

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.6

УДК 621.93.026.23

Лавріненко В.І.¹, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-2098-7992,
e-mail: lavrinenko@ism.kiev.ua

Солод В.Ю.², к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-7516-9535, e-mail: v_solod@ukr.net

Музичка Д.Г.², к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-2914-9672, e-mail: muzichka@ua.fm

Острроверх Є.В.³, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8926-1324, e-mail: evgostr401@gmail.com

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

²Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

³НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Lavrinenko Valerii¹, Doctor of technical sciences, Professor

Solod Volodymyr², Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Welding Technology, first vice-rector

Muzychka Diana², Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Welding Technology

Ostroverkh Evgeniy³, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Integrated Technologies of Mechanical Engineering named after M.F. Semko

¹V.Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine, Kyiv

²Dniprovsky State Technical University, Kamianske

³National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv

ПЕРЕХІД ВІД ПЛАСТИЧНОГО РЕЖИМУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ КЕРАМІКИ ДО ПЛАВЛЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВЛЕННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ КЕРАМІК

Пластичні режими обробки крихких керамічних матеріалів, що сприяють зниженню тріщинотворення, збільшенню міцності на згин та отриманню при необхідності дзеркальної обробної поверхні, практично не застосовуються. Це пов'язано з тим, що традиційний метод оцінки енергоємності обробки не дає адекватного рішення, оскільки при ньому питома енергоємність 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. Для адекватної оцінки енергоємності запропоновано вести розрахунок питомої енергоємності шліфування із врахуванням об'єму витраченого при обробці робочого шару круга. Показано, що пластичний режим виникає саме тоді, коли питома енергоємність шліфування стає близькою до питомої теплоємності плавлення керамік. Наведено особливості плавлення інструментальних керамік в лунках електроерозійних розрядів при алмазно-електроерозійному шліфуванні.

Ключові слова: алмазне шліфування; питома енергоємність шліфування; питома теплоємність плавлення; кераміка; пластичний режим; особливості плавлення керамік.

Plastic methods of processing fragile ceramic materials, which help to reduce cracking, increase bending strength and, if necessary, obtain a mirror finish surface, are practically not used. This is due to the fact that the traditional method of estimating the energy intensity of processing does not provide an adequate solution, since with it the specific energy intensity of processing is almost an order of magnitude higher than the specific heat capacity of melting ceramics, and therefore, any diamond processing of ceramics must immediately enter the plasticity regime, which it's really not like that. For an adequate assessment of the energy intensity, it is proposed to calculate the specific energy intensity of grinding, taking into account the volume spent during processing of the working layer of the wheel. It is shown that the plastic regime occurs precisely when the specific energy capacity of grinding becomes close to the specific heat capacity of melting ceramics. Features of the melting of tool ceramics in the holes of electroerosion discharges during diamond electroerosion grinding are given.

Keywords: diamond grinding; specific energy capacity of grinding; specific heat capacity of melting; ceramics; plastic mode; peculiarities of melting of ceramics.

Постановка проблеми

Високотверді керамічні матеріали, особливо інструментальні, нині широко застосовуються у промисловості. Їх ефективна алмазна обробка є важливою для сучасного виробництва. Це відноситься як до металокерамічних твердих сплавів, так і до мінералокераміки. Останнім часом набуває практичного застосування пластичний режим обробки крихких матеріалів, що сприяє зниженню тріщиноутворення, збільшенню міцності на згин та отриманню при необхідності дзеркальної обробної поверхні [1].

Певну увагу питанням пластичного режиму шліфування крихких матеріалів почали приділяти з початку 90-х років минулого сторіччя [2, 3]. При шліфуванні режимами обробки визначають характер процесу знімання матеріалу: сколювання або пластична деформація. При шліфуванні в режимі сколювання вся оброблена поверхня вкрита мікротріщинами, що знижують міцність виготовленого виробу. Шліфування в режимі пластичної деформації вимагає значно більших енерговитрат, частина яких йде на зміцнення поверхневих шарів оброблюваного виробу. Виходячи з цього, авторами [2] рекомендується з метою підвищення продуктивності чорнову обробку вести в режимі сколювання, а чистову — в режимі пластичної деформації. У висновках роботи [1] звернена увага на термічні явища при пластичному режимі різання. Так, при збільшенні швидкості різання термічні явища стають домінуючими і пластична деформація відбувається завдяки термічному розм'якшенню. Тобто, режим пластичної деформації пов'язаний із великими енерговитратами, підвищеним тепловим впливом і навіть термічним розм'якшенням обробного матеріалу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питанням енергоефективності процесів механічної обробки в науковій літературі приділяється певна увага вже протягом останніх 50 років [4—8]. У значній мірі викликане 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 % [4], а ось за останні десятиріччя вона зросла до 18—25 % [4, 5] і має стійку тенденцію до подальшого збільшення. Останнє викликане в значній мірі тим, що досягнення необхідної точності обробки вимагає саме відповідного збільшення величини питомої енергії обробки. Так, в роботі [6] показано, що для досягнення точності обробки в 10 мкм треба витратити 10^2 Дж/м³, а якщо нам треба досягти точності в 1 нм, то тут вже необхідною є питома енергія в 10^4 Дж/м³. Все це означає, що енергоємність є важливим елементом оцінки ефективності процесу механічної обробки. Але тут ми звернемо увагу на фізичну сторону процесу алмазно-абразивної обробки. В роботі [7] 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. 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, аніж енергія, необхідна для плавлення одиниці об'єму матеріалу. В книзі [6] викладені вже конкретні цифри питомої теплоємності різних видів механічної обробки (табл. 1). Разом з тим, для нас цікавим тут є те, як трактується фізичний процес для різних видів обробки, який їх характеризує (табл. 1). Як бачимо, процес абразивної обробки (шліфування) автор [6] трактує як фізичний процес плавлення. Тобто і тут ми бачимо певну аналогію у трактуванні питомої енергоємності абразивної обробки, як питомої теплоємності плавлення оброблюваного матеріалу.

Враховуючи наведене вище трактування, розглянемо також висновок однієї з новітніх робіт [8]: «...продуктивність обробки можна збільшувати лише в межах збільшення температури різання до температури плавлення оброблюваного матеріалу». Тобто бачимо, що і автор роботи [8] схиляється до процесу плавлення у трактовці фізичного процесу при алмазно-абразивній обробці.

Таблиця 1. Питома теплоємність різних видів обробки [6]

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

У роботі [1] наведено приклади практичного промислового застосування пластичного режиму обробки крихких матеріалів. Саме такий режим, коли крихкий матеріал знімається переважно у пластичному режимі, сприяє зниженню тріщиноутворення, збільшенню його міцності на згин та отриманню при необхідності дзеркальної поверхні після обробки. Вкажемо, що для умов алмазного шліфування керамік цей напрямок (з точки зору енергоємності процесу) не розглядався, бо апіорі питання термічного розм'якшення або плавлення керамік при абразивній обробці якось не виглядало реальним. А між тим, традиційний метод оцінки питомої енергоємності за відношенням потужності шліфування до продуктивності обробки, як показано в статті [9], 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. Для адекватної оцінки енергоємності запропоновано для обробки алмазними кругами вести розрахунок питомої енергоємності шліфування із врахуванням об'єму витраченого при обробці робочого шару круга [9]. Саме це і дає можливість оцінити енергетичні умови переходу обробки кераміки у пластичний режим, що саме і було метою даної статті.

Формулювання мети дослідження

Для керамік, особливо інструментальних, такий напрямок майже не розглядається. У значній мірі це пов'язане з тим, що традиційний метод оцінки енергоємності обробки не дає адекватного рішення, оскільки при ньому питома енергоємність 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 метою досліджень, викладених в даній статті, є викладення умов, коли саме виникає пластичний режим обробки, вплив на нього електроерозійних явищ про електроерозійному шліфуванні та особливостей плавлення інструментальних керамік.

Виклад основного матеріалу

У роботі [10] 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 має вигляд

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

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

Розберемося в цьому питанні більш детально. З табл. 1 ми можемо побачити, що питома енергоємність абразивної обробки вкладається в діапазон 10–200 кДж/см³. Перевіримо це з низки інструментальних матеріалів на більш-менш однорідному матеріалу, а саме — сталі. Питома теплота плавлення сталі складає ~ 84 кДж/кг (сайт «Таблиці фізичних величин» <https://www.slideshare.net/ssuser/89a9ee/ss-70148616>). Звичайно, що для керамік, або твердих сплавів ця питома теплота плавлення буде ще більшою. Перерахунок її до об'ємних одиниць дає 639,6 Дж/см³, або 0,64 кДж/см³. У той же час, питома енергоємність шліфування сталі — 60 кДж/см³. Тобто, за вказаних вище розрахунків за відношенням (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. Між тим, джерела [4, 6, 8, 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, візьмемо 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 візьмемо дані роботи [11], 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 відношенням (1) дорівнює 36 кДж/см³. Як бачимо і у цьому випадку у чавун надходить більш ніж у 50 раз більше енергії, аніж 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 [9], 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 [9], яка саме і враховує зношуваність круга, через відносні витрати зерен НТМ в крузі:

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

де $N_{\text{еф}}$ — 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, %; $\gamma_{\text{нтм}}$ — густина зерен НТМ, г/см³.

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 [12], 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 для 2000 мм³/хв. ми маємо перевищення величини вказаного вище значення на 24 %.

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

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
1200	1,6	0,9	83
2000	2,0	1,5	104

Тобто, припущення авторів роботи [9], 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).

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. 3 наведені дані з алмазного шліфування чавуну кругом на металічній зв'язці і розрахунки питомої енергоємності двома підходами. Видно, що оцінка питомої енергоємності шліфування за прийнятним відношенням (1) значно перевищує питому енергію плавлення чавуну, в той час як оцінка питомої енергоємності за запропонованою в [9] формулою адекватно описує відношення між питомими енергоємностями плавлення і шлі-

фування. 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].

Таблиця 3. Розрахунок питомої енергоємності для процесу алмазного шліфування чавуну (вихідні дані з роботи [11]) кругом АС4 100/80 М1-10 100 з продуктивністю $Q = 750 \text{ мм}^3/\text{хв}$.

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

Нагадаємо, що 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 металокерамічних 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 теплою 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 ВOK60, твердих сплавів ВК8 та Т15К6 (зв'язуюче — кобальт), а також безвольфрамового твердого сплаву (БВТС) ТН50 (зв'язуюче — нікель) із залученням вихідних даних з роботи [13] (табл. 4).

Таблиця 4. Розрахунок питомої енергоємності для процесу алмазного шліфування різних інструментальних матеріалів (вихідні дані з роботи [13]) кругом АС6 100/80 Б11-2 100 з продуктивністю $Q = 525 \text{ мм}^3/\text{хв}$.

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 – ВOK60	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

Аналіз даних табл. 4 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. Оцінимо 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 (табл. 4), тут питома енер-

гоємність 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 металокерамічних 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 звернемо увагу на особливості введення додаткової електричної енергії в зону обробки з точки зору питомої енергоємності шліфування (табл. 5). Вкажемо, що значне поширення набуло 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 шліфування різних мінералокерамічних твердих матеріалів і кругів з НТМ з використанням вихідних даних з роботи [15], які були спільно отримані свого часу деякими авторами цієї статті (табл. 5).

Таблиця 5. Розрахунок питомої енергоємності для процесу пружного шліфування різних інструментальних матеріалів (вихідні дані з роботи [15]) 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 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

Аналіз даних табл. 5 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).

Однак при електроерозійному шліфуванні в усіх випадках ми спостерігаємо суттєве зростання питомої енергоємності шліфування. Наприклад для твердого сплаву ВК8 по кобальту перевищення питомої теплоти плавлення складає: 29 %, та 65 %, тобто виходить за допустимі 25 %. А для безвольфрамового твердого сплаву ТН20 по нікелю таке перевищення вже складає 56 % та 590 %. 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 БВТС (рис. 1), так і матеріалу зв'язки круга. Особливо цьому вражаються зв'язки на основі Cu-Al-Zn (зв'язка МО13Е) внаслідок наявності в їх складі легкоплавких складових. Яскравий приклад, це електроерозійне шліфування сплаву ТН20, на що ми вже вказували вище (табл. 5). Якщо ми застосовуємо зв'язку системи Cu-Sn (зв'язка М2-12Е), то по нікелю таке перевищення склало 56 %, а якщо ми застосовуємо зв'язку алмазного круга системи Cu-Al-Zn (зв'язка МО13Е), 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

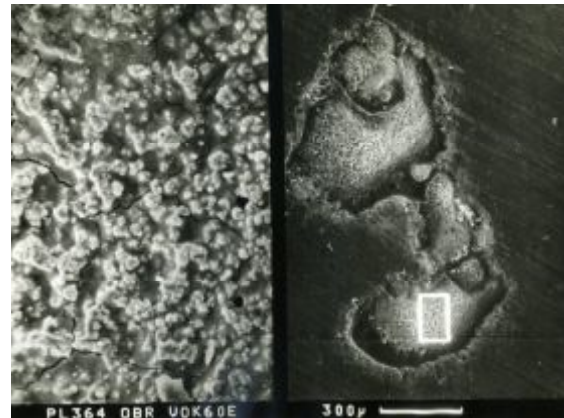


Рис. 2. Наявність електроерозійного розряду на поверхні на поверхні кераміки ВОК60 з тріщинами в лунці розряду при алмазно-електроерозійному шліфуванні

Тепер розглянемо інструментальну мінералокераміку. Даних по питомій енергії плавлення тут також нема, але є дані з її складових. Так, для оксидно-карбідної кераміки (марки ВОК60, ВОК71), яка складається з оксиду алюмінію (Al_2O_3) та карбіду 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 $\sim 1100 \text{ кДж/кг}$. Це дає нам можливість оцінити питому енергоємність при шліфуванні оксидно-карбідної кераміки (табл. 6). Вкажемо, що розрахунок питомої енергоємності шліфування кераміки ВОК60 за вказаним вище традиційним відношенням (1) склав $35\text{—}45 \text{ кДж/см}^3$. Тобто, це відповідає даним роботи [3]. Однак, звернемо увагу на наступну обставину. 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 . В той же час, питома теплоємність оксидно-карбідної кераміки складає $\sim 1100 \text{ кДж/кг}$, тобто, якщо перерахувати, то $\sim 4,62 \text{ кДж/см}^3$. А це означає, що якщо розрахунки провадити за традиційним показником ΔE , то і для кераміки, як і для сталі, цей показник знову ж таки істотно перевищує питому теплоту плавлення, в даному випадку — на порядок. Це насправді підтверджується оцінкою, знову ж таки, із залученням даних роботи [12] при шліфуванні кераміки ВОК60 різними алмазними кругами (табл. 6). Видно, що відносно питомої енергії плавлення кераміки, питома енергія її алмазного шліфування за формулою (2) майже на порядок є меншою.

Таблиця 6. Розрахунок питомої енергоємності за формулою (2) процесу шліфування кераміки ВОК60 алмазними кругами

Характеристика круга	$Q, \text{ мм}^3/\text{хв.}$	$N_{\text{эф}}, \text{ кВт}$	$q_p, \text{ мг/г}$	$E_{\text{пит}}, \text{ кДж/кг}$
АС6 100/80 МО20-2 100	800	0,66	0,53	30,0
АС4 100/80МА В1-13 100	1050	0,65	1,30	55,2

Тепер звернемо увагу саме на вплив швидкості обертання круга. Розглянемо це при шліфуванні керамік сполучення $Si_3N_4+V_4C$, яке може бути застосованим в пластинах для обробки з ударними навантаженнями та керамічних кульок, і є досить важкооброблюваною керамікою (табл. 7). Як видно з даних табл. 7 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, тобто до пластичного режиму шліфування.

Таблиця 7. Показники шліфування керамічних пластин сполучення $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{B}_4\text{C}$ з продуктивністю $1000 \text{ мм}^3/\text{хв}$. алмазними кругами 12A2-45° 150x10x3x32 AC4 160/125 B1-13 100

Швидкість обертання кругу, м/с	$q_p, \text{ мг/г}$	$N_{\text{эф}}, \text{ кВт}$	$E_{\text{пит}}, \text{ кДж/кг}$	$Ra, \text{ мкм}$
30	2,8	0,95	182	0,28
15	14	1,0	960	0,45

Разом з тим, як ми вже бачили вище введення електроерозійних розрядів значно збільшує питому енергоємність процесу з-за процесів плавлення (див. табл. 5). Тобто пластичний режим може переходити безпосередньо у процес плавлення. Разом з тим, особливості процесу плавлення керамік в літературі відсутні, тому вони нами розглянуті для інструментальних оксидних і оксидно-карбідних керамік. Зразки керамік ВОК60, ВОК71 та ВО13 нагрівали до температури 2400 К, коли відбувається плавлення Al_2O_3 , що ближче до реальних умов електроерозійного розряду. Встановлено, що оксидна кераміка починає плавитися при 2313 К. Після нагріву до 2443 К і охолодження зразок (куб розміром $3 \times 3 \times 3 \text{ мм}$) приймає форму тиглю, причому на його периферії спостерігається корка плавлення, а у центрі — правильні кристали. Різниця у елементному складі корки та кристалів не спостерігалася.

На відміну від оксидних керамік, оксидно-карбідні, наприклад ВОК60, при нагріві до 2443 К плавляться у каркасі. Характерним є утворення великої кількості пор, на внутрішній поверхні яких формуються кристали як продукти плавлення та охолодження (рис. 3). Кількісний аналіз елементного складу кристалів свідчить, що вони містять алюміній, вуглець та кисень і практично не містять титану. Приблизно їхній склад можна визначити як $\text{Al}_3\text{O}_2\text{C}_6$. В той же час, на зломі зразка, у місці між порами, характерним є повна відсутність вуглецю та наявність підвищеного вмісту титану.



Рис. 3. Злам павленої оксидно-карбідної (ВОК60) кераміки з кристалами в порах

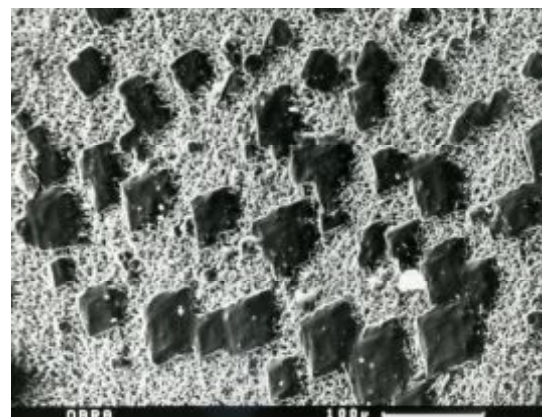


Рис. 4. Корка плавлення оксидно-карбідної кераміки ВОК71

Аналогічні процеси відбуваються і при плавленні кераміки ВОК71. Але спостерігається і відмінність: на поверхні не утворюється єдина алюмінієво-киснева корка, як на ВОК60, а спостерігається вихід окремих кристалів на поверхню (рис. 4). Звернено увагу, що і у цьому випадку утворюються пори з наявністю кристалів.

Особливістю електроерозійного впливу на поверхню керамічних матеріалів є поява тріщин у лунках розряду (рис. 2). Аналогічно процесам при термічному плавленні, у цьому випадку також утворюються корки плавлення. Кількісний аналіз продуктів плавлення свідчить про те, що у лунках розряду утворюється структура, близька до зламу зразка після плавлення, у якій є відсутнім кисень. Приблизний елементний склад поверхні зламу після плавлення — $\text{Al}_{10}\text{Ti}_2\text{O}_{15}$, а у лунці розряду — $\text{Al}_{15}\text{Ti}_2\text{O}_{26}$.

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 металокерамічних композитних матеріалів, що складаються з низькоплавкої та тугоплавкової складової, за основу потрібно приймати приховану теплоємність плавлення саме найбільш слабкої, низькоплавкої складової.

3. Встановлено, що за формулою для розрахунку питомої енергоємності шліфування, яка враховує нарівні із ефективною потужністю та продуктивністю обробки, ще і знос робочого шару круга, процеси алмазно-електроерозійного шліфування значно (від 1,5 до 4 разів) підвищують питому енергоємність шліфування, що ми можемо спостерігати за появою слідів плавлення від електророзрядів на оброблюваній поверхні.

4. Показано, що пластичний режим виникає саме тоді, коли питома енергоємність шліфування з урахуванням зносу круга стає близькою до питомої теплоємності плавлення керамік.

5. Встановлено, що аналогічно процесам при термічному плавленні керамік, у лунці розрядів при електроерозійному шліфування також утворюються корки плавлення. Кількісний аналіз продуктів плавлення свідчить про те, що у лунках розряду утворюється структура, близька до зламів зразка після плавлення, у якій є відсутнім кисень.

Список використаної літератури

1. Ковальченко А.М. Исследования пластичного режима резания хрупких материалов (обзор). *Сверхтвердые материалы*. 2013. № 5. С. 3–28.
2. Tonsholl H.K., Telle R. Chip formation and material removal in grinding of ceramics. *4th Int. Grind. Conf., Dearborn, Mich., Oct. 9–11, 1990: Conf. Pap. Vol. 2. Dearborn (Mich)*, 1990. MR90–539/1–MR90–539/18.
3. Dow Tomas A., Fawcett Steven C., Scattergood Ronald O. Ductile regime grinding in brittle materials. *NIST/DARPA Workshop Ceram. Bear. Technol., Gaithersburg, Md, Apr. 17–18, 1991. NISI Spec. Publ.* 1991. № 824. P. 169–179.
4. Карпов А.В. К вопросу снижения энергоёмкости технологических процессов обработки резанием. *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 2. С. 2–10.
5. Адаменко В.М., Мрочек Ж.А. Энергоэффективность процесса резания поверхностей заготовок деталей на основе анализа энергопотребляющих показателей технологического оборудования. *Наука и техника*. 2012. № 4. С. 3–6.
6. Кузнецов А.П. Тепловые процессы в металлорежущих станках. Москва: Техносфера, 2019. 488 с.
7. Malkin S., Joseph N. Minimum energy in abrasive processes. *Wear*. 1975. 32. P. 15–23.
8. Полянський В.І. Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. Автореф. дис. докт. техн. наук. Харків: НТУ «ХП», 2021. 40 с.
9. Lavrinenko V.I. To the analysis of the estimate of energy expenditures in the diamond abrasive treatment by wheels from superhard materials. *Journal of Superhard Materials*, 2022, Vol. 44, No. 4, pp. 285–291.
10. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В.Новикова и А.В.Якимова. Т. 3. „Резание материалов лезвийными инструментами”. Одесса: ОНПУ, 2003. 546 с.
11. Лавриненко В.И., Высоцкий А.С., Еремин Н.Д. Шлифование литого пористого белого чугуна кругами из СТМ. *Сверхтвердые материалы*. 1990. № 5. С. 61–66.

12. Лавриненко В. И. Электрошлифование инструментальных материалов. Киев: Наук. думка, 1993. 152 с.
13. Лавриненко В.И., Зленко А.А., Сытник А.А. Работоспособность алмазных кругов при шлифовании режущей керамики ВОК60. *Сверхтвердые материалы*. 1985. № 4. С. 45–47.
14. Лавріненко В.І. Надтверді матеріали: посібник для допитливих. Київ: Академперіодика, 2018. 336 с.
15. Лавриненко В.И. Выбор эффективного метода шлифования инструментальных материалов кругами из СТМ. *Сверхтвердые материалы*. 1985. № 6. С. 57–60.
16. Физико-химические свойства окислов: Справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. Москва: Металлургия, 1978. 472 с.
17. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения. Москва: Металлургия, 1985. 560 с.

TRANSITION FROM THE PLASTIC MODE OF DIAMOND GRINDING OF CERAMICS TO MELTING AND FEATURES OF THE MELTING OF INSTRUMENTAL CERAMICS

Abstract

It is shown that the traditional method of estimating the specific energy capacity based on the ratio of grinding power to processing productivity does not provide an adequate solution, since with it the specific heat capacity of processing exceeds the specific heat capacity of melting ceramics by almost an order of magnitude, and therefore, any diamond processing of ceramics should immediately enter the plasticity regime, which is not really the case. Therefore, it is the application of a new approach to the assessment of the specific energy intensity of diamond grinding, taking into account the wear of the working layer of the diamond wheel, that makes it possible to assess the possibility of achieving the energy conditions for the transition of ceramic processing to the plastic mode.

It is shown that the plastic mode occurs precisely when the specific energy capacity of grinding becomes close to the specific heat capacity of melting ceramics.

It was found that similar to the processes during the thermal melting of ceramics, melting crusts are also formed in the discharge hole during electroerosion grinding. Quantitative analysis of melting products shows that a structure close to the fracture of the sample is formed in the discharge holes after melting, in which there is no oxygen.

References

- [1] Kovalchenko, A.M. Issledovania plastichnogo rezima rezania khrupkikh materialov (obzor) [Studies of the ductile mode of cutting brittle materials (a review)]. *Sverkhverdie materialu*. 2013. № 5. P. 3–28. [in Russian].
- [2] Tonsholl H.K., Telle R. Chip formation and material removal in grinding of ceramics. *4th Int. Grind. Conf., Dearborn, Mich., Oct. 9–11, 1990: Conf. Pap. Vol. 2. Dearborn (Mich)*, 1990. MR90–539/1–MR90–539/18.
- [3] Dow Tomas A., Fawcett Steven C., Scattergood Ronald O. Ductile regime grinding in brittle materials. *NIST/DARPA Workshop Ceram. Bear. Technol., Gaithersburg, Md, Apr. 17–18, 1991. NISI Spec. Publ.* 1991. № 824. P. 169–179.
- [4] Karpov, A.V. K voprosu snichenia energoemkosti technologicheskikh procesov obrabotki rezaniem [On the issue of reducing the energy intensity of technological processes of cutting]. *Modern problems of science and education*. 2013. № 2. P. 2–10 [in Russian].
- [5] Adamenko, V.M., & Mrochek, Z.A. Energoefektivnost procesa rezania poverchnostei zagotovok detalei na osnive analiza energopotrebliajchich pokazatelei technologicheskogo oborudovania [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*. 2012. № 4. P. 3–6 [in Russian].

- [6] Kuznetsov, A.P. *Teplovue procesu v metallorezuchih stankah [Thermal processes in metal-cutting machines]*. Moskva: Technosfera, 2019. 488 p. [in Russian].
- [7] Malkin S. & Joseph N. Minimum energy in abrasive processes. *Wear*. 1975. 32. P. 15–23.
- [8] Polanskii, V.I. Osnovu zabezpechenia jakosti ta znizchennja trudovistkosti mechanichnoi obrobku skladnoprofilnoi formujuchoi osnastki dlja charchvoi promuslovosti [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. – 40 p. [in Ukrainian].
- [9] Lavrinenko V.I. To the analysis of the estimate of energy expenditures in the diamond abrasive treatment by wheels from superhard materials. *Journal of Superhard Materials*, 2022, Vol. 44, No. 4, P. 285–291.
- [10] Fiziko-matematicheskaia teoria processov obrabotki materialov i technologii mashinostroenia [Physical and mathematical theory of material processing processes and mechanical engineering technology] / Pod obchei redakciei F.V.Novikova and A.V.Jakimova. T. 3. „Rezanie materialov lezviinum instrumentamu” [Cutting materials with blade tools]. Odessa: ONPU, 2003. 546 p. [in Russian].
- [11] Lavrinenko, V.I., Vusotskii, A.S. & Eriomin, N.D. Shlifovanie litogo poristogobelogo chuguna kruganu iz STM [Grinding of cast porous white cast iron with STM wheels]. *Sverkhverdie materialu*. 1990. № 5. P. 61–66. [in Russian].
- [12] Lavrinenko, V.I. *Elektroshlifovanie instrumentalnuch materialov [Electrogrinding of tool materials]*. Kiev: Nauk. dumka, 1993. 152 p. [in Russian].
- [13] Lavrinenko, V.I., Zlenko, A.A. & Sytnuk, A.A. Rabotosposobnost almaznikh krugov pri shlifovanii rezycheii keramiku BOK60 [The performance of diamond wheels when grinding cutting ceramics VOK60] *Sverkhverdie materialu*. 1985. № 4. P. 45–47. [in Russian].
- [14] Lavrinenko, V.I. *Nadtverdi materialu: posibnik dlja doputluvich [Superhard materials: A guide for the curious]*. Kyiv: Akadempriodyka, 2018. 336 p. [in Ukrainian].
- [15] Lavrinenko, V.I. Vubor effektivnogo metoda shlifovania instrumentalnich materialov krugamu iz STM [Choosing an effective method for grinding tool materials with STM wheels] *Sverkhverdie materialu*. 1985. № 6. P. 57–60. [in Russian].
- [16] Fiziko-himicheskie svoistva okislov: *Spravochnik [Physical and chemical properties of oxides: a Handbook]* / Pod red. G.V. Samsonova. Moskva: Metallurgia, 1978. 472 s. [in Russian].
- [17] Samsonov, G.V. & Vinitskii, I.M. *Tyogoplavkie soedinenia [Refractory compounds]*. Moskva: Metallurgia, 1985. 560 p. [in Russian].

Надійшла до редколегії 07.12.2022