фізичні процеси, які їх характеризують. Так, процеси лезової обробки трактуються як пластична деформація, а процес абразивної обробки (шліфування) – як фізичний процес плавлення. Тобто є

певна аналогія питомої енергоємності абразивної обробки з питомою теплоємністю плавлення.

Разом з тим, протиріччя між значеннями питомої енергоємності (100–1000 кДж/см³) в [7], де відбувалася електроерозійна обробка, яку трактували як фізичний процес випаровування, і даними [5], де питомі витрати енергії, які спостерігали у разі використання електричних джерел тепла, мали значення < 1,0 Дж/см³. Отже, наведені в [5, 7] дані потребують уточнення.

Метою представленої роботи було дослідження енергоємності та енергетичного ККД процесів алмазно-абразивної обробки. Наведене в [3, 6, 7] створює методичну основу для визначення енергетичного ККД, але в [3, 4] не надані конкретні значення K_e , тому автором було досліджено ці параметри для процесів шліфування кругами з надтвердих матеріалів (НТМ).

Питому енергоємність у [8] визначали як роботу різання A , яка витрачається на знімання об'єму оброблюваного матеріалу V , тобто

$$E = A/V,$$

де $A = N\tau$; $V = Q\tau$; N – потужність обробки; τ – час; Q – продуктивність обробки. Тоді $e = \Delta E = N/Q$, Дж/м³. Тут, як і у разі лезової обробки (див. формулу (1)), застосовують відношення ефективної потужності до продуктивності обробки.

В [9] визначено, що енергія у абразивному процесі це є енергія, що витрачається під час шліфування і складається з трьох компонентів: енергії на утворення стружки, енергії на пластичне деформування матеріалу без відділення стружки та енергії, що обумовлюється тертям між площадками зносу на абразивних зернах та оброблюваній поверхні. Під час шліфування чорних металів мінімальна питома енергія складає 124–155 кДж/см³ незалежно від виду сталі [9]. Водночас енергія, що є необхідною для розплавлення одиниці об'єму сталі з твердого стану за температури 25 °С складає лише 75 % від мінімальної вимірної питомої енергії шліфування. Зроблено припущення, що енергія різання матеріалу під час стружкоутворення наближається до енергії, необхідної для плавлення металу, а надлишкова (25 %) енергія витрачається на тертя між стружкою та шліфувальним кругом [9]. Така велика енергія зрушення для утворення стружки викликана великими від'ємними передніми кутами на абразивних зернах. В [9] вказано на зв'язок між енергією шліфування і енергією, необхідною для плавлення обробного матеріалу, а також на те, що для широкого діапазону металів мінімальна питома енергія подрібнення може бути дещо більшою, ніж енергія, необхідна для плавлення одиниці об'єму матеріалу [9].

Для процесів алмазно-абразивної обробки (шліфування) Δw у формулі (2) можна трактувати як питому теплоємність плавлення оброблюваного матеріалу. Таке трактування зустрічається у багатьох дослідників, водночас одні вважають, що питома енергоємність процесу абразивної обробки має бути меншою за теплоємність плавлення [8, 10], інші – більшою [9] або однаковою [6, 7]. Було розглянуто рівняння (2) з врахуванням попередніх досліджень енергетичного ККД, який більший одиниці [8, 10], дорівнює одиниці [6, 7] та $\geq 0,8$ [9]. Отже, вихідні значення енергетичного ККД, що не можуть бути меншими 0,8 для абразивної обробки.

За допомогою формул (1) і (2) було розраховано енергетичний ККД для шліфування для більш-менш однорідного матеріалу, а саме, сталі, її показник питомої теплоти плавлення дорівнює 84 кДж/кг, або у іншій розмірності 0,64 кДж/см³.

У [8] приведено формулу для розрахунку витрат енергії під час механічної обробки. Енергоємність визначали як роботу різання, що витрачається на знімання об'єму оброблюваного матеріалу, тобто як відношення ефективної потужності до продуктивності обробки. Тоді питома енергоємність для шліфування буде мати вигляд

$$\Delta E = 6 \cdot 10^4 N_{\text{эф}} / Q, \text{ кДж/см}^3, \quad (3)$$

де $N_{\text{эф}}$, кВт – ефективна потужність шліфування; Q , мм³/хв – продуктивність шліфування.

Було визначено питому енергоємність для шліфування; для чорнового шліфування вона дорівнює від 20 до 60 кДж/см³, а для чистового – від 60 до 200 кДж/см³ [7], для шліфування сталі Р6М5 – 60 кДж/см³ [1]. Середня питома енергоємність шліфування сталі складає ~ 60 кДж/см³, а питома теплота плавлення сталі – 0,64 кДж/см³. Тобто, під час шліфування у сталь потрапляє в 100 раз більше тепла, ніж це треба для її розплавлення, а енергетичний ККД згідно формули (2) буде складати

$$K_e = \Delta w / \Delta E = 0,64 / 60 = 0,01067.$$

Отже, енергетичний ККД є значно меншим від очікуваного мінімального ККД – 0,8, маємо наявне протиріччя як за питомою енергоємністю шліфування, так і за енергетичним ККД. На це свого часу звертали увагу в [1], де показано, що розрахунок питомої енергоємності шліфування за традиційним показником відношення ефективної потужності шліфування до продуктивності обробки не відповідає реальним енергоємностям процесу алмазно-абразивної обробки і перевищує теплоємність плавлення оброблюваного матеріалу від 10 до 100 разів. Це протиріччя особливо актуальне для процесів шліфування кругами з НТМ, які є високовартісними і потребують економічно обґрунтованого застосування, виправданого насамперед зниженням енергетичних витрат під час обробки. Саме для пошуку шляхів вирішення вказаного вище протиріччя треба оцінювати питому енергоємність алмазно-абразивної обробки кругами з НТМ через додаткове врахування зношування робочого шару круга, формула для визначення якої обґрунтовано в [1].

З викладеного вище видно, що для процесів шліфування кругами з НТМ Δw можна трактувати як питому теплоємність плавлення оброблюваного матеріалу. Показник e , а саме – питома енергоємність обробки, згідно запропонованого автором нового підходу до розрахунку, з урахуванням зношування робочого шару круга з НТМ [1], буде мати наступний вигляд:

$$e = E_{\text{пнт}} = 2,4 \cdot 10^7 N_{\text{эф}} q_p / (Q K \gamma_{\text{НТМ}}), \text{ кДж/кг}, \quad (4)$$

де q_p , мг/г – відносні витрати зерен НТМ в крузі під час шліфування; K , % – відносна концентрація зерен НТМ в крузі; $\gamma_{\text{НТМ}}$, г/см³ – густина зерна НТМ.

Енергетичний ККД для процесів шліфування кругами з НТМ буде мати наступний вигляд:

$$K_e = \Delta w / e = \Delta w Q K \gamma_{\text{НТМ}} / (2,4 \cdot 10^7 N_{\text{эф}} q_p), \quad (5)$$

де Δw , кДж/кг – питома теплоємність плавлення оброблюваного матеріалу.

З врахуванням наведеного вище, було оцінено рівень температури у поверхневому шарі швидкорізальної сталі Р6М5 у разі шліфування кругами з кубічного нітриду бору (КНБ) без охолодження, коли рівень температури є найбільшим. Отримані дані порівняли з питомою енергоємністю шліфування за формулами (3) і (4) та значеннями енергетичного ККД за формулою (5) для

процесу шліфування сталі Р6М5 без охолодження кругами з КНБ на різних зв'язках.

Під час експериментів температуру шліфування вимірювали за допомогою ізольованої хромель-алюмелевої термопари (діаметр електродів – 0,1 мм), яку розташовували між двома сталевими пластинами. Тарування термопар проводили за допомогою трубчастої електропечі для мікроаналізу мод. СУОЛ-0,25.11 12 МР-ІЗ. Термо-ЕРС контрольної термопари вимірювали потенціометром ПП-63. Відстань спаю термопари від окрайки пластин, що шліфували, реєстрували за допомогою інструментального мікроскопа.

Зразки пластин зі сталі Р6М5 розміром 5(2,5–2,5)×30×60 мм шліфували без охолодження на універсально-заточувальному верстаті мод. ЗВ642 кругами 12А2-45° 125×5×3×32 з різними характеристиками їхнього робочого шару. Режими шліфування були наступними: швидкість круга – 25 м/с; подовжня подача – 2,4 м/хв; поперечна подача – 0,05 мм/ПДВ; продуктивність шліфування складала 600 мм³/хв.

В процесі дослідження аналізували рівень температури в глибині пластин по мірі наближення спаю термопар до зони шліфування (табл. 1).

Таблиця 1. Рівень температури на різних відстанях від зони різання у разі шліфування сталі Р6М5 кругами з КНБ

Характеристика робочого шару круга	Т, °С на відстані від оброблюваної поверхні, мм						
	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8
КР 100/80 ПК-03 100	510	380	305	290	275	250	215
КР 80/63 В2-08 100	525	260	225	210	180	150	120
КР 100/80 К17 100	605	285	245	225	215	200	185
КР 80/63 В1-13 100	610	425	300	270	240	225	–

Найбільший рівень температур в зоні шліфування спостерігали для кругів на металополімерній зв'язці – В1-13, трохи менший – на керамічній зв'язці К17, відчутно менший – на полімерній зв'язці В2-08 і найменший – на полімерно-керамічній зв'язці ПК-03. Для порівняння досліджували рівень температури безпосередньо на поверхні пластин у разі застосування абразивного круга з електрокорунду білого з характеристикою абразивного шару 25А25СМ1К8. Температура в зоні обробки складала 750 °С. Тобто, для всіх наведених вище кругів з КНБ за продуктивності шліфування 600 мм³/хв не було перевищення температури припалу швидкорізальної сталі Р6М5 (620 °С [11]) на відміну від круга з електрокорунду, де припикання спостерігали на обробленій поверхні сталі.

Аналізували рівень зменшення температури в масиві сталі Р6М5 на різних відстанях від зони шліфування для кругів з такими ж характеристиками робочого шару (табл. 2). Якщо порівняти дані табл. 1 і 2, то видно, що круг на керамічній зв'язці К17, який був на третьому місці за рівнем температури в зоні різання, за рівнем зменшення температури є найкращим. Водночас, круг на полімерній зв'язці В2-08 як за рівнем температури, так і за рівнем їхнього зменшення є найкращим. Було виявлено, що найгірша за рівнем температури в зоні шліфування металополімерна зв'язка В1-13 спочатку є також гіршою за рівнем зменшення температури, ніж вказані вище зв'язки, але вже на рівні 0,6 мм в глибині сталі навіть випереджає зв'язку В2-08. А полімерно-керамічна зв'язка ПК-03, яка є кращою за меншим рівнем температури в зоні

шліфування, навпаки за рівнем зменшення температури є найгіршою. Тобто вона гірше, ніж інші, забирає тепло із зони шліфування.

Таблиця 2. Рівень зменшення температури ΔT на різних відстанях від зони різання у разі шліфування сталі Р6М5 кругами з КНБ

Характеристика робочого шару круга	$\Delta T, ^\circ\text{C}$ на відстані від оброблюваної поверхні, мм						
	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8
КР 100/80 К17 100	0	320	360	380	390	405	520
КР 80/63 В2-08 100	0	285	300	315	345	375	405
КР 80/63 В1-13 100	0	185	310	340	370	385	–
КР 100/80 ПК-03 100	0	130	205	220	235	260	295

Найбільший рівень температури у зоні шліфування спостерігали у разі застосування металополімерної зв'язки В1-13 (див. табл. 1), тому для неї можна знизити рівень температури збільшенням відносної концентрації зерен КНБ в робочому шарі та застосуванням металізації зерен КНБ. Було встановлено, що у разі застосування металізації зерен КР 80/63 рівень температур в зоні різання не зменшується, а навіть зростає з 610 до 635 $^\circ\text{C}$. Але якщо водночас підвищимо концентрацію зерен зі 100 до 125 %, то рівень температури в зоні шліфування зменшується з 635 до 585 $^\circ\text{C}$. Тобто, у разі застосування металізації зерен підвищуємо рівень температури в зоні шліфування, а у разі підвищення відносної концентрації зерен в робочому шарі круга досягаємо зменшення температури в зоні шліфування.

Було досліджено енергоємність шліфування та енергетичний ККД для вказаних вище умов шліфування сталі Р6М5 кругами з КНБ. Для того, щоби розраховані показники енергоємності та ККД були більш об'єктивними, вихідні дані (ефективна потужність шліфування $N_{\text{еф}}$ та відносні витрати КНБ в крузі під час шліфуванні q_p) для розрахунку було використано для кругів КР 100/80 ПК-03 100 з [12], КР 80/63 В2-08 100 з [13], КР 100/80 К17 100 з [14]. Дані для круга КР 80/63 В1-13 100 отримано автором, оскільки вихідні дані для вказаних умов шліфування в літературі відсутні, бо ця металополімерна зв'язка лише умовно може бути віднесена до зв'язок, що застосовують в кругах під час шліфування без охолодження, але вона має ефект блідінгу (випотівання) води зі зв'язки під час обробки, що може сприяти зменшенню температури шліфування. Розрахунок питомої енергоємності за формулами (3) та (4) наведено в табл. 3.

Аналіз даних табл. 3 свідчить про те, що значення питомої енергоємності шліфування за традиційним показником, розрахованим за формулою (3), дорівнює 21–30 кДж/см^3 , а значення питомої теплоємності плавлення сталі Р6М5 – 0,68 кДж/см^3 , тобто питома енергоємність шліфування більше ніж в 30 разів перевищує питому теплоту плавлення сталі Р6М5. А у разі застосування нового підходу до розрахунку значення питомої енергоємності за формулою (4) отримали більш адекватні значення. Для круга на зв'язці ПК-03 питома енергоємність шліфування складає 72,6 % від питомої теплоємності плавлення сталі Р6М5, для кругів на зв'язках В2-08 та К17 фактично співпадає з нею, а для круга на зв'язці В1-13 питома енергоємність шліфування вже перевищує на 14,3 % питому теплоємність плавлення сталі Р6М5. Отже, саме новий підхід до розрахунку питомої енергоємності шліфування кругами з НТМ дозволяє адекватно її оцінювати.

Таблиця 3. Розрахунок питомої енергоємності для процесу шліфування сталі Р6М5 без охолодження різними кругами з КНБ (вихідні дані [12–14]) з продуктивністю $Q = 600 \text{ мм}^3/\text{хв}$

Характеристика робочого шару круга	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати КНБ в крузі під час шліфування, мг/г	Питома енергоємність шліфування	
			за відношенням (3), $\text{кДж}/\text{см}^3$	за формулою (4), $\text{кДж}/\text{кг}$
КР 100/80 ПК-03 100	0,29 [12]	1,84 [12]	29	61
КР 80/63 В2-08 100	0,21 [13]	3,48 [13]	21	83
КР 100/80 К17 100	0,25 [14]	2,89 [14]	25	83
КР 80/63 В1-13 100	0,30	2,80	30	96

Основні дані з табл. 1–3 та розрахунки енергетичного ККД було зведено у підсумкову табл. 4, що дозволило зробити обґрунтований висновок про наявність відповідності між різними отриманими показниками для процесу шліфування без охолодження швидкорізальної сталі Р6М5 кругами з КНБ.

Таблиця 4. Температура в зоні шліфування $T_{\text{зш}}$, на відстані 1,5 мм від зони шліфування $T_{1,5}$ та їхня різниця ΔT , питома енергоємність за формулою (4) та енергетичний ККД за формулою (5) для процесу шліфування сталі Р6М5 без охолодження різними кругами з КНБ з продуктивністю $Q = 600 \text{ мм}^3/\text{хв}$

Характеристика робочого шару круга	$T_{\text{зш}}, ^\circ\text{C}$	$T_{1,5}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T = T_{\text{зш}} - T_{1,5}, ^\circ\text{C}$	$E_{\text{пит}}, \text{кДж}/\text{кг}$	ККД
КР 100/80 ПК-03 100	510	250	260	61	1,377
КР 80/63 В2-08 100	525	150	375	83	1,012
КР 100/80 К17 100	605	200	405	83	1,012
КР 80/63 В1-13 100	610	225	385	96	0,875

Як свідчить аналіз табл. 4, простежується відповідність між температурою в зоні шліфування, показниками питомої енергоємності та енергетичного ККД. Чим меншою є температура в зоні шліфування, тим меншою є питома енергоємність і тим більшим є енергетичний ККД. Разом з тим, ступінь відведення температури із зони обробки для кругів з КНБ з різними зв'язками не спричиняє однозначного впливу на обидва енергетичні показники. Хоча можна припустити, що для кругів з КНБ зі зв'язкою К17 питома енергоємність шліфування не збільшилася, а енергетичний ККД не зменшився відносно зв'язки В2-08 через те, що саме зв'язка К17 забезпечує найбільше зменшення температури в зоні різання.

ВИСНОВКИ

Дослідження шліфування швидкорізальної сталі кругами з кубічного нітриду бору показало, що для оцінки енергоефективності шліфування алмазно-абразивними кругами з надтвердих матеріалів важкооброблюваних інструментальних матеріалів через показник питомої енергоємності процесу шліфування, який визначається як відношення ефективної потужності шліфування до продуктивності шліфування, для отримання адекватних даних, що відповідають процесу обробки, необхідно у показниках питомої енергоємності та

енергетичного коефіцієнта корисної дії додатково враховувати зношуваність алмазно-абразивних кругів через показник відносних витрат зерен НТМ в робочому шарі круга під час шліфування.

Запропоновано нову формулу для розрахунку енергетичного ККД для процесів алмазно-абразивної обробки кругами з НТМ. Показано, що зниження температури в зоні шліфування підвищує енергетичний ККД.

Доведено, що для зниження температури в зоні шліфування бажано уникати металічного покриття на зернах НТМ та використовувати підвищену концентрацію зерен НТМ в робочому шарі круга, що, як наслідок, підвищить енергетичний ККД. Останній висновок підтверджує і аналіз нової формули розрахунку ККД, з якої видно, що збільшення відносної концентрації зерен збільшує і значення показника енергетичного ККД.

ФІНАНСУВАННЯ

Ця робота була підтримана постійним інституційним фінансуванням. Жодних додаткових грантів на проведення чи керівництво цим дослідженням отримано не було.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автор цієї роботи заявляє, що він не має конфлікту інтересів.

V. I. Lavrinenko

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

CNB wheels for grinding high-speed steel without cooling:
specific processing energy and energy efficiency

The conducted studies, on the example of grinding of high-speed steel with cBN wheels, show that for evaluating the energy efficiency of grinding with SHM diamond abrasive wheels of hard-to-machine tool materials through the indicator of the specific energy intensity of the grinding process, which is defined as the ratio of the effective grinding power to the grinding performance, in order to obtain unconscious data corresponding to the processing process, it is necessary to additionally take into account the wear of diamond abrasive wheels in the indicators of specific energy capacity and energy efficiency due to the indicator of the relative consumption of SHM grains in the working layer of the wheel during grinding. A new dependence is proposed for calculating the energy efficiency for the processes of diamond-abrasive machining with SHM wheels. It is shown that lowering the temperature in the grinding zone increases the energy efficiency. It was determined that in order to reduce the temperature in the grinding zone, it is desirable to avoid metal coating on the SHM grains and to use an increased concentration of SHM grains in the working layer of the wheel, which as a result will increase the energy efficiency. The latter is confirmed by the analysis of the given formula for calculating efficiency.

Keywords: specific energy capacity of grinding, energy efficiency coefficient, high-speed steel, cubic boron nitride wheels.

1. Lavrinenko V.I. To the analysis of the estimate of energy expenditures in the diamond abrasive treatment by wheels from superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 4. P. 285–291.
2. Мироненко Е.В., Клименко Г.П., Калининченко В.В. Общая структура математической модели для определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения. *Резание и инструмент в технологических системах.* 2015. Вып. 85. С. 202–210.
3. Карпов А.В. Об оценке энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием. *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности.* 2014. № 2. С. 61–68.

4. Калініченко В. Комплексний підхід до зниження енерговитрат при токарній обробці на важких верстатах. *Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2023): інженерія, матеріали, технології, транспорт: Збірник наукових доповідей міжнародної конференції*. Луцьк, Україна, 16–18 травня 2023 р. Луцьк: Вежа-Друк, 2023. С. 133–135.
5. Тулупов В.І., Онишук С.Г. Дослідження енергоефективних способів обробки деталей машин. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС–2023): Матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції*. В 2 т. Т. 1. Чернігів: НУ “Чернігівська політехніка”, 2023. С. 90–91.
6. Карпов А.В. К вопросу снижения энергоемкости технологических процессов обработки резанием. *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 2. С. 2–10.
7. Кузнецов А.П. Тепловые процессы в металлорежущих станках. Москва: Техносфера, 2019. 488 с.
8. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общей ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В 10 т. Т. 3. Резание материалов лезвийными инструментами. Одесса: ОНПУ, 2003. 546 с.
9. Malkin S., Joseph N. Minimum energy in abrasive processes. *Wear*. 1975. Vol. 32. P. 15–23.
10. Полянський В.І. Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Харків: НТУ “ХПІ”, 2021. 40 с.
11. Лаврінченко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / під заг. ред. акад. НАН України М.В. Новікова. Київ: ІНМ НАН України, 2013. 456 с.
12. Савченко Ю.Я., Пашенко Е.А., Шило А.Е. Работоспособность кругов из КНБ на основе структурно-наполненного полимерного композита. *Сверхтв. материалы*. 1992. № 2. С. 34–37.
13. Пашенко Е.А., Савченко Ю.Я., Чалый В.Т. Влияние материала корпуса шлифовального круга из СТМ на его работоспособность. *Сверхтв. материалы*. 1995. № 4. С. 60–67.
14. Шепелев А.А., Савченко Ю.Я., Бондарев Е.К., Овчинников В.Л. Высокопроизводительное шлифование без охлаждения быстрорежущих сталей кругами из КНБ. *Сверхтв. материалы*. 1991. № 5. С. 36–41.

Надійшла до редакції 06.07.23

Після доопрацювання 07.08.23

Прийнята до опублікування 09.08.23