

Аналіз наявних даних та оцінка енергоємності процесів механічної обробки

В.І. Лаврінченко¹ • В.Ю. Солод²

Received: 17 October 2022 / Accepted: 14 November 2022

Анотація. Питанням енергоефективності процесів механічної обробки приділяється увага вже протягом останніх 50 років. Пов'язане це з тим, що у порівнянні із іншими галузями промисловості металургія і машинобудування вирізняються високим рівнем енергоємності продукції.

Мета дослідження. Аналіз наявних у літературі показників енергетичних витрат процесів обробки і визначення узгоджених даних з цих показників.

Методика реалізації. Встановлення аналітичної залежності для розрахунку питомої енергоємності алмазно-абразивної обробки кругами з надтвердих матеріалів з урахуванням зв'язку між енергією шліфування і енергією, необхідною для плавлення обробного матеріалу.

Визначено, що енергія різання матеріалу під час стружкоутворення наближається до енергії, необхідної для плавлення металу, а надлишкова величина витраченої енергії шліфування витрачається на тертя між стружкою та шліфувальним кругом. Показано, що в літературі є дані по енергоємності різних обробок: точіння – 2 кДж/см³, фрезерування – 9 кДж/см³, шліфування – 60 кДж/см³, електроіскрова обробка – 3000 кДж/см³. Разом з тим, питома енергоємність шліфування сталі – 60 кДж/см³. А питома теплота плавлення сталі – 0,64 кДж/см³. А відтак, при шліфуванні в сталь закачується в 100 раз більше тепла, аніж це треба для її розплавлення. Тобто наявне протиріччя.

Для пошуку шляхів вирішення цього протиріччя більш вірним є оцінювати питому енергоємність алмазно-абразивної обробки кругами з надтвердих матеріалів через додаткове врахування, окрім продуктивності і ефективної потужності обробки, зношуваності при цьому абразивного шару круга.

Ключеві слова: алмазно-абразивна обробка, питома енергоємність шліфування, питома теплоємність плавлення, абразивний шар круга.

Вступ

Питанням енергоефективності процесів механічної обробки в науковій літературі приділяється певна увага вже протягом останніх 50 років [1–10]. У значній мірі викликано це тим, що у порівнянні із іншими галузями промисловості саме металургія і машинобудування вирізняються високим рівнем енергоємності продукції. Так, раніше у собівартості машинобудівних

виробів питома частка енергетичної складової не перевищувала 5–7 % [1], а ось за останні десятиріччя вона зросла до 18–25 % [1, 2] і має стійку тенденцію до подальшого збільшення. Останнє викликано в значній мірі тим, що досягнення необхідної точності обробки вимагає саме відповідного збільшення величини питомої енергії обробки. Так, в роботі [3] показано, що для досягнення точності обробки в 10 мкм треба витратити 10² Дж/м³, а якщо нам треба досягти точності в 1 нм, то тут вже необхідною є питома енергія в 10⁴ Дж/м³. Все це означає, що енергоємність є важливим елементом оцінки ефективності процесу механічної обробки. Разом з тим, у наявній літературі є певні неузгодженості у як термінах (енергоємність [4, 5], питома енергоємність [1–3, 8], питома робота [3, 6, 8], питома енергія [3, 7, 9]), у розмірностях (Дж/см² [9], Дж/см³, Дж/кг), так і у самих величинах (2·10⁻³ Дж/см³ для точіння і для нього ж (1–10) кДж/см³). Аналогічні

✉ В.І. Лаврінченко
lavrinen52@gmail.com

¹ Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля
НАН України, Київ, Україна

² Дніпровський державний технічний університет
МОН України, Кам'янське, Україна

неузгодженості мають місце і для процесів алмазно-абразивної обробки.

Мета роботи

Саме тому, метою даної статті і був аналіз оцінки показників енергетичних витрат процесів обробки, в першу чергу, алмазно-абразивної обробки кругами з надтвердих матеріалів (НТМ), і вироблення якихось узгоджених даних з цих показників, які би були більше наближені до реального процесу обробки.

Аналіз наявних з літератури даних

Для пошуку шляхів подолання вказаних вище неузгодженостей нами проведений аналіз відомих з літератури даних по енергоємності процесів механічної обробки і, насамперед, процесів алмазно-абразивної обробки.

В роботі [7] показано, що енергія у абразивному процесі, це енергія, що витрачається при шліфуванні, і вона складається з трьох складових: енергії на утворення стружки, на пластичне деформування матеріалу без відділення стружки та енергії, що утворюється внаслідок тертя між площадками зносу на абразивних зернах та обробній поверхні. Автори [7] вказують, що при шліфуванні чорних металів мінімальна питома енергія складає 124–155 кДж/см³ незалежно від виду сталі і звертають увагу на те, що енергія, яка є необхідною для розплавлення одиниці об'єму сталі з твердого стану при 25 °С складає лише 75 % від мінімальної питомої енергії шліфування. Ними зроблено припущення, що енергія видалення матеріалу під час стружкоутворення наближається до енергії, необхідної для плавлення металу, а надлишкова (на 25 %) величина витраченої енергії шліфування витрачається саме на тертя між стружкою та шліфувальним кругом. Така велика енергія зрушення для утворення стружки викликана насамперед великими від'ємними передніми кутами на абразивних зернах. Але тут звернемо увагу на важливу думку, висловлену авторами [7], яка є на наш погляд, слушною і цікавою для подальшого розгляду. Автори вказують на зв'язок між енергією шліфування і енергією, необхідною для плавлення обробного матеріалу. При цьому вони звертають увагу на те, що для широкого діапазону металів мінімальна питома енергія подрібнення може навіть бути дещо більшою, ніж енергія, необхідна для плавлення одиниці об'єму матеріалу.

В роботі [6] автор розглядає енергетичні витрати на руйнування різних матеріалів стосовно абразивної обробки. При цьому енергоємність процесів руйнування і деформації тут визначається питомою роботою, що витрачається на них, тобто відношенню роботи руйнування до об'єму зруйнованого матеріалу. Автор [6] надає конкретні значення питомої роботи руйнування

для деяких матеріалів: для твердого сплаву ця величина склала (HV~2000) – 72 кДж/см³, для загартованої сталі 45 (HV 580) – 53,6 кДж/см³. Для твердого і крихкого матеріалу корунду (HV 2300) питома робота ще нижче – 22 кДж/см³.

В роботі [4] автори надають формулу для розрахунку енергії при механічній обробці. Енергоємність визначається як робота різання (A), що витрачається на знімання об'єму оброблюваного матеріалу (V), тобто: $E = A / V$. Тут $A = N \cdot \tau$, а $V = Q \cdot \tau$ (де N – потужність обробки, τ – час, Q – продуктивність). Тоді питома енергоємність $\Delta E = N / Q$ (розмірність Дж/м³). Автори [4] також звернули увагу на енергію, необхідну для плавлення оброблюваного матеріалу, але висновок вони зробили інший, ніж автори [7]: при механічній обробці руйнування відбувається окремими частинами (стружкою), аніж коли розплавляється весь матеріал, тому останнє вимагає більших витрат енергії. Тобто енергоємність механічної обробки ніяк не може дорівнювати енергоємності плавлення, ба навіть перша значно менша за другу. Але в роботі [4] автори надають дані по енергоємності різних обробок, і це нам може бути нам корисним надалі. Так, вкажемо по мірі збільшення: точіння – 2 кДж/см³, фрезерування – 9 кДж/см³, шліфування – 60 кДж/см³, електроіскрова обробка – 3000 кДж/см³.

Автори роботи [5] в свою чергу визначають енергоємність обробки як відношення роботи різання до об'єму знятого матеріалу і, як наслідок, це зводиться до відношення потужності обробки до її продуктивності. Формулу цього відношення ми вже надавали вище при аналізі роботи [4]. Але автори роботи [5] висувують своє припущення і зводять енергоємність обробки до величини умовного напруження різання. Це припущення є в певній мірі дискусійним. Про це опосередковано свідчать і самі автори, коли вказують, що у зв'язку із інтенсивним тертям зв'язки круга з оброблюваним матеріалом при шліфуванні значення величини умовного напруження різання можуть різнитися від 10 до 100 разів.

В статті [1] є певні уточнення в термінах. В цій роботі питома енергоємність процесу різання (можливі синоніми, що зустрічаються в різних роботах – “питома робота різання”, “питомі енерговитрати різання”, “густина роботи різання”) чисельно характеризує кількість енергії, що витрачається різальним інструментом на відділення у вигляді стружки одиниці об'єму шару (чорнові стадії обробки). Разом з тим, автор [1] вказує на те, що процес різання буде більш ефективним, коли меншою буде величина питомої енергоємності при забезпеченні необхідних результатів обробки (продуктивність, стійкість інструменту, якість обробки). У зв'язку із цим, звернемо увагу, що в жодній, відомій з літератури, формулі питомої енергоємності немає величини стійкості різального інструменту. Тобто виявляється, що інструмент ніяк не впливає на енергоємність обробки. Автор роботи [1] намагався вирішити це

протириччя через висунутий ним “енергетичний коефіцієнт корисної дії (ККД) процесу різання”, який є відношенням саме корисної енергетичної складової до питомої роботи різання. Але це була теоретична спроба, без чіткого практичного вирішення. Разом з тим, для нас тут цікавим є інший висновок автора [1], який вказав на те, що висунута ним корисна енергетична складова для кінцевої обробки (а це саме шліфування) має трактування як питома теплота плавлення.

Вище в останніх роботах головним був теоретичний аспект, а ось в книзі [3] викладені вже конкретні цифри питомої теплоємності різних видів механічної обробки (табл. 1). Разом з тим, в цій же роботі [3] наведені дані і питомої роботи різання для різних способів обробки: точіння – (0,5–0,7) кДж/см³, фрезерування – (5,0–7,5) кДж/см³, шліфування – (55–70) кДж/см³, які вкладаються у ті цифри питомої енергоємності, що наведені в табл. 1. разом з тим, для нас цікавим тут є те, як трактується фізичний процес для різних видів обробки, який їх характеризує (див. табл. 1). Як бачимо, процес абразивної обробки (шліфування) автор [3] трактує як фізичний процес плавлення. Тобто і тут ми бачимо певну аналогію у трактуванні питомої енергоємності абразивної обробки, як питомої теплоємності плавлення оброблюваного матеріалу.

Таблиця 1. Питома теплоємність різних видів обробки [3]

Вид обробки	Фізичний процес	Питома енергоємність обробки, кДж/см ³
Точіння	Пластична деформація	1–10
Фрезерування		1–10
Абразивна різка	Плавлення	10–30
Чорнове шліфування		20–60
Чистове шліфування		60–200
Електроерозійна	Випаровування	100–1000
Електрохімічна	Іонізація	500–2000

Враховуючи наведене вище трактування, розглянемо також висновки однієї з новітніх робіт [10]. Автор цієї роботи також визначає питому енергоємність обробки через питому роботу шліфування, тобто як відношення потужності до продуктивності шліфування і дорівнює її до умовного напруження різання. Через це значення умовного напруження, ми спробуємо оцінити енергоємність: для лезової обробки вона складає (1–7) кДж/см³, для мікрорізання (2–10) кДж/см³, для шліфування – від 10 кДж/см³. Але, на наш погляд, саме тут цікавим є наступний висновок автора [10] як

“...продуктивність обробки можна збільшувати лише в межах збільшення температури різання до температури плавлення оброблюваного матеріалу”. Тобто бачимо, що і автор роботи [10] схиляється до процесу плавлення у трактовці фізичного процесу при алмазно-абразивній обробці.

Вище нами вже зверталася увага на різні трактування поняття енергоємності. На це звертає увагу і автор роботи [8]. На наш погляд, він детально розібрав обидва поняття – питома енергоємність та питома робота шліфування, і вказав на їх недоліки. Автор [8] аналізує питому енергоємність (E), що є відношенням роботи, що витрачається на знімання маси матеріалу, та питомої роботи (A_{num}), яка є відношенням роботи, яка витрачається на знімання об'єму матеріалу. В кінцевому підсумку автор [8] робить висновок, що при порівнянні енергетичних характеристик процесу шліфування більш доцільним є застосування показника питомої енергоємності із розмірністю Дж/кг.

Методика реалізації

Зведемо усі наявні вище дані, залишаючи розмірність – кДж/см³, якою саме і користується переважна частина дослідників. За даними роботи [7] питома енергоємність шліфування складала 124–155 кДж/см³. Автор роботи [6] вказує, що питома робота руйнування сталі складає 56,4 кДж/см³, твердого сплаву – 72 кДж/см³, а корунду – 22 кДж/см³. В роботі [4] питома енергоємність шліфування – 60 кДж/см³. Автор роботи [3] надає такі дані для процесу шліфування: питома теплоємність 20–200 кДж/см³ і питома робота – 55–70 кДж/см³. Видно, що спостерігається певна відповідність даних, і для оцінки питомої енергоємності шліфування діапазон 20–200 кДж/см³ з роботи [3] можливо визнати за такий, який вміщує усі наявні дані.

А тепер додатково застосуємо власні дані одного з авторів цієї статті [11]. Для цього скористаємося даними по шліфуванню швидкорізальної сталі Р6М5, які є у достатній кількості у роботі [11]. Як нами вже було вказано вище, під питомою енергоємністю шліфування розуміють відношення

$$\Delta E = 60 \cdot N_{ef} / 10^{-3} \cdot Q, \text{ кДж/см}^3 \quad (1)$$

де: N_{ef} – ефективна потужність шліфування, кВт; Q – продуктивність шліфування, мм³/хв.

З роботи [11] ми знаємо, що при шліфуванні сталі Р6М5 при шліфуванні з продуктивністю (Q) 400 мм³/хв. показник потужності (N_{ef}) склав 0,4 кВт. Тоді $\Delta E = 60$ кДж/см³. При $Q=1000$ мм³/хв. та $N_{ef}=1,4$ кВт, $\Delta E = 84$ кДж/см³, а при $Q = 2000$ мм³/хв. та $N_{ef} = 2,0$ кВт, а $\Delta E = 60$ кДж/см³. Як бачимо і ці дані фактично збігаються із переважною більшістю інших дослідників. Здавалося б це питання з'ясоване і може бути закритим. Але – є одне ні. Оце саме трактування процесу шліфування, як фізичного процесу плавлення. Підтверджується це отим припущенням, яке

зустрічається у низки дослідників, а саме про питому теплоту плавлення. Одні вказують, що питома енергоємність процесу алмазно-абразивної обробки повинна бути нижче за теплоту плавлення [4, 10], інші – що вище [7], і такі, що їй відповідає – [1, 3].

Розберемося в цьому більш детально. З низки інструментальних матеріалів зупинимося на більш-менш однорідному матеріалу, а саме – сталі. Питома теплота плавлення сталі складає ~ 84 кДж/кг (сайт “Таблиці фізичних величин” <https://www.slideshare.net/ssuser89a9ee/ss-70148616>). Звичайно, що для керамік, або твердих сплавів ця питома теплота плавлення буде ще більшою. У нас вище наведені дані питомої теплоємності за об’ємними одиницями. А що це складає у питомої теплоті плавлення у сталі? Перерахунок дає $639,6$ Дж/см³, або $0,64$ кДж/см³. Що ж ми маємо? Питома енергоємність шліфування сталі – 60 кДж/см³. А питома теплота плавлення сталі – $0,64$ кДж/см³. Тобто, за вказаних вище розрахунків за відношенню (1) при шліфуванні в сталь надходить фактично в 100 раз більше тепла, ніж це треба для її розплавлення. Джерело [7] допускає можливість такого перевищення, але лише на 25% , а не в 100 разів. А джерела [1, 3, 4, 10] вказують на те, що питома теплоємність шліфування не повинна перевищувати теплоту плавлення та і навіть бути нижче. Це ми бачимо для сталі. Щоби перевірити цей висновок, візьмомо для прикладу ще один більш-менш однорідний матеріал – чавун. Згідно сайту <https://www.wiki.uk-ua.nina.az> питома теплота плавлення чавуну складає 100 кДж/кг. У перерахунку на іншу розмірність це складає $0,7$ кДж/см³. Тепер візьмомо дані роботи [12], одного з авторів цієї статті, яка присвячена шліфуванню чавуну з продуктивністю 750 мм³/хв. алмазним кругом на металічній зв’язці з швидкістю обертання круга 30 м/с. Ефективна потужність шліфування склала при цьому $0,45$ кВт, а питома енергоємність за відношенню (1) дорівнює 36 кДж/см³. Як бачимо і у цьому випадку у чавун надходить більш ніж у 50 раз більше енергії, ніж це потрібно для його розплавлення. Насправді ніякого розплавлення ми не спостерігаємо. Тобто наявне протиріччя.

Для пошуку шляхів вирішення цього протиріччя звернемося до одного з висновків роботи [13], а саме про те, що треба враховувати при оцінці величини питомої енергоємності обробки при алмазно-абразивній обробці зношуваність інструменту, яким провадиться обробка. Враховуючи особливості алмазно-абразивної обробки, при шліфуванні кругами з надтвердих матеріалів це має принципове значення, адже якщо круг зношується дуже швидко, то відтак, це збільшить питому енергоємність шліфування і навпаки. Як наслідок, з точки зору методичного підходу, надалі в даній статті, скористаємося формулою для розрахунку питомої енергоємності шліфування з статті [13], яка саме і враховує зношуваність круга, через відносні витрати зерен НТМ в крузі:

$$E_{нтт} = E / m = 240 \cdot 10^5 \cdot N_{ef} \cdot q_p / (Q \cdot K \cdot \gamma_{нтт}), \text{ кДж/кг, (2)}$$

де: N_{ef} – ефективна потужність шліфування, кВт; q_p – відносні витрати зерен НТМ в крузі при шліфуванні, мг/г; Q – продуктивність шліфування, мм³/хв.; K – відносна концентрація зерен НТМ в крузі, %; $\gamma_{нтт}$ – густина зерен НТМ, г/см³.

Результати досліджень та їх обговорення

Враховуючи викладений вище методичний підхід проведемо оцінку питомої енергоємності за формулою (2) і використаємо для цього дані по шліфуванню кругом з кубічного нітриду бору швидкорізальної сталі Р6М5 з роботи [11], де містяться усі необхідні нам відомості для формули (2) у широкому діапазоні продуктивностей шліфування. Результати розрахунків викладені у табл. 2. Нагадаємо, що питома теплота плавлення сталі складає, як нами вказано вище – 84 кДж/кг. Аналіз табл. 2 свідчить про те, що розрахунок за формулою (2) до продуктивності включно 1200 мм³/хв. майже відповідає цьому значенню, а ось починаючи з 1600 мм³/хв. ми маємо перевищення величини вказаного вище значення. Спочатку це склало 118% , а для 2000 мм³/хв. – 124% .

Таблиця 2. Розрахунок питомої енергоємності за формулою (1) процесу шліфування сталі Р6М5 кругом з кубоніту ($\gamma_{куб}=3,46$ г/см³) КРС 100/80 М2-12Е 100 за даними роботи [11]

Продуктивність шліфування, мм ³ /хв.	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати кубоніту в крузі при шліфуванні, мг/г	Питома енергоємність шліфування, кДж/кг
400	0,5	0,9	78
800	1,1	0,9	86
1200	1,6	0,9	83
1600	1,9	1,2	99
2000	2,0	1,5	104

Тобто, припущення авторів роботи [7], про те що питома енергоємність шліфування може до 25% перевищувати питому теплоту плавлення оброблюваного матеріалу тут отримало своє підтвердження. Саме в 25% , а ж не в 100 разів, як при розрахунках по відношенню (1). Тепер звернемо увагу на те, коли саме починається оте перевищення. А починається воно, коли кругом перевищується критична продуктивність шліфування, положення про яку сформульовано в роботі [14], це коли продуктивність при перевищенні якої формозміна ріжучої поверхні у радіальному напрямку вже не відбувається, можливість введення в роботу нових площ робочої поверхні щезає і починають зростати навантаження на зерна НТМ і, як наслідок, зростає знос круга. Тобто кругу через підвищений знос необхідно витрачати більше енергії на знімання матеріалу.

Наведене вище свідчить про те, що саме врахування об'ємного зносу робочого шару круга дозволяє для кругів з НТМ розраховувати питому енергоємність шліфування, яка саме і відповідає викладеним вище припущенням про зв'язок між показниками питомої енергоємності та питомої теплоти плавлення оброблюваного матеріалу. Більш опукло покажемо це далі на прикладі застосування різних зерен в кругах з КНБ при шліфуванні сталі Р6М5 із залученням даних роботи [11] (табл. 3).

Таблиця 3. Розрахунок питомої енергоємності за формулою (2) для процесу шліфування сталі Р6М5 кругами 100/80 М2-12Е 100 з кубічного нітриду бору різних марок з продуктивністю $Q=1200$ мм³/хв.

Марка зерен кубічного нітриду бору	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати КНБ в крузі при шліфуванні, мг/г	Питома енергоємність шліфування, кДж/кг
КО	2,0	2,61	302
КР	1,6	1,02	94
КВ	1,3	1,09	82
ГА	2,2	3,70	471

Аналіз табл. 3 свідчить, що застосування маломіцних зерен марки КО та подробленого гексаніту марки ГА призводить до значного зростання як потужності шліфування, так і зносу круга. Як наслідок, питома енергоємність шліфування кругами з таким зернами суттєво (в 3–4 рази) зростає відносно кругів із зернами КР чи КВ. Наведене якраз ще раз підкреслює важливість врахування зносу круга для оцінки питомої енергоємності алмазно-абразивної обробки. Звернемо також увагу і на оте перевищення в 2–4 рази питомої енергоємності шліфування аніж питома теплота плавлення сталі. Виникає питання – чому ж сталь не плавиться? Здавалося б тепла забагато. Так, забагато, і це ми можемо побачити, по-перше, за наявністю припалу на обробленій поверхні у цих випадках, а, по-друге, на наш погляд, оте перевищення якраз сприймає і шліфувальний круг, а реагує на це саме суттєвим збільшенням зносу круга, тобто всю надлишкову енергію забирають оброблювана поверхня, реагуючи на це припадами, та робочий шар круга і зерна КНБ, через їх

підвищене абразивне зношування, спричинене підвищеними температурами обробки [15].

Додатково подивимося і на другий однорідний матеріал – чавун, на який ми вже звертали увагу вище. Питома теплота плавлення чавуну складає 100 кДж/кг. У перерахунку на іншу розмірність це складає 0,7 кДж/см³. В табл. 4 наведені дані з алмазного шліфування чавуну кругом на металічній зв'язці і розрахунки питомої енергоємності двома підходами. Видно, що оцінка питомої енергоємності шліфування за прийнятим відношенням (1) значно перевищує питому енергію плавлення чавуну, в той час як оцінка питомої енергоємності за запропонованою в [13] формулою адекватно описує відношення між питомими енергоємностями плавлення і шліфування. Знову ж таки, ми бачимо певне перевищення питомої енергоємності шліфування над питомою енергією плавлення (для 15 м/с), але воно якраз вкладається у ті 25 % можливого перевищення, яке припускають автори роботи [7].

Тепер спробуємо розглянути інші інструментальні матеріали. По ним на жаль немає даних по питомій енергії плавлення. Тут ми хіба що можемо спочатку розглянути інструментальну кераміку. Даних по ній також нема, але є дані з її складових. Так для оксидно-карбідної кераміки (марки ВОК60, ВОК71), які складаються з сполучення оксиду алюмінію (Al_2O_3) та карбиду титану (TiC), можливо оцінити питому енергію плавлення. Для Al_2O_3 вона складає 1108 кДж/кг [16], а для TiC – 1094 кДж/кг [17], тобто для кераміки це буде ~1100 кДж/кг.

Це дає нам можливість визначити питому енергоємність при шліфуванні оксидно-карбідної кераміки (табл. 5). Вкажемо, що розрахунок питомої енергоємності шліфування за вказаним вище традиційним відношенням (1) по табл. 5 для металічної зв'язки склав 46,5–49,5 кДж/см³, а для металополімерної – 35,4–37,1 кДж/см³. Тобто, це є близьким до шліфування швидкорізальних сталей і фактично відповідає даним робіт [3] та [6]. Цікавим тут є інше. Як ми вже вказали вище, реальна питома теплоємність плавлення сталі фактично на 2 порядки є меншою за питому енергоємність шліфування, розраховану за вказаним вище традиційним показником ΔE . А що ми маємо для оксидно-карбідної кераміки. Питома теплоємність її плавлення складає ~1100 кДж/кг, тобто, якщо перерахувати, то ~4,62 кДж/см³. А це означає, що якщо розрахунки

Таблиця 4. Розрахунок питомої енергоємності для процесу алмазного шліфування чавуну (вихідні дані з роботи [12]) кругом АС4 100/80 М1-10 100 з продуктивністю $Q=750$ мм³/хв.

Швидкість обертання круга, м/с	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати алмазів в крузі при шліфуванні, мг/г	Питома енергоємність шліфування за відношенням (1), кДж/см ³	Питома енергоємність шліфування за формулою (2), кДж/кг
15	0,55	2,3	44	116
30	0,45	1,7	36	70

провадити за традиційним показником ΔE , то і для кераміки, як і для сталі, цей показник знову ж таки істотно перевищує питому теплоту плавлення, тільки хіба що тут не на 2 порядки, а лише на порядок.

Оцінимо це, знову ж таки, із залученням даних роботи [11] при порівнянні процесів шліфування та електрошліфування кераміки ВОК60 (табл. 5). Що ми бачимо тут з табл. 5? По-перше, якщо порівняти першу строчку табл. 4 та другу строчку табл. 2, коли продуктивність обробки однакова (800 мм³/хв.), але оброблювані матеріали різні, то видно, що обробка кераміки є менш енергоємною. По-друге, відносно питомої енергії плавлення кераміки, питома енергія її алмазного шліфування майже на порядок є меншою, на відміну від шліфування сталі кругами з КНБ. По-третє, введення додаткової електричної енергії при електрохімічному шліфуванні в процес обробки фактично вдвічі знижує питому енергоємність шліфування.

Таблиця 5. Розрахунок питомої енергоємності за формулою (2) процесу шліфування та електрохімічного шліфування (напруга 7–8 В) кераміки ВОК60 алмазними кругами

Характеристика круга	Напруга, В	Q , мм ³ /хв.	$N_{\text{эф}}$, кВт	q_p , мг/г	$E_{\text{лит}}$, кДж/кг
АС6 100/80 МО20-2 100	0	800	0,66	0,53	30,0
	8	800	0,62	0,32	17,0
АС4 100/80МА В1-13 100	0	1050	0,65	1,30	55,2
	7	1050	0,62	0,60	24,3

Підсумуємо викладене вище. Розрахунок питомої енергоємності шліфування за традиційним показником (1) по відношенню 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. Щоби уникнути цього, на наш погляд, більш вірним є оцінювати питому енергоємність алмазно-абразивної обробки кругами з НТМ через запропонований нами підхід за формулою (2), яка враховує не тільки продуктивність та потужність обробки, а і зношувальність при цьому робочого шару круга. Тобто врахування стійкості алмазно-абразивного інструменту підвищує точність розрахунку питомої енергоємності обробки і подальше врахування ще і якості обробленої поверхні дозволить ще більше наблизитись до реальної оцінки енергоємності алмазно-абразивної обробки. При цьому, вважаємо, що більш доцільною є розмірність питомої енергоємності шліфування саме – кДж/кг, що відповідає і висновкам роботи [8].

Тепер звернемо увагу саме на вплив швидкості обертання круга. Ми це вже могли побачити вище у табл. 4, але детально це питання не розглядали. З табл. 4 видно, що зменшення швидкості обертання круга при шліфуванні чавуну в 2 рази відразу переводить процес

шліфування в пластичну зону, адже питома енергоємність шліфування не тільки досягає величини питомої теплоти плавлення чавуну, а і навіть перевищує його. Розглянемо це при шліфуванні керамік сполучення $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{B}_4\text{C}$, яке може бути застосованим в пластинах для обробки з ударними навантаженнями та керамічних кульок, і є досить важкооброблюваною керамікою (табл. 6). Як видно з даних табл. 6 зменшення швидкості різання також з 30 до 15 м/с відразу переводить обробку у режим підвищеної питомої енергоємності, який фактично наближається до питомої теплоємності плавлення. Теоретичною основою цього може прислужитися аналіз формули розрахунку величини критичної продуктивності [14], який свідчить про те, що при застосуванні алмазних кругів саме зниженням швидкості обертання круга можливо перевести обробку в зону пластичності, що і підтверджують дані табл. 6 за показником питомої енергоємності шліфування. Але при цьому, для збереження значення критичної продуктивності необхідно знижувати зернистість алмазів в крузі і збільшувати їх міцність, враховуючи також паралельне підвищення їх утримання в зв'язці шляхом зміни зв'язки круга з полімерної на металічну [14]. Слід звернути увагу також на те, що при шліфуванні керамік шорсткість обробленої поверхні R_a зростає із збільшенням зернистості алмазів, повздовжньої та поперечної подачі і знижується із підвищенням швидкості круга [14]. Тому, знову ж таки у випадку переведення обробки в зону пластичності необхідно прийняти заходи до зниження висотних параметрів шорсткості – наприклад знизити ту ж зернистість алмазного шліфпорошку в крузі, наприклад, з 160/125 на 100/80.

Таблиця 6. Показники шліфування керамічних пластин сполучення $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{B}_4\text{C}$ з продуктивністю 1000 мм³/хв. алмазними кругами 12А2-45° 150×10×3×32 на металополімерній зв'язці В1-13 з відносною концентрацією алмазів – 100 %

№	Характеристика алмазних зерен	q_p , мг/г	$N_{\text{эф}}$, кВт	$E_{\text{лит}}$, кДж/кг	R_a , мкм
Швидкість обертання круга – 30 м/с					
1	АС4 160/125	2,8	0,95	182	0,28
Швидкість обертання круга – 15 м/с					
2	АС4 160/125	14	1,0	960	0,45

Наведене вище відносилось до більш-менш однорідних інструментальних матеріалів. А як бути, коли в нас композитний інструментальний матеріал складається з досить різномірних за теплофізичними характеристиками складових, наприклад твердих сплавів, де є відносно низькоплавка складова (зв'язуюче – кобальт або нікель) та тугоплавка складова (карбіди вольфраму або титану). Відповідно такі складові суттєво різняться між собою за питомою теплотою плавлення (263 кДж/кг для кобальту та 273 кДж/кг для нікелю) та за

1000 кДж/кг для TiC та WC. Для того, щоби зорієнтуватися, як оцінювати питому енергоємність шліфування таких композитних матеріалів нами були проаналізовані дані розрахунку такої енергоємності для кераміки ВОК60, твердих сплавів ВК8 та Т15К6 (зв'язуюче – кобальт), а також безвольфрамового твердого сплаву (БВТС) ТН50 (зв'язуюче – нікель) із залученням вихідних даних з роботи [18] (табл. 7).

Аналіз даних табл. 7 свідчить про наступне. При розрахунку питомої енергоємності шліфування за відношенням (1) отримані дані попадають у вже відомий нам інтервал 20–200 кДж/см³ роботи [3]. А це означає, що, наприклад, в трьох з чотирьох наведених інструментальних матеріалах від 6 до 17 раз питома енергоємність шліфування перевищує питому теплоту плавлення навіть тугоплавкої складової TiC, яка у всіх них знаходиться. Але звернемо увагу на те, що у складі твердих сплавів ВК6, Т15К6 та ТН50 є більш легкоплавке зв'язуюче: у ВК6 та Т15К6 – кобальт, а у ТН50 – нікель. Зазвичай вони перші піддаються тепловому впливу. Оцінімо це. Для кобальту у перерахунку питома теплота плавлення складає 2,31 кДж/см³, а для нікелю 2,43 кДж/см³. А це означає, що розрахунками питомої енергоємності шліфування за відношенням (1) перевищується питома теплота плавлення для кобальту у 35–45 разів, а для нікелю у 33 рази. Тобто, такі розрахунки не дають адекватної оцінки питомої

енергоємності шліфування. Тепер розглянемо розрахунки за формулою (2). Як бачимо (див. табл. 7), тут питома енергоємність шліфування не досягає навіть питомої теплоємності плавлення зв'язуючого твердого сплаву. Але на найбільш важкооброблюваному безвольфрамовому твердому сплаві ТН50 питома енергоємність шліфування вже наближається до питомої теплоємності плавлення нікелю. Наведене вище дозволило нам зробити припущення про те, при оцінці питомої енергоємності шліфування композитних матеріалів, що складаються з низькоплавкої та тугоплавкової складової (твердих сплавів) за основу потрібно приймати приховану теплоємність плавлення найбільш слабкої ланки, а саме низькоплавкої, складової.

Тепер наприкінці, звернемо увагу на особливості введення додаткової електричної енергії в зону обробки з точки зору питомої енергоємності шліфування (табл. 8). При аналізі табл. 5 ми вже звертали увагу на те, що при електрохімічному шліфуванні кераміки ВОК60 спостерігається зменшення майже до 2-х раз питомої енергоємності. Разом з тим, значне поширення набуло і електроерозійне шліфування кругами з НТМ [14]. Наявність електроерозійних розрядів в зоні обробки дає можливість значно підвищити продуктивність шліфування, але наявність електроерозійних розрядів безумовно підвищить і питому енергоємність шліфування. Розглянемо це більш детально за умов пружного

Таблиця 7. Розрахунок питомої енергоємності для процесу алмазного шліфування різних інструментальних матеріалів (вихідні дані з роботи [18]) кругом АС6 100/80 Б11-2 100 з продуктивністю $Q=525$ мм³/хв.

Інструментальний матеріал	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати алмазів в крузі при шліфуванні, мг/г	Питома енергоємність шліфування	
			за відношенням (1), кДж/см ³	за формулою (2), кДж/кг
Кераміка – ВОК60	0,25	2,1	29	69
Твердий сплав – ВК8	0,90	0,7	103	82
Твердий сплав – Т15К6	0,70	0,8	80	73
БВТС – ТН50	0,70	2,2	80	201

Таблиця 8. Розрахунок питомої енергоємності для процесу пружного шліфування різних інструментальних матеріалів (вихідні дані з роботи [19]) кругом АС6 (КР) 125/100 100

Круг з НТМ	Метод шліфування	Інструментальний матеріал	$N_{эф}$, кВт	Q , мм ³ /хв.	q_p , мг/г	$E_{пит}$, кДж/кг	
Алмазний на зв'язці М2-12Е	Електрохімічний	ВК8+Ст.45	1,00	250	0,59	161,8	
	Електроерозійний		1,70	1200	3,50	340,0	
Алмазний на зв'язці МО20-2	Електрохімічний		1,00	210	0,52	169,8	
	Електроерозійний		1,50	1260	4,50	367,3	
Алмазний на зв'язці МО20-2 з металізованими алмазами	Електрохімічний		1,00	220	0,86	268,1	
	Електроерозійний		1,60	1610	6,00	408,9	
Алмазний на зв'язці МО13Е	Електрохімічний		0,90	350	0,61	107,6	
	Електроерозійний		1,40	1030	4,65	433,4	
Алмазний на зв'язці М2-12Е	Електроерозійний		ТН20	0,70	270	2,40	426,7
Алмазний на зв'язці МО13Е	Електроерозійний			0,70	185	7,26	1883,7
Кубонітовий на зв'язці М2-12Е	Електрохімічний	Р6М5	0,47	368	1,05	94,7	
	Електроерозійний		0,70	830	4,70	279,8	

шліфування різних інструментальних матеріалів і кругів з НТМ з використанням вихідних даних з роботи [19], які були спільно отримані свого часу авторами цієї статті (табл. 8).

Аналіз даних табл. 8 свідчить про те, що в усіх випадках алмазно-електрохімічного шліфування твердого сплаву ВК8 питома енергоємність шліфування не перевищує питому теплоту плавлення кобальту (263 кДж/кг) і лише в одному випадку, при застосуванні металізованих алмазів, питома енергоємність шліфування трохи її перевищує, що, як вказано нами вище, цілком є допустимим. Аналогічне спостерігається і при електрохімічному кубонітовому шліфуванні швидкорізальної сталі Р6М5 (див. табл. 8).

А ось при електроерозійному шліфуванні ситуація складається зовсім по іншому. Тут в усіх випадках ми спостерігаємо суттєве зростання питомої енергоємності шліфування. Наприклад для твердого сплаву ВК8 по кобальту перевищення питомої теплоты плавлення складає: 29 %, 40 %, 55 %, 65 %, тобто виходить за допустимі 25 %. Для безвольфрамового твердого сплаву ТН20 по нікелю таке перевищення складало 56 % та 590 %. Для електроерозійного кубонітового шліфування

сталі Р6М5 перевищення складає 233 % (див. табл. 8). Таке перевищення при електроерозійному шліфуванні викликане інтенсивними електроерозійними розрядами, які мають позитивне значення з точки зору досягнення високої різальної здатності робочої поверхні круга (це ми бачимо по значному збільшенню продуктивності шліфування), але, як наслідок, попадання розрядів на оброблювану поверхню, та поверхню зв'язки круга і навіть розплавлення як оброблюваного матеріалу так і матеріалу зв'язки круга (рис. 1). Особливо цьому вражаються зв'язки на основі Cu-Al-Zn (зв'язка М013Е) внаслідок наявності в їх складі легкоплавких складових (рис. 2). Яскравий приклад, це електроерозійне шліфування сплаву ТН20, на що ми вже вказували вище (див. табл. 8). Якщо ми застосуємо зв'язку системи Cu-Sn (зв'язка М2-12Е), то по нікелю таке перевищення складало 56 %, а якщо ми застосуємо зв'язку алмазного круга системи Cu-Al-Zn (зв'язка М013Е), то перевищення складає вже 590 %, тобто зростає на порядок. Наведене вище свідчить про те, що коли у нас відбуваються реальні процеси плавлення при обробці, то це відразу позначається на зростанні величини питомої енергоємності шліфування.

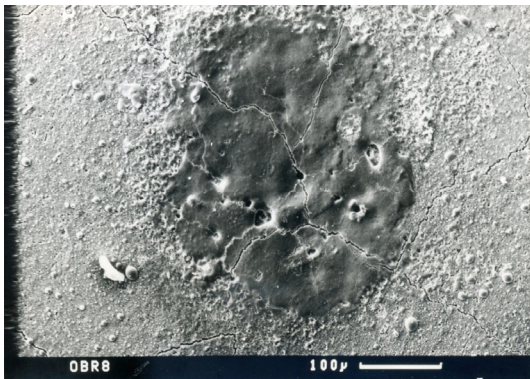


Рис. 1. Наявність електроерозійного розряду на поверхні безвольфрамового твердого сплаву при алмазно-електроерозійному шліфуванні

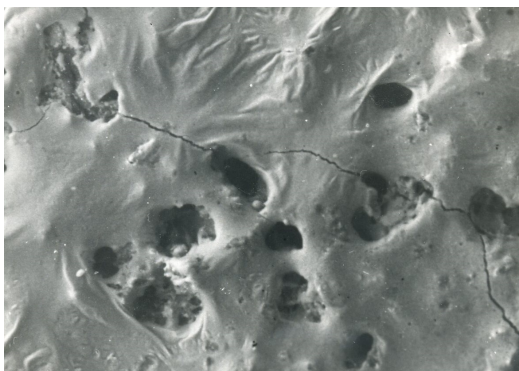


Рис. 2. Наявність електроерозійного розряду на поверхні зв'язки алмазного круга системи Cu-Al-Zn (зв'язка М013Е) при алмазно-електроерозійному шліфуванні

Висновки

1. Показано, що традиційний метод оцінки питомої енергоємності за відношенням потужності шліфування до продуктивності обробки не дає адекватного рішення, оскільки при ньому питома теплоємність оброблення майже на порядок перевищує питому теплоємність плавлення керамік, а відтак, будь-яка алмазна обробка керамік відразу повинна попадати у режим пластичності, що реально є не так. Тому, саме застосування нового підходу до оцінки питомої енергоємності алмазного шліфування з урахуванням зношування робочого шару алмазного круга, і дає можливість оцінити можливість досягнення енергетичних умов переходу обробки кераміки у пластичний режим.

2. При оцінці питомої енергоємності шліфування композитних матеріалів, що складаються з легкоплавкої та тугоплавкої складової – тверді сплави за основу потрібно приймати приховану теплоємність плавлення саме найбільш слабкої, а саме легкоплавкої, складової.

3. Встановлено, що за новою формулою для розрахунку питомої енергоємності шліфування, яка враховує нарівні із ефективною потужністю та продуктивністю обробки, ще і знос робочого шару круга, процеси електроерозійного шліфування як алмазними, так і кубонітовими кругами значно (від 1,5 до 4 разів) підвищують питому енергоємність шліфування, аніж це відбувається при електрохімічному шліфуванні, що ми можемо спостерігати по появі слідів плавлення від електророзрядів на оброблюваній поверхні.

4. Виявлено, що при застосуванні шліфувальних кругів на зв'язках з основою Cu-Al-Zn (М013Е) за

умов електроерозійного шліфування питома енергоємність шліфування значно зростає (більш ніж у 4 рази) у порівнянні із металічними зв'язками на основі

мідь-олово, що ми можемо спостерігати по наявності слідів електроерозії на поверхні зв'язки із тріщинами в лунці розрядів.

References

- [1] A.V. Karpov, "On the issue of reducing the energy intensity of technological processes of cutting", *Modern problems of science and education*, no. 2, pp. 2–10, 2013.
- [2] V.M. Adamenko and Z.A. Mrochek, "Energy efficiency of the process of cutting the surfaces of parts billets based on the analysis of energy-consuming indicators of technological equipment", *Science and technology*, no. 4, pp. 3–6, 2012.
- [3] A.P. Kuznetsov, "Thermal processes in metal-cutting machines", Moscow: Technosfera, 2019.
- [4] F.V. Novikova and A.V. Jakimova Eds., "Cutting materials with blade tools", in *Physical and mathematical theory of material processing processes and mechanical engineering technology*, Vol. 3. Odessa: ONPU, 2003.
- [5] I.A. Riabenkov and F.V. Novikov, "Theoretical studies of the energy intensity of mechanical processing and determination of the conditions for its reduction", *Visnik NTU "KHPP"*, No. 44, pp. 145–150, 2014.
- [6] A.A. Sagarda, "On the analysis of wear and energy costs in the abrasive processing of metals", *Sverkhverdie materialu*, No. 1, pp. 51–54, 1987.
- [7] S. Malkin and N. Joseph, "Minimum energy in abrasive processes", *Wear*, 32, pp. 15–23, 1975. DOI: 10.1016/0043-1648(75)90201-X
- [8] M.D. Uzunian, *Almazno-iskrovoe shlifovanie tverdych splavov [Diamond spark grinding of hard alloys]*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2003.
- [9] Yu.O. Kharlamov et al., *Processing of parts during restoration and strengthening: training manual*, Lugansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2007.
- [10] V.I. Polanskii, Basics of ensuring quality and reducing the labor intensity of mechanical processing of complex-profile forming equipment for the food industry, Avtoref. Dys.doc. tech. nauk. Kharkiv: NTU "KhPI", 2021.
- [11] V.I. Lavrinenko, *Elektroshlifovanie instrumentalnuch materialov*, Kyiv: Nauk. dumka, 1993.
- [12] V.I. Lavrinenko, A.S. Vusotskii and N.D. Eriomin, "Shlifovanie litogo poristogobelogo chuguna kruganu iz STM [Grinding of cast porous white cast iron with STM wheels]", *Sverkhverdie materialu*, No. 5, pp. 61–66, 1990.
- [13] V.I. Lavrinenko, "To the analysis of the estimate of energy expenditures in the diamond abrasive treatment by wheels from superhard materials", *Journal of Superhard Materials*, Vol. 44, No. 4, pp. 285–291, 2022. DOI: 10.3103/S1063457622040050
- [14] V.I. Lavrinenko, *Nadtverdie materialu* Kyiv: Akadempriodyka, 2018. DOI: //doi.org/10.15407/akadempriodyka.362.336
- [15] V.I. Lavrinenko and V.Yu. Solod, "The process of abrasive machining as a friction interaction between dissimilar materials", *Journal of Superhard Materials*, Vol. 40, No. 2, pp. 138–142, 2018. DOI: 10.3103/S1063457618020090
- [16] G.V. Samsonova Ed., *Fiziko-himicheskie svoistva okislov*, Moscow: Metallurgia, 1978.
- [17] G.V. Samsonov and I.M. Vinitkii, *Tygotplavkie soedinenia [Refractory compounds]*. Moscow: Metallurgia, 1985.
- [18] V.I. Lavrinenko, A.A. Zlenko and A.A. Sytnuk, "The performance of diamond wheels when grinding cutting ceramics VOK60", *Sverkhverdie materialu*. No. 4, pp. 45–47, 1985.
- [19] V.I. Lavrinenko, "Vubor effektivnogo metoda shlifovania instrumentalnich materialov krugamu iz STM [Choosing an effective method for grinding tool materials with STM wheels]", *Sverkhverdie materialu*, No. 6, pp. 57–60, 1985.

Analysis of available data and estimation of energy supply of mechanical processing

V. Lavrinenko, V. Solod

Abstract. The issue of energy efficiency of machining processes has been the focus of attention for the last 50 years. This is due to the fact that in comparison with other industries, metallurgy and mechanical engineering are characterized by a high level of energy intensity of products.

Analysis of available in the literature indicators of energy costs of processing processes and determination of consistent data from these indicators.

Establishing an analytical relationship between the grinding energy and the energy required for melting the finishing material.

It is determined that the cutting energy of the material during chip formation is close to the energy required for melting the metal, and the excess amount of spent grinding energy is spent on friction between the chips and the grinding wheel. It is shown that in the literature there are data on the energy consumption of different treatments: turning – 2 kJ/cm³, milling – 9 kJ/cm³, grinding – 60 kJ/cm³, electrospark treatment – 3000 kJ/cm³. At the same time, the specific energy consumption of steel grinding is 60 kJ/cm³. And the specific heat of fusion of steel is 0.64 kJ/cm³. As a result, 100 times more heat is pumped into the steel during grinding than is needed to melt it. That is, there is a contradiction.

To find ways to resolve this contradiction, it is more accurate to estimate the specific energy consumption of diamond-abrasive machining of superhard materials through additional consideration, in addition to productivity and effective machining power, wear of the working layer of the wheel.

Keywords: diamond-abrasive treatment, specific energy intensity of grinding, specific heat capacity of melting, abrasive layer of wheel.