

Jinyang Xu*, Min Ji, Linfeng Li, Ming Chen

State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,
School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai, P.R. China

*xujinyang@sjtu.edu.cn

Оцінка полікристалічних алмазних інструментів при фрезеруванні попередньо спеченої та повністю спеченої цирконієвої кераміки

Полікристалічний алмаз (ПКА) – надтвердий інструментальний матеріал, здатний протистояти різкій взаємодії інструменту при обробці твердих заготовок завдяки його відмінним термомеханічним властивостям. Цирконієва кераміка є одним з видів відновлювальних матеріалів біомедичного класу, які широко використовують в клінічному стоматологічному протезуванні, завдячуючи чудовій біосумісності та прекрасним естетичним ефектам. Здійснено серію експериментів з фрезерування оксиду цирконію при використанні інструментів з полікристалічних алмазів. Основною метою була оцінка зносостійкості таких інструментів під час фрезерування діоксиду цирконію. Було досліджено два типи зразків цирконієвої кераміки – попередньо спечену та повністю спечену кераміку 3Y-TZP. Продуктивність інструменту оцінювали за зносом, а морфологію зношеної поверхні інструменту – як за допомогою цифрового мікроскопа, так і вимірювача топографії поверхні. Виявлено основні механізми, що регулюють знос інструменту з полікристалічних алмазів у разі обробки різних зразків спеченої кераміки.

Ключові слова: інструменти з полікристалічних алмазів, цирконієва кераміка, фрезерування загартованих деталей, характер зношування, механізми зношування.

ВСТУП

Цирконієва кераміка стає все більш привабливою у відновлювальній стоматології завдяки її високій міцності, високій ударній в'язкості, хорошій біосумісності та прекрасним естетичним ефектам [1–4]. Високі механічні та хімічні властивості діоксиду цирконію роблять його ідеальною альтернативою звичайним металевим сплавам для біомедичного застосування [5]. Серед сімейства діоксиду цирконію тетрагональний полікристал оксиду цирконію (3Y-TZP), стабілізований іттрієм (3 % (мол.)), є біомедичний матеріал, який найбільш використовують для виготовлення зубних коронок і фіксованих часткових протезів. У разі реального медичного застосування зазвичай використовують два типи цирконієвої кераміки, виготовлені за різної температури спікання, а саме попередньо спечену і повністю спечену. Незважаючи на те, що механічні властивості 3Y-TZP значно залежать від процесу спікання [6], кераміку досить важко різати, вона має вкрай погану оброблюваність [6–9]. Особливі проблеми виникають через притаманну їй

високу крихкість, що призводить до серйозних пошкоджень приповерхневого шару [5, 10], і високу твердість, що призводить до надмірного зносу інструменту. Як наслідок, погана обробка цирконієвої кераміки стає значною перешкодою для її використання.

Для реалізації ефективної механічної обробки діоксиду цирконію необхідно використовувати інструменти з надтвердих матеріалів, для того щоб відокремити стружку від керамічної основи, тому алмазний інструмент з відмінними механічними та трибологічними властивостями стає можливим вибором [11–13], який було застосовано у профілюванні кераміки, наприклад, діоксиду цирконію [14] і карбиду кремнію [15, 16]. Зокрема, полікристалічний алмаз може бути перспективним інструментальним матеріалом, здатним протистояти великим механічним навантаженням та надмірним термічним впливам під час процесу видалення кераміки. Це пояснюється високою твердістю, чудовими термомеханічними властивостями та високою зносостійкістю [17]. В даний час більшість досліджень, що стосуються виробництва цирконієвої кераміки, зосереджені на будь-якому шліфуванні [10, 18–22] або операціях швидкісного фрезерування [3, 9, 17, 23, 24]. Більшість науковців вказують на технічні труднощі у досягненні бажаної цілісності поверхні для цирконієвої кераміки через особливості матеріалів, пов'язані з крихкістю. Під час обробки кераміки 3Y-TZP зазвичай одержують погану якість поверхні, що характеризується значною кількістю порожнин і тріщин. Детального дослідження, що стосується ефективності фрезерування інструменту із полікристалічних алмазів (ПКА), для різної спеченої цирконієвої кераміки суттєво не вистачає. Оскільки використання ПКА є можливим інструментальним засобом для здійснення фрезерування загартованих деталей з діоксиду цирконію, дослідження його зносостійкості та відповідних характеристик стає важливим для досягнення високоєфективних і якісних результатів обробки.

У даній роботі досліджували характеристики зношування інструментів з ПКА під час фрезерування загартованих деталей з кераміки 3Y-TZP. Два типи заготовок із задалегідь спеченого діоксиду цирконію, отриманого за відносно низької температури та з повністю спеченого діоксиду цирконію, було випробувано експериментально. Проведено порівняльну оцінку зносу та його механізмів інструментів із ПКА. Результати цієї роботи дають наукову інтерпретацію характеристик інструменту із ПКА після фрезерування цирконієвої кераміки.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДЕТАЛІ

Характеристика заготовок із цирконієвої кераміки

Порошки 3Y-TZP, надані компанією Jiawei Co., Ltd. (Zhuhai, China), використовували для виготовлення зразків заготовок діоксиду цирконію. На початковому етапі порошкоподібний 3Y-TZP спочатку піддавали сухому пресуванню за тиску 90 МПа, а потім гарячому пресуванню за температури 300 °С за тиску 240 МПа з утворенням сирих пресованих заготовок. Після цього керамічні блоки спікали всередині спікальної печі в атмосферному середовищі. Дві різні температури спікання 1200 і 1500 °С було використано для створення попередньо спечених і повністю спечених зразків з діоксиду цирконію. Після процесу спікання щільність двох зразків діоксиду цирконію вимірювали за допомогою методу Архімеда. Результати свідчать про те, що щільність для кераміки, отриманої за температури 1200 і 1500 °С була 5,18 і 6,04 г/см³ відповідно. Крім того, для вимірювання мікротвердості двох зразків кераміки за навантаження 5 кг і витримки 15 с використовували вимірю-

вач твердості за Віккерсом ZHVB-10A. Значення твердості за Віккерсом кераміки, спеченої за температури 1200 і 1500 °С, становили відповідно 519 і 1295 HV. Фазовий склад двох зразків кераміки досліджували також за допомогою рентгенівського дифрактометра ULTIMA IV (рис. 1). Оскільки дифракційні піки попередньо спеченої та повністю спеченої кераміки перекриваються, вони обидва складаються з типової тетрагональної та моноклінної фаз діоксиду цирконію у відсутності кубічної фази. Попередньо спечений зразок складався з 98,56 % тетрагональної фази і 1,44 % моноклінної фази, тоді як повністю спечений зразок складався з 98,75 % тетрагональної фази і 1,25 % моноклінної фази. Мікроструктуру двох зразків кераміки було досліджено за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM) MIRA3 TESCAN (рис. 2). Для попередньо спеченого зразку діоксиду цирконію розмір зерна становив ~ 151,7 нм, матеріал був ще повністю не ущільнений, містив різні пористості й порожнини на його поверхні. Внаслідок кластеризації кристалічних зерен на поверхні матеріалу утворюється безперервна пористість і тому площа контакту твердої фази стає малою. Хоча матеріал мав характеристики, що були типовими для кераміки, у нього була низка міцність. Для повністю спеченої цирконієвої кераміки розмір зерна дорівнює ~ 522,6 нм, поверхня матеріалу повністю ущільнена, що свідчить про те, що між зернами немає порожнин. Таким чином, такий матеріал має міцні міжкристалічні зв'язки, що приводить до більшої твердості та водночас до крихкості керамічної основи.

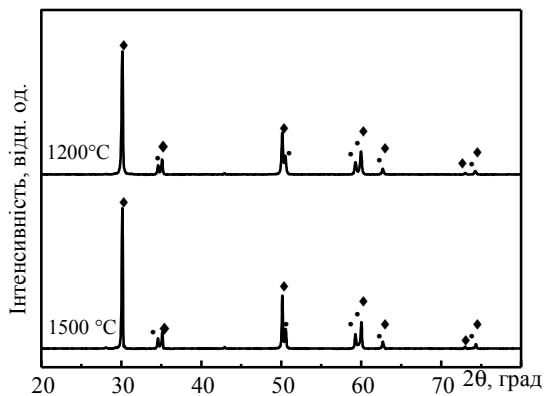


Рис. 1. XRD-зображення попередньо спеченої та повністю спеченої цирконієвої кераміки 3Y-TZP: моноклінна (♦) і тетрагональна (•) фази.

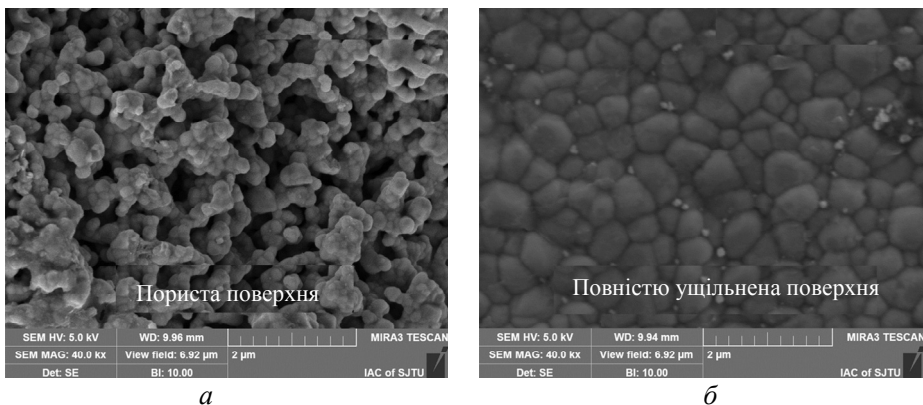


Рис. 2. Мікроструктура попередньо спеченої за температури $T_s = 1200$ °С (а) та повністю спеченої за температури $T_s = 1500$ °С (б) цирконієвої кераміки 3Y-TZP.

Різальні інструменти, їх випробування фрезеруванням та дослідження після завершення обробки

Для фрезерування пазів було використано двосторонні фрези із ПККА, надані компанією ANDEKE Co., Ltd, їхні характеристики наведено в табл. 1. Фрезерування попередньо спеченої та повністю спеченого цирконієвої кераміки проводили на обробному центрі HURCO VMX42 (рис. 3). Фрезерування пазів проводили за незмінними умовами: фіксованою осьовою глибиною різання 0,10 мм, шириною різання 25 мм, частотою обертання шпинделя 5000 об/хв, подачею на зуб 5 мкм/хід. Для оцінки продуктивності інструменту під час фрезерування діоксиду цирконію було використано максимальну ширину зносу KB_{max} , виміряну на передній поверхні інструменту (як індикатор оцінки здатності ПККА обробляти два типи керамічних зразків). Крім того, морфологію поверхонь зношених крайок інструменту досліджували за допомогою цифрового мікроскопа KEYENCE VHX-500F для визначення основних механізмів, що регулюють знос та поломку різців із ПККА. Для кількісної оцінки геометричного погіршення крайок інструменту із ПККА під час фрезерування цирконієвої кераміки було використано профілометр ALICONA INFINITEFOCUS G5.

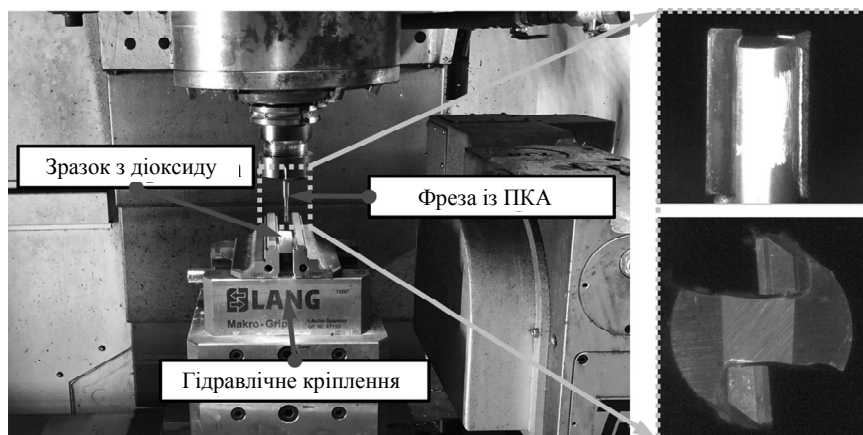


Рис. 3. Експериментальна установка для фрезерування цирконієвої кераміки 3Y-TZP і фреза, яку використовували.

Параметри фрези із ПККА, що використовували

Параметр	Значення
Діаметр, мм	4
Передній кут, град	4
Кількість різальних крайок	2
Головний задній кут, град	6

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз розвитку зносу та морфології інструменту

Вимірювали максимальну ширину зносу KB_{max} передньої поверхні для кожного інструменту з ПККА після фрезерування певної довжини цирконієвої кераміки. Отримані результати корелювали з довжиною різання L (рис. 4). Вважають, що інструмент не працює, коли значення KB_{max} досягає 300 мкм. Під час експериментів використовували цифровий мікроскоп KEYENCE

VHX-500F для вимірювання ступеня зносу інструменту та запису відповідної морфології зносу. Зафіксовані ознаки зносу інструментів з ПКА під час фрезерування двох видів спеченої кераміки детально представлено на рис. 5. На рис. 4 видно, що ступінь зносу інструментів із ПКА демонструє позитивний зв'язок із збільшенням довжини різання, незалежно від типу кераміки. При фрезеруванні попередньо спеченого діоксиду цирконію інструмент із ПКА загалом зазнає постійного збільшення зношування, тобто стабільно збільшується ширина зносу з довжиною різання. Термін служби інструменту завершується, коли довжина різання дорівнює 1400 мм. Навпаки, під час фрезеруванні повністю спеченого діоксиду цирконію інструмент із ПКА швидко зношується після короткого терміну його роботи, що становить ~ 350 мм довжини різання. Крім того, очевидно, що обробка повністю спеченого діоксиду цирконію призводить до значно більшого ступеня зносу, ніж різання попередньо спеченого, що свідчить про погану оброблюваність повністю спеченої кераміки. Термін служби інструменту з ПКА значно скорочується під час фрезерування такої повністю ущільненої заготовки на $\sim 75\%$, ніж під час фрезерування попередньо спеченої. Це явище пояснюється значно більшою твердістю та міцністю повністю ущільненої кераміки.

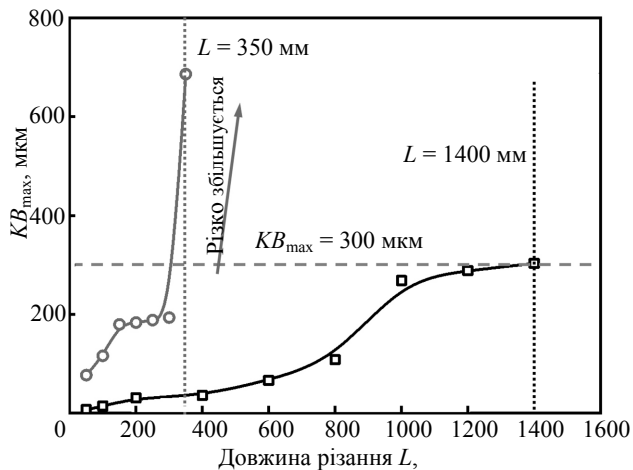


Рис. 4. Залежності максимальної ширини зносу KB_{max} інструментів із ПКА під час обробки попередньо спеченої за температури $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1) та повністю спеченої за температури $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2) цирконієвої кераміки від довжини різання L .

На рис. 5 показано порівняльну морфологію краєнок інструменту із ПКА після фрезерування попередньо спеченої та повністю спеченої цирконієвої кераміки. На рис. 5, а видно, що інструмент із ПКА в основному зазнає зносу під час фрезеруванні попередньо спеченого діоксиду цирконію. Під час переривчастого фрезерування тверді цирконієві частинки мають тенденцію сильно дряпати та стирати поверхню інструменту, що призводить до відшарування алмазних зерен і, отже, до утворення мікроямок, що знаходяться всередині зношеної поверхні інструменту. Коли довжина різання досягає 800 мм, ямки поверхонь краєнок ще більше збільшуються і мають тенденцію об'єднуватися між собою. За таких обставин міцність крайки інструменту має бути значно зменшена через втрату цілісності поверхні (див. рис. 5, в). З продовженням взаємодії інструмент–кераміка крайки інструменту, представлені різними мікроямками, стають схильними до відколювання та відшарування країв (див. рис. 5, з та д), що, як наслідок, призводить до можливої поломки інструменту.

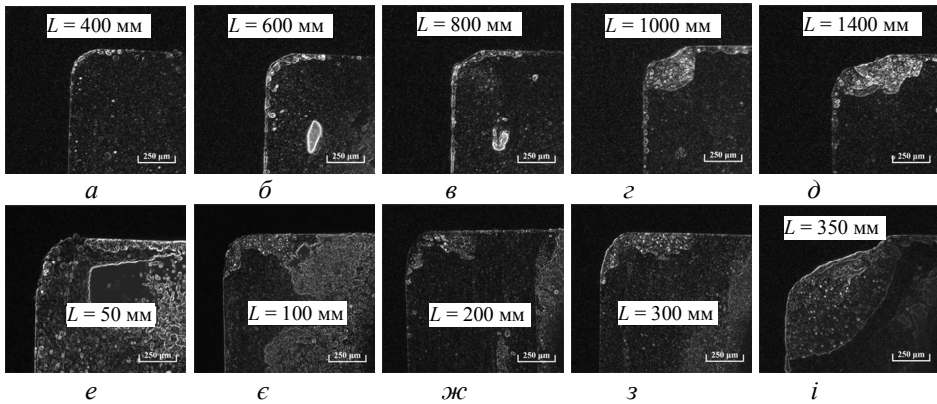


Рис. 5. Порівняльна морфологія зносу крайок інструменту з ПКА після фрезерування різної цирконієвої кераміки: попередньо спечена (а–д) і повністю спечена (е–і) кераміка.

Щодо повністю спеченої цирконієвої кераміки, різальні крайки також тягнуть за собою випадання зерна та сколювання через переважання зношування на ранній стадії зносу (див. рис. 5, е). Зі збільшенням довжини різання ступінь зношування передньої крайки різко зростає і утворюються велика площа відколів та відшарувань (див. рис. 5, е–з). Коли відстань різання досягає 350 мм, геометрична загостреність різальної крайки із ПКА повністю втрачається (див. рис. 5, і), що призводить до поломки інструменту. Оскільки повністю спечена цирконієва кераміка має набагато більш високу твердість і міцність, ніж попередньо спечена, інструмент із ПКА піддається вищому рівню механічних навантажень під час процесу фрезерування, що спричиняє випадіння зерен ПКА та можливе пошкодження у вигляді сколів. Крім того, оскільки повністю спечена цирконієва кераміка була повністю ущільнена, міцність міжкристалічного зв'язку повинна бути дуже високою. Таким чином, транскристалічний розрив частіше виникає під час процесу видалення матеріалу. Більш того, оскільки трансгранульована тріщина споживає більше енергії, ніж міжкристалічна тріщина, вона має тенденцію до підвищення температури фрезерування під час різання діоксиду цирконію, а отже, прискорює графітизаційний знос інструментів із ПКА.

Характеристика морфології крайок інструменту

Для кількісної оцінки погіршення геометричних параметрів крайок інструменту із ПКА було використано профілометр ALICONA для 3D-сканування та реконструкції кінцевих профілів зношених крайок (див. рис. 6). На рис. 6, а видно, що під час фрезерування попередньо спеченої кераміки як передня, так і задня поверхні інструменту, здається, зазнають різного ступеня зносу, за такої умови викришування та відколи крайок переважають над зносом передньої поверхні, водночас знос задньої поверхні в основному утворюється внаслідок поширення граничного зносу на бокову поверхню. Крім того, варто зауважити, що як передня, так і задня області зносу здебільшого зосереджені вздовж зон крайок інструменту, а геометричні розміри інших областей основних різальних крайок в основному залишаються неушкодженими, не зазнаючи серйозних спотворень або видозмін (див. рис. 6, а). Картину повного зносу інструментів із ПКА після фрезерування повністю спеченої цирконієвої кераміки представлено на рис. 6, б. Видно, що інструмент дуже зношений. За той самий інтервал сканування передня поверхня інструменту була майже повністю відшарована, а задня поверхня інструменту – сильно зношена. До того ж, основна різальна

крайка була повністю пошкоджена під час переривчастої взаємодії інструмент–кераміка. Це явище пов'язане з графітизаційним зносом, викликаним високою температурою фрезерування, за яким утворюється шар графіту на поверхні інструменту. Під дією високочастотних ударних навантажень відбувається легке ковзання шарів графіту відносно один одного, що призводить до відшарування атомів вуглецю від поверхні інструменту на значній площі.

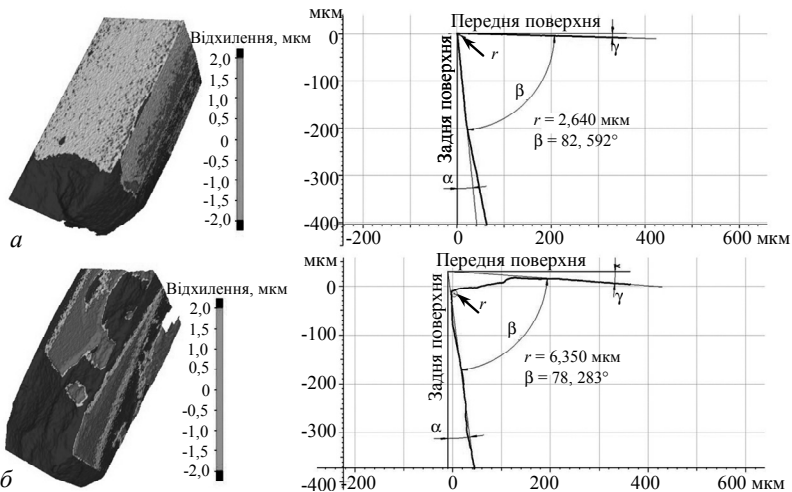


Рис. 6. 3D-морфологія і профілі зношених інструментів з ПКК після фрезерування попередньо спеченої (а) та повністю спеченої (б) цирконієвої кераміки.

Для сканування профілів основних різальних крайок інструментів із ПКК після фрезерування попередньо спеченої та повністю спеченої цирконієвої кераміки було використано профілометр ALICONA. Сканували частково основні різальні крайки інструментів із ПКК, область сканування позначена лінією *S* на рис. 7, а. Починаючи з вихідного положення лінії *S*, праворуч від неї було відскановано 50 профілів для обчислення радіуса затуплення в різних положеннях основних різальних крайок. Отримані результати показано на рис. 7, б. Зрозуміло, що інструмент із ПКК зазнає незначного затуплення крайок із середнім радіусом крайки 6,42 мкм після фрезерування попередньо спеченої цирконієвої кераміки. Наявність кількох піків хвиль на рис. 7, б означає появу певної кількості мікротріщин уздовж основної різальної крайки для фрезерування попередньо спеченої кераміки. Що стосується повністю спеченої кераміки, то інструмент із ПКК, як виявлено, має більш високий ступінь затуплення крайок, при якому середній радіус крайки досягає 16,18 мкм, і має місце серйозне руйнування через викришування. Таким чином, наведений вище аналіз підтверджує, що інструменти з ПКК мають сильний знос крайок та затуплення під час фрезерування повністю спеченої цирконієвої кераміки, водночас ступінь пошкодження крайок під час обробки попередньо спеченої кераміки нижчий завдяки відносно меншій твердості та міцності. Результати дослідження також підтвердили набагато гіршу оброблюваність повністю спеченої цирконієвої кераміки.

ВИСНОВКИ

Порівняльне дослідження ефективності інструменту із ПКК під час фрезерування цирконієвої кераміки 3Y-TZP застосовано для оцінки здатності інструменту із ПКК обробляти такі надтверді керамічні заготовки.

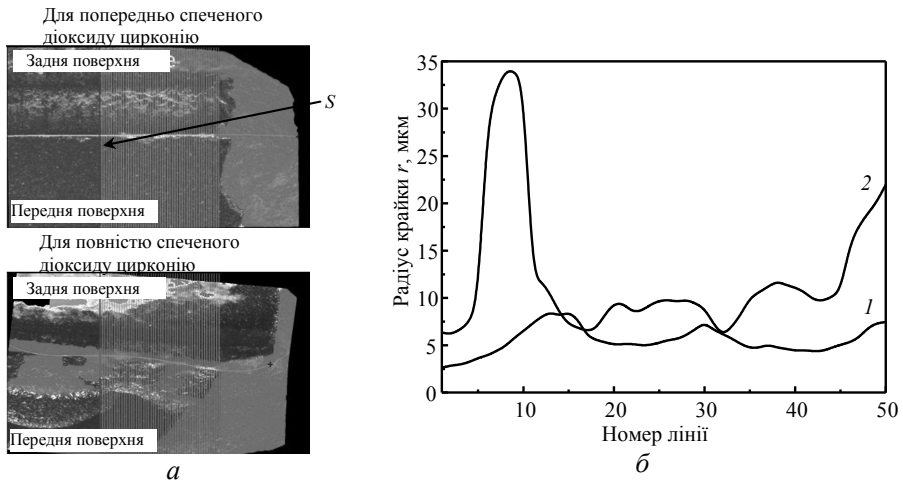


Рис. 7. Ескізна схема позиції сканування (а) та зміна радіусу крайки (б) для інструментів з ПКА після фрезерування попередньо спеченої за температури 1200 °С (1) та повністю спеченої за температури 1500 °С (2) цирконієвої кераміки.

Способи механічної обробки попередньо спеченої та повністю спеченої цирконієвої кераміки порівнювали за допомогою аналізу характеристик інструменту. Результати показали, що інструмент із ПКА зазнає більш швидкого зношування і має менший термін служби при фрезеруванні повністю спеченої цирконієвої кераміки.

Домінуючими механізмами зношування інструментів із ПКА під час фрезерування попередньо спеченої кераміки є випадіння зерна, викришування і відколювання, спричинені абразивним зносом, тоді як для повністю спеченого діоксиду цирконію діючими механізмами є переважно абразивний та графітаційний знос.

Жорстка взаємодія між інструментом і керамікою під час процесу видалення керамічної стружки викликають погіршення геометричних характеристик інструменту із ПКА, що призводить до затуплення та формозміни різальних крайок. Більш того, повністю спечений діоксид цирконію демонструє набагато гіршу оброблюваність, ніж попередньо спечений, через його повне ущільнення, що приводить до значно більшої твердості та міцності.

ФІНАНСУВАННЯ

Роботу було підтримано Національним природничим науковим фондом Китаю (грант No 522175425).

Jinyang Xu, Min Ji, Linfeng Li, Ming Chen
 State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,
 School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
 Shanghai, P.R. China
 Evaluation of polycrystalline diamond tools in milling
 of pre-sintered and fully-sintered zirconia ceramics

Polycrystalline diamond (PCD) is a superhard tool material capable of resisting harsh tool-work interactions when machining hard workpiece materials due to its superior thermo-mechanical properties. Zirconia ceramic represents one type of biomedical-grade restorative materials being extensively utilized in clinical dental prosthodontics owing to its

outstanding biocompatibility and excellent esthetical effects. The present paper aims to carry out a series of milling experiments against the zirconia ceramics when using the PCD tools. The main objective of this work lies in evaluating the wear behavior of PCD tools following the milling of zirconia ceramics. Two types of zirconia specimens, including the pre-sintered and fully-sintered 3Y-TZP ceramics, were examined. The tool performance was assessed in terms of the wear development, and the worn tool surface morphologies were characterized using both the digital microscope and the surface topography measuring instrument. Moreover, the underlying mechanisms governing the PCD tool's wear progression were revealed with respect to different sintered ceramic specimens.

Keywords: polycrystalline diamond tools, zirconia ceramics, hard milling, wear behavior, wear mechanisms.

1. Ji M., Xu J., Chen M., El Mansori M. Enhanced hydrophilicity and tribological behavior of dental zirconia ceramics based on picosecond laser surface texturing, *Ceram. Int.*, 2020. Vol. 46, no. 6. P. 7161–7169.
2. Denry I., Kelly J.R. State of the art of zirconia for dental applications. *Dent. Mater.* 2008. Vol. 24, no. 3. P. 299–307.
3. Alao A.-R., Stoll R., Song X.-F., Miyazaki T., Hotta Y., Shibata Y., Yin L. Surface quality of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal in CAD/CAM milling, sintering, polishing and sandblasting processes. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2017. Vol. 65. P. 102–116.
4. Zinelis S., Thomas A., Syres K., Silikas N., Eliades G. Surface characterization of zirconia dental implants. *Dent. Mater.* 2010. Vol. 26, no. 4. P. 295–305.
5. Singh A., Solanki D., Sencha R., Singh R.K., Mote R.G., Singh R.K. Study and characterization of the ductile-brittle transition zone in sintered zirconia. *J. Manuf. Process.* 2020. Vol. 58. P. 749–762.
6. Stawarczyk B., Özcan M., Hallmann L., Ender A., Mehl A., Hämmerlet, C. H., The effect of zirconia sintering temperature on flexural strength, grain size, and contrast ratio. *Clin. Oral. Invest.* 2013. Vol. 17, no. 1. P. 269–274.
7. Mazaheri M., Simchi A., Golestani-Fard F. Densification and grain growth of nanocrystalline 3Y-TZP during two-step sintering. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2008. Vol. 28, no. 15. P. 2933–2939.
8. Denry I., Holloway J.A. Ceramics for dental applications: A review. *Materials.* 2010. Vol. 3, no. 1. P. 351–368.
9. Ha S.J., Shin B.C., Cho M.W., Lee K.J., Cho W.S. High speed end-milling characteristics of pre-sintered Al₂O₃/Y-TZP ceramic composites for dental applications. *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 2010. Vol. 118, no. 1383. P. 1053–1056.
10. Yang M., Li C., Zhang Y., Jia D., Li R., Hou Y., Cao H. Effect of friction coefficient on chip thickness models in ductile-regime grinding of zirconia ceramics. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. Vol. 102, no. 5. P. 2617–2632.
11. Mechnik, V. A., Effect of hot recompaction parameters on the structure and properties of diamond–(Fe–Cu–Ni–Sn–CrB₂) composites. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2014. Vol. 52, no. 11–12. P. 709–721.
12. Kolodnits'kyi V.M., Bagirov O.E. On the structure formation of diamond-containing composites used in drilling and stone-working tools (A review). *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 1. P. 1–17.
13. Lavrinenko V.I., Solod V.Yu., Kashynskiy I.S., Dobroskok V.L. Determination of oxides intended for the surface modification of diamond grains by their functional characteristics. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 6. P. 417–422.
14. Pashchenko Ye.O., Sokhan' S.V., Sorochenko G.V., Savchenko D.A., Lazhevskaya O.V., Skorokhod S.V., Mikishchenko O.A. Effect of the tool composite porosity on the efficiency of profile diamond grinding of sapphire and zirconium dioxide. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 4. P. 264–275.
15. Filatov Yu.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I., Filatov O.Yu., Kovalev S.V., Kurilovich V.D., Danil'chenko M.A., Prikhna T.A., Borimskii A.I., Katsai A.M., Poltoratskii V.G. Polishing of optoelectronic components made of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2015. Vol. 37, no. 1. P. 48–56.
16. Sokhan S.V., Voznyy V.V., Redkin A.S., Savchenko V.H., Zubaniev E.M., Hamaniuk M.P. Wear of a diamond wheel during grinding of ceramic balls made of silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 6. P. 432–442.

17. Bian R., He N., Ding W., Liu S. A study on the tool wear of PCD micro end mills in ductile milling of ZrO₂ ceramics. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. Vol. 92, no. 5. P. 2197–2206.
18. Emami M., Sadeghi M. H., Sarhan A. Minimum quantity lubrication in grinding process of zirconia (ZrO₂) engineering ceramic. *Int. J. Min. Metall. Mech. Eng.* 2013. Vol. 1, no. 3. P. 1–4.
19. Ho C., Ding H., Chen X., Tsoi J., Botelho M. The effects of dry and wet grinding on the strength of dental zirconia. *Ceram. Int.* 2018. Vol. 44, no. 9. P. 10451–10462.
20. Huang H., Machining characteristics and surface integrity of yttria stabilized tetragonal zirconia in high speed deep grinding. *Mater. Sci. Eng. A.* 2003. Vol. 345, no. 1–2. P. 155–163.
21. Suya P.A.P., Arunachalam N., Vijayaraghavan L. Effect of grinding on subsurface modifications of pre-sintered zirconia under different cooling and lubrication conditions. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2018. Vol. 86. P. 122–130.
22. Yang, M., Li, C., Zhang, Y., Jia, D., Zhang, X., Hou, Y., Li, R., Wang, J., Maximum undeformed equivalent chip thickness for ductile-brittle transition of zirconia ceramics under different lubrication conditions, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2017. Vol. 122. P. 55–65.
23. Amat N.F., Muchtar A., Yew H.Z., Amril M.S., Muhamud R.L. Machinability of a newly developed pre-sintered zirconia block for dental crown applications. *Mater. Lett.* 2020. Vol. 261. P. 126996.
24. Lan T.-H., Wang C.-H., Chen K.-K., Wang M.-C., Lee H.-E. Milling properties of low temperature sintered zirconia blocks for dental use. *Mater. Sci. Eng. C.* 2017. Vol. 73. P. 692–699.

Надійшла 16.04.21

Після доопрацювання 21.05.21

Прийнята до друку 24.05.21