

В. І. Лавріненко^{1,*}, В. Ю. Солод^{2,}**

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

²Дніпровський державний технічний університет МОН України,

м. Кам'янське, Україна

*lavrinen52@gmail.com

**v_solod@ukr.net

Визначення умов досягнення пластичного режиму алмазного шліфування керамічних матеріалів з позиції оцінки енергетичних витрат під час обробки

Досліджено пластичний режим обробки крихких матеріалів, вплив на нього формозміни робочої поверхні алмазного круга у процесі обробки та шляхи досягнення такого режиму. Для адекватної оцінки енергоємності обробки алмазними кругами запропоновано проводити розрахунок питомої енергоємності шліфування з врахуванням об'єму матеріалу, витраченого під час обробки робочого шару круга. Наведено формулу для розрахунку питомої енергоємності у разі алмазного шліфування керамічних матеріалів. Показано, що пластичний режим виникає саме тоді, коли питома енергоємність шліфування стає близькою до питомої теплоємності плавлення керамічних матеріалів.

Ключові слова: алмазне шліфування, питома енергоємність шліфування, питома теплоємність плавлення, керамічні матеріали, пластичний режим.

Ефективна алмазна обробка керамічних матеріалів є важливою в сучасному виробництві. Останнім часом набуває практичного застосування пластичний режим обробки крихких матеріалів, що сприяє зниженню тріщиноутворення та отриманню у разі необхідності дзеркальної обробної поверхні. Для керамічних матеріалів, особливо інструментальних, такий режим майже не використовують. У значній мірі це пов'язане з тим, що традиційний метод оцінки енергоємності обробки не дає адекватного результату, оскільки, відповідно до нього, питома енергоємність оброблення майже на порядок перевищує питому теплоємність плавлення керамічних матеріалів, а тому будь-яка алмазна обробка керамічних матеріалів відразу повинна потрапляти у режим пластичності, що реально не відбувається.

Керамічні матеріали, в особливості інструментальні, є переважно крихкими матеріалами, які не притаманна пластичність, але пластичну складову під час аналізу їхньої оброблюваності та структури безумовно враховують. Наприклад, дрібнодисперсність у структурі матеріалів системи Al_2O_3-TiC та достатня кількість в ній дислокацій дозволили авторам [1] висловити припущення з певного вкладу пластичної течії в механізм зміцнення матеріалу.

З початку 90-х років минулого сторіччя почали приділяти більше уваги питанням пластичного режиму шліфування крихких матеріалів [2, 3]. Так,

у [2] показано, що в залежності від мікроструктури керамічні матеріали по різному реагують на місцеве (локальне) навантаження. Під час шліфування режими обробки визначають характер процесу знімання матеріалу: сколювання або пластична деформація. Головним параметром є глибина різання абразивним зерном. У разі шліфування в режимі сколювання вся оброблена поверхня вкрита мікротріщинами, що знижують міцність виготовленого виробу. Шліфування в режимі пластичної деформації вимагає значно більших енерговитрат, частина яких витрачається на зміцнення поверхневих шарів оброблюваного виробу. Тому в [2], з метою підвищення продуктивності, рекомендували чорнову обробку проводити в режимі сколювання, а чистову – в режимі пластичної деформації. В [3] підкреслено, що обробка в пластичному режимі є можливою лише тоді, коли товщина зрізу не перевищує критичної глибини різання. Наявність слідів пластичної деформації в поверхневому шарі керамічних матеріалів під час алмазної обробки також виявили в [4, 5], але без розгляду їхнього зв'язку з параметрами обробки. З останніх публікацій слід звернути увагу на фундаментальний огляд А. М. Ковальченка [6], присвячений саме пластичному режиму різання крихких матеріалів. У висновках цієї роботи звернено увагу на термічні явища під час пластичного режиму різання. Так, у разі збільшення 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.

В [6] наведено приклади промислового застосування пластичного режиму обробки крихких матеріалів. Саме такий режим для крихкого матеріалу сприяє зниженню тріщиноутворення, збільшенню його міцності на згин та отриманню у разі необхідності дзеркальної поверхні після обробки. Для умов алмазного шліфування керамічних матеріалів пластичний режим обробки не розглядали (відносно енергоємності процесу), бо апіорі питання термічного розм'якшення або плавлення керамічних матеріалів у разі абразивної обробки не виглядало реальним. Але традиційний метод оцінки питомої енергоємності за відношенням потужності шліфування до продуктивності обробки, як показано в [7], не дає адекватного результату, оскільки у такому разі питома теплоємність оброблення майже на порядок перевищує питому теплоємність плавлення керамічних матеріалів, а тому будь-яка алмазна обробка керамічних матеріалів відразу має попадати у режим пластичності, чого в реальності не відбувається.

У [7] автором запропоновано новий підхід до оцінки питомої енергоємності алмазного шліфування з урахуванням зношування робочого шару алмазного круга, що дає можливість оцінити енергетичні умови переходу обробки керамічних матеріалів у пластичний режим. Оцінка енергоємності обробки алмазними кругами з врахуванням пластичного режиму обробки було метою представленої роботи.

Згідно результатів, отриманих в [7], розгляд процесу алмазної обробки будь-яких матеріалів, в тому числі й керамічних, слід проводити з урахуванням реальної формозміни ріжучої поверхні алмазного круга і висновків у [8] про критичну продуктивність обробки. Продуктивність обробки визначають як об'єм знятого матеріалу в одиницю часу. Реально вона залежить від кількості абразивних зерен, що приймають участь в процесі різання, тобто фактичної площі ріжучої поверхні круга. Як показано в [8], ріжуча поверхня зазнає в процесі обробки різних формозмін до того стану, поки круг має мо-

живість збільшувати свою ріжучу поверхню. Продуктивність обробки, коли зникає така можливість, визначають як критичну [8], оскільки у разі її перевищення починає суттєво зростати зношення робочого шару круга. Критична продуктивність, що є наслідком формозміни ріжучої поверхні круга під час шліфування, характеризує перехід від шліфування з резервом площі робочої поверхні круга до шліфування з відсутністю такого резерву. Якщо далі підвищувати продуктивність обробки, площі ріжучої поверхні буде зменшуватися і, як наслідок, зростає навантаження в зоні контакту. Отже, на кривій продуктивність–знос (рис. 1) можна спостерігати дві області: стабільного зносу (коли на поверхні круга в радіальному напрямку ще відбуваються формозміни і круг компенсує підвищення навантаження на неї збільшенням площі робочого шару) і підвищеного зносу (див. рис. 1, заштрихована область), де відсутня будь-яка формозміна ріжучої поверхні і немає компенсування навантаження, що зростає. На такі зміни ріжучої поверхні круга майже не звертають увагу, а саме таке ігнорування формозмін і не дає можливості визначити умови переведення обробки крихких керамічних матеріалів у режим пластичності. Зробити це можна лише у разі застосування вказаного вище положення про критичну продуктивність шліфування.

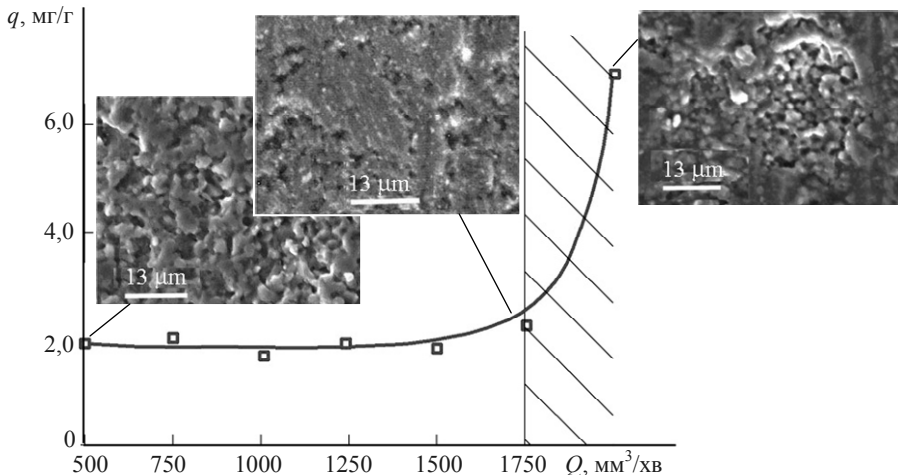


Рис. 1. Залежність зносостійкості круга від продуктивності шліфування кераміки ВОК60 за швидкості обертання круга 15 м/с, повздовжньої подачі 0,5 м/хв, поперечної подачі 0,25 мм/пдв. хід та стан поверхні кераміки в трьох областях (заштрихована область – відсутність резерву ріжучої поверхні круга, початок області відповідає критичній продуктивності шліфування).

Це можна показати на прикладі обробки оксидно-карбідної кераміки. Як тільки ріжуча поверхня круга з підвищенням продуктивності шліфування вичерпує резерви свого збільшення за рахунок формозміни, круг досягає значення критичної продуктивності і починає переходити в область підвищеного (катастрофічного) зносу (див. рис. 1). Забезпечення продуктивності обробки в межах не більше критичної і буде гарантувати стабільну зносостійкість круга. В кожній області роботи круга буде формуватися найбільш характерна для неї оброблювана поверхня (див. рис. 1): для початкового етапу, коли продуктивність обробки є невеликою (500 мм³/хв), характерним є крихке руйнування і спостерігається небагато проявів пластичного впливу; для критичного етапу, коли продуктивність обробки дорівнює критичній і складає

1750 мм³/хв на обробленій поверхні прояви пластичного впливу збільшуються, найбільше це спостерігається в межах критичної продуктивності, та на етапі катастрофічного зношування, коли продуктивність сягає 2000 мм³/хв, у цій області, нарівні з пластичною, характерним є наявність крихких руйнувань.

Дослідженнями автора [8] встановлено, що область крихкого руйнування формується під зерном в лунці руху зерна (рис. 2), а пластичні області спостерігали в навалах по межах лунки і там, де відсутній процес різання зернами, що виступають над рівнем зв'язки, і є загладжування цих пластичних навалів зернами, які недостатньо виступають над зв'язкою або нахилені не в напрямку різання (відбувається їхнє пружне відтискування у зв'язку). Отже, для областей критичної, а особливо закритичної продуктивності обробки характерною є переважна наявність на оброблюваній поверхні пластичних зон. В ідеалі значення обмежень як за продуктивністю обробки і за зносом круга, так і за якістю обробки мають збігатися, або значення критичної продуктивності не повинно перевищувати значення максимальної продуктивності за якістю обробки. Керамічні матеріали є структурно-нечутливими, тому якість обробки визначається наявністю виколоч на крайках виробів та шорсткістю обробленої поверхні. Оскільки в лунках руху зерен переважно відбувається крихке руйнування, то важливо, щоби це не призводило до формування тріщин. Для крихких матеріалів довжина тріщин частково залежить від висотних показників шорсткості оброблюваної поверхні [9], тому основним завданням є забезпечення низької шорсткості оброблюваної поверхні, навіть в області закритичної продуктивності.

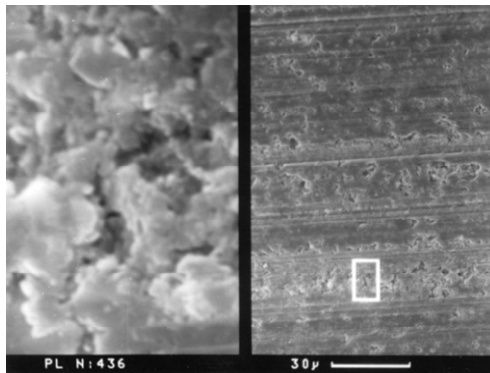


Рис. 2. Стан поверхні кераміки в лунках руху алмазних зерен.

Враховуючи наявність наведеного вище подвійного механізму руйнування поверхні керамічних матеріалів під час алмазної обробки, було поставлено експеримент зі встановлення впливу механізму формування (крихкого або крихко-пластичного) поверхні керамічних матеріалів на стійкість керамічних пластин під час точіння. Випробування на стійкість пластин з кераміки ВОК60 проводили на верстаті 16К20 з безступінчастим регулюванням частоти обертання шпинделю під час точіння без охолодження сталі Х12М (HRC 60). Режими точіння: $v = 100$ м/хв, $t = 0,2$ мм, $s = 0,075$ мм/об. Знос визначали по задній грані пластини. Тригранні пластини товщиною 4,75 мм із вписаним діаметром 12,8 мм по боковим (заднім) поверхням шліфували на верстаті МШ289. Продуктивність шліфування та показники шорсткості бокових поверхонь наведено в табл. 1. Передні (опорні) поверхні пластин шліфували з різною продуктивністю. Було вибрано три пластини, які обробляли способами, що найбільш різнилися за продуктивністю: пружним шліфуванням опорних пове-

рхонь на верстаті ТШ8805 (продуктивність – 790 мм³/хв), врізним шліфуванням на верстаті WBM20 (1800 мм³/хв) та на верстаті WBM300 (4000 мм³/хв).

Показники шорсткості для всіх трьох варіантів обробки мало відрізнялися, хоча значення висотних параметрів у разі шліфування на верстаті ТШ8805 були меншими, а наповненість (t_{50}) профілю нерівностей обробленої поверхні була кращою (табл. 1).

Таблиця 1. Показники параметрів шорсткості поверхні пластин з кераміки ВОК60 у разі шліфування на різних верстатах

Характеристика алмазних кругів	Модель верстату	Продуктивність шліфування, мм ³ /хв	Показники шорсткості			
			Ra, мкм	Sm, мкм	Rmax, мкм	t ₅₀ , %
Шліфування бокових поверхонь пластин						
6A2 350×10×4×315 AC4 80/63 B1-01–100	МШ289	900	0,48	333,6	2,63	62,5
Шліфування опорних поверхонь пластин						
6A2 400×100×3×76 AC6 50/40 СК6–100	ТШ8805	790	0,15	60,6	0,97	82,7
6A2 330×20×4×250 AC4 80/63 B1-01–100	WBM20	1800	0,20	71,7	1,62	73,3
6A2 500×40×5×380 AC4 100/80 B1-13–100	WBM300	4000	0,19	60,6	1,53	60,5

Для так званого “низькотемпературного” шліфування [10] характерним є формування поверхні без помітного пластичного впливу, тобто продуктивність обробки є невеликою і знаходиться в межах області стабільного зношування (див. рис. 1), а для двох інших випадків на обробленій поверхні характерною є наявність пластичних зон (рис. 3) і вони знаходяться в критичній чи закритичній зонах продуктивності шліфування.

Аналіз рис. 3 свідчить про те, що поверхня керамічних пластин, що обробляли з невеликою продуктивністю з переважним крихким формуванням, є більш зносостійкою, ніж з подвійним (крихко-пластичним) механізмом формування.

Вище було вказано, що в [2] рекомендували з метою підвищення продуктивності чорнову обробку вести в режимі сколювання, а чистову – в режимі пластичної деформації. Така рекомендація входить у протиріччя не тільки з практикою алмазного шліфування, а і з викладеними вище даними. Адже чорнову обробку, як правило, виконують зі збільшеною продуктивністю, а чистову, навпаки, зі зменшеною. Також продуктивну обробку виконують у пластичному режимі, а кінцеву – у режимі доводки, коли продуктивність є невеликою. Керамічні пластини, які обробляли за невеликої продуктивності в режимі сколювання мали кращу стійкість у разі точіння.

Продуктивність обробки опорних поверхонь (790 мм³/хв), що характерна у разі використання верстату ТШ8805, виявилася замалою для промислового використання, тому ці верстати не знайшли застосування, а основне поширення набули верстати WBM20 та WBM300 зі значно більшою продуктивністю. Між тим, порівняння даних зі стійкості пластин (див. рис. 3) за двома достатньо різними за продуктивністю варіантами обробки (на верстатах

WBM20 та WBM300) в критичній та закритичній областях свідчить про їхнє співпадіння. Це означає, що навіть двократне підвищення продуктивності за відсутності виломок і дотримання однакової висоти нерівностей не знижує зносостійкість інструменту з керамічних матеріалів. Описане вище може бути основою для розробки умов бездефектного, так званого “в’язкого” [3] шліфування керамічних матеріалів, коли обробка потрапляє відразу в область пластичності. Як наслідок, це дозволить вести обробку з більш високою продуктивністю без суттєвих втрат у зносостійкості оброблених виробів.

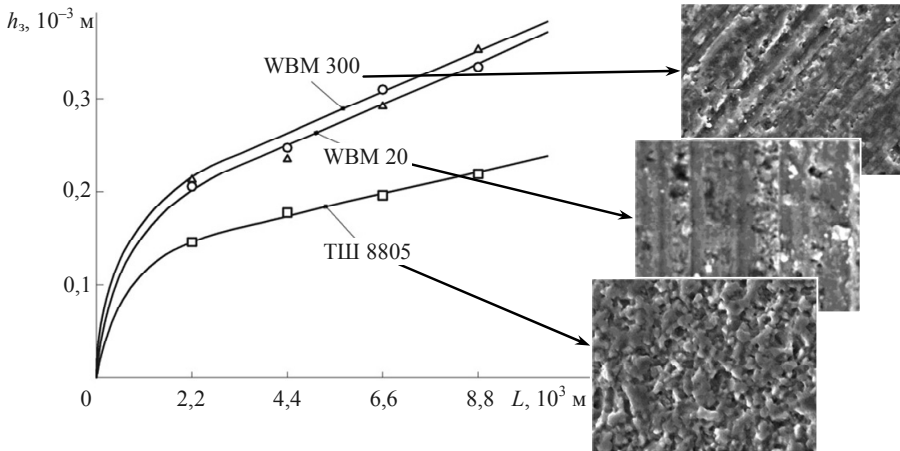


Рис. 3. Порівняльні криві зносостійкості пластин з кераміки під час точіння за різних умов алмазної обробки та стан обробленої поверхні.

В [6] було показано, що у разі збільшення швидкості різання термічні явища стають домінуючими і пластична деформація відбувається завдяки термічному розм’якшенню. Але є певні особливості впливу швидкості обертання круга на показники шліфування. Крива швидкість–знос має класичну екстремальну форму з мінімумом за певної продуктивності обробки [8, 11, 12]. Швидкість, за якої спостерігають мінімальний знос круга, приймають за оптимальну. В [12] показано, що оптимальна швидкість відповідає критичній продуктивності шліфування. Тобто, якщо збільшується значення критичної продуктивності, то, відповідно, підвищується оптимальна швидкість обертання круга. Опосередковано можна це побачити в [11] за даними впливу ширини робочої поверхні круга на значення оптимальної швидкості, коли з її збільшенням збільшується і швидкість. Причиною цього є те, що зі збільшенням ширини робочої поверхні круга підвищується і значення критичної продуктивності шліфування. Відтак, в експериментах по визначенню оптимальної швидкості різання під час шліфування обов’язково треба враховувати формування ріжучої поверхні круга. Але форма кривої типової залежності швидкість круга–знос має дві області відносно оптимальної швидкості: права, де збільшення швидкості відносно оптимальної дає можливість перевести обробку в область пластичності. Водночас зростають динамічні навантаження на верстатну систему і виникає необхідність значного підвищення її жорсткості. Це, так зване, високошвидкісне шліфування, яке було популярним у 80-тих роках минулого сторіччя, потребує жорсткого обладнання і кругів з підвищеною міцністю на розрив. Але переважно під час шліфування застосовують стандартні алмазні круги. Тому у лівій області залежності швидкість круга–знос, де швидкість різання зменшується, а знос круга зростає, на думку авторів, отримуємо реальну можливість переходу

обробки в режим пластичності. Це підтверджується дослідженнями, виконаними ще на початку 90-х років минулого сторіччя [13]. Під час дослідження режиму пластичності було звернено увагу на зміну теплових умов під час шліфування, тобто на підвищення енергоємності обробки.

Ще в 70-х роках минулого сторіччя [14] і донині [15] традиційно енергоємність визначають як роботу A різання, що витрачається на знімання об'єму V оброблюваного матеріалу, тобто: $E = A/V$, де $A = N\tau$; $V = Q\tau$; N – потужність обробки; τ – час; Q – продуктивність. Тоді питома енергоємність шліфування $\Delta E = N/Q$, Дж/м³. В [15] вказано, що для шліфування зі збільшенням продуктивності обробки температура різання може досягти рівня температури плавлення оброблюваного матеріалу. Водночас визначення енергоємності обробки здійснювали за залежністю $E_{\text{пнт}} = N/Q$, де N – ефективна потужність різання, Q – продуктивність обробки.

В [7] було показано, що питома енергоємність процесу абразивної обробки повинна бути нижче за теплоту плавлення, або трохи (до 25 %) вище. Для інструментальних керамічних матеріалів, на жаль, немає даних питомої енергії плавлення, але є дані з її складових. Так, для оксидно-карбідної кераміки (марок ВОК60, ВОК71), які складаються зі сполучення оксиду алюмінію (Al₂O₃) та карбіду титану (TiC), можна оцінити питому енергію плавлення: для Al₂O₃ вона дорівнює 1108 кДж/кг, для TiC – 1094 кДж/кг, для кераміки – 1100 кДж/кг [7]. Розрахунок питомої енергоємності шліфування за традиційним показником $\Delta E = N/Q$ для кераміки ВОК60 складає 35–50 кДж/см³, питома теплоємність її плавлення – 1100 кДж/кг або 4,62 кДж/см³. Тобто, якщо розрахунки провадити за традиційним показником ΔE , то для кераміки, як і для сталі [7], цей показник істотно перевищує питому теплоту плавлення, тільки для кераміки лише на порядок, а для сталі на два порядки.

Тобто маємо явне протиріччя, адже за таких умов будь-яка обробка керамічних матеріалів, низькопродуктивна чи високопродуктивна, повинна попадати у область пластичності, але цього не відбувається. Як показано вище це може бути лише у разі перевищення критичної продуктивності шліфування, або за збільшення чи зменшення швидкості різання. Вирішення такого протиріччя було здійснено через застосування нового, розробленого автором [7], показника, який враховує нарівні з ефективною потужністю та продуктивністю обробки, ще і зношування робочого шару круга:

$$E_{\text{пнт}} = E/m = 240 \cdot 10^5 N_{\text{эф}} q_p / (QK\gamma_{\text{нтм}}), \text{ кДж/кг.} \quad (1)$$

Для того, щоби визначити питому енергоємність за вказаними вище двома підходами і оцінити їхню ефективність, було використано три позиції (див. рис. 1): для продуктивності 750 мм³/хв (відповідає області стабільності), для продуктивності 2000 мм³/хв (відповідає закритичній області), та області, де наявні сліди пластичності. Тобто, чим більше енергоємність процесу оброблення буде наближатися до теплоємності плавлення кераміки, тим більше буде слідів пластичності під час обробки. Для традиційного показника ΔE енергоємність за продуктивності 750 мм³/хв буде складати 40 кДж/см³, а за 2000 мм³/хв – 60 кДж/см³, тобто в обох випадках питома енергоємність шліфування на порядок перевищує теплоємність плавлення кераміки (4,62 кДж/см³). А це означає, що навіть за невеликої продуктивності шліфування кераміки гарантовано маємо потрапляти в режим пластичності, а насправді, як показано вище (див. рис. 1), реально цього не відбувається.

Питома енергоємність, отримана за формулою (1), за продуктивності 750 мм³/хв буде складати 91,4 кДж/кг, а за продуктивності 2000 мм³/хв – 500,6 кДж/кг,

тобто для стабільної області питома енергоємність буде значно меншою за питому теплоємність плавлення (1100 кДж/кг), а для закритичної області вона значно наближається до неї, а відтак і слідів пластичності під час обробки тут буде більше. Зрозуміло, що для продуктивності верстата WBM300 (4000 мм³/хв) питома енергоємність фактично зрівняється з питомою теплоємністю плавлення і слідів пластичності буде значно більше.

У разі шліфування керамічних матеріалів Si₃N₄ + В₄С – пластин для обробки з ударними навантаженнями та керамічних кульок, що є досить важкооброблюваними (табл. 2), швидкість (30 м/с) обертання круга відповідає критичній продуктивності шліфування і її зменшення до 15 м/с відповідає лівій гілці кривої швидкість обертання–знос круга. Зменшення швидкості різання з 30 до 15 м/с відразу переводить обробку в режим підвищеної питомої енергоємності, яка фактично наближається до питомої теплоємності плавлення (див. табл. 2).

Аналіз формули розрахунку критичної продуктивності [8], свідчить про те, що у разі застосування алмазних кругів зниженням швидкості обертання круга може перевести обробку в область пластичності, що підтверджують дані табл. 2 за показником питомої енергоємності шліфування. Але водночас для збереження значення критичної продуктивності необхідно знижувати зернистість алмазів в крузі і збільшувати їхню міцність, з врахуванням також одночасного підвищення їхнього утримання в зв'язці шляхом зміни зв'язки круга з полімерної на металічну [12]. Слід звернути увагу також на те, що під час шліфування керамічних матеріалів шорсткість обробленої поверхні *Ra* зростає зі збільшенням зернистості алмазів, повздовжньої та поперечної подач і знижується з підвищенням швидкості круга [12]. Тому у разі переведення обробки в область пластичності необхідно вживати заходи до зниження висотних параметрів шорсткості, наприклад зменшувати зернистість алмазів: зі зменшенням зернистості алмазів з 160/125 на 100/80 зменшується і показник шорсткості *Ra* (див. табл. 2).

Таблиця 2. Показники шліфування пластин Si₃N₄ + В₄С з продуктивністю 1000 мм³/хв алмазними кругами 12А2-45° 150×10×3×32 на метало-полімерній зв'язці В1-13 з відносною концентрацією алмазів 100 %

№	Характеристика алмазних зерен	<i>q_p</i> , мг/г	<i>N_{эф}</i> , кВт	<i>E_{пит.}</i> , кДж/кг	<i>Ra</i> , 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
3	АС4 100/80	18	0,85	1049	0,42
4	АС4МА 100/80	19	1,0	1303	0,50

ВИСНОВКИ

Традиційний метод оцінки питомої енергоємності за відношенням потужності шліфування до продуктивності обробки не дає адекватного результату, оскільки питома теплоємність оброблення майже на порядок перевищує питому теплоємність плавлення керамічних матеріалів, а тому будь-яка алмазна обробка відразу має потрапляти у режим пластичності, чого реально не відбувається.

Застосування нового підходу до оцінки питомої енергоємності алмазного шліфування з урахуванням зношування робочого шару алмазного круга допомагає оцінити можливість досягнення енергетичних умов переходу обробки керамічних матеріалів у пластичний режим.

Врахування зносу робочого шару алмазного круга показало, що розгляд процесу алмазної обробки будь-яких матеріалів, в тому числі і керамічних, слід вести з урахуванням реальної формозміни ріжучої поверхні алмазного круга і запропонованого автором [8] положення про критичну продуктивність обробки.

За формулою автора [7] для розрахунку питомої енергоємності шліфування, яка враховує нарівні з ефективною потужністю та продуктивністю обробки також знос робочого шару круга, досягнення пластичного режиму обробки керамічних матеріалів, коли обробка переводиться в режим підвищеної питомої енергоємності, який фактично наближається до питомої теплоємності плавлення, можливе лише за умов підвищеної, закритичної продуктивності обробки або зниженої швидкості обертання круга.

V. I. Lavrinenko¹, V. Yu. Solod²

¹Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine

Determining the conditions for achieving the plastic mode of diamond grinding of ceramic materials from the standpoint of estimating energy costs during processing

The plastic mode of processing brittle materials, the influence of changes in the shape of the working surface of the diamond wheel during the processing, and the ways to achieve such a mode have been studied. For an adequate assessment of the energy intensity of processing with diamond wheels, it is proposed to calculate the specific energy intensity of grinding, taking into account the volume of material spent during the processing of the working layer of the wheel. The formula for calculating the specific energy capacity in the case of diamond grinding of ceramic materials is given. 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 of ceramic materials.

Keywords: diamond grinding, specific energy intensity of grinding, specific heat capacity of melting, ceramics, plastic mode.

1. Пилянкевич А.Н., Мельникова В.А., Кулик А.И. Механизм структурообразования и дефектность керамики в системе Al_2O_3-TiC . *Сверхтв. материалы*. 1988. № 5. С. 17–21.
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. Vol. 824. P. 169–179.
4. Примак Л.П., Александрова Л.И. Влияние алмазной обработки на прочность керамики. *Синт. алмазы*. 1976. Вып. 3. С. 70–72.
5. Танович Л. Механизм шлифования режущей керамики. *Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования: Сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты*. Киев, 2002. С. 524–529.
6. Kovalchenko A.M. Studies of the ductile mode of cutting brittle materials (A review). *J. Superhard Mater.* 2013. Vol. 35, no. 5. P. 259–276.

7. 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.
8. Lavrinenko V. Grinding wheels of superhard materials for diamond-abrasive processing: new in the famous. Kyiv: Akadempriodyka, 2019. 190 p.
9. Обработка полупроводниковых материалов / под ред. Н.В. Новикова, А. Бертольди. Киев: Наук. думка, 1982. 256 с.
10. Грдзелишвили, Г.Ю. Низкотемпературное прецизионное шлифование твердых сплавов. *Сверхтв. материалы.* 1986. № 1. С. 54–57.
11. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. Киев: Наук. думка, 1981. 300 с.
12. Лавріненко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / під заг. ред. акад. НАНУ М.В. Новікова. Київ: ІНМ НАН України, 2013. 456 с.
13. Nakajama T., Tsukamoto Sh., Sugano N. Phenomena in the very low speed grinding process (Part 1). The very low speed grinding process. *J. Jap. Soc. Prec. Eng.* 1990. Vol. 56, no. 10. P. 2075–2080.
14. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. Москва: Машиностроение, 1977. 263 с.
15. Полянський В.І., Новіков Ф.В. Розроблення та впровадження у виробництво ефективних технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы Международ. науч.-техн. конф., г. Одесса, 22–24 авг. 2021 г.* Одесса: ОНПУ, 2021. С. 140–147.

Надійшла до редакції 26.11.21

Після доопрацювання 10.05.22

Прийнята до опублікування 30.05.22