

Інструмент, порошки, пасти

УДК 666.762.5:621.914.1

Jinyang Xu*, Linfeng Li, Min Ji, 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

Дослідження зношування PCD інструменту при жорсткому фрезеруванні повністю спеченої кераміки 3Y-TZP

Розглянуто поведінку та механізми зношування інструментів з полікристалічного алмазу у разі жорсткого фрезерування кераміки 3Y-TZP. Зразки заготовки було виготовлено за температури повного спікання для повного емалювання підкладки з діоксиду цирконію, а пряму кромку з ПКА було напаяно на корпус інструменту з карбиду вольфраму вздовж напрямку його осі для забезпечення успішного ортогонального фрезерування зразка заготовки. Проведено серію експериментів із жорстким фрезеруванням зразків, змінюючи швидкість шпинделя на п'ятиосьовому обробному центрі з ЧПУ. Морфологію зношування кромки з ПКА досліджено за допомогою скануючого електронного мікроскопа для визначення домінуючих режимів зношування та моделей руйнувань, що регулюють жорстке фрезерування кераміки 3Y-TZP. Досліджено вплив частоти обертання шпинделя на характер зносу ПКА. За отриманими результатами надані технічні рекомендації щодо жорсткого фрезерування повністю спеченої кераміки 3Y-TZP.

Ключові слова: цирконієва кераміка, жорстке фрезерування, полікристалічний алмазний інструмент, знос інструментів.

ВСТУП

В останні роки полікристалічна кераміка з тетрагонального діоксиду цирконію (3Y-TZP), що стабілізована ітрієм, стає все більш привабливою у відновлювальній стоматології завдяки своїй високій міцності, високій твердості, високій термостійкості та чудовій біосумісності [1–8]. Наприклад, її широко використовують в сучасній медичній індустрії для проведення реставраційних робіт в стоматології, включаючи виготовлення ортодонтичних брекетів, абатментів на імплантатах, коронок та мостоподібних протезів тощо [9–11]. Підготовка цирконієвої кераміки включає процеси попереднього та повного спікання для консолідації частинок діоксиду цирконію з добавка-

© JINYANG XU, LINFENG LI, MIN JI, MING CHEN, 2022

ми ітрію, залежно від необхідного стану зразків кераміки. Спінання діоксиду цирконію за різної температури спричиняє перетворення між кубічною, тетрагональною та моноклінною фазами, що в кінцевому підсумку впливає на фазовий склад кераміки, а отже, і на її фізичні властивості. Як правило, повністю спечена кераміка з діоксиду цирконію має вищі механічні і фізичні властивості, ніж попередньо спечена, завдяки повному ущільненню цирконієвої основи. Крім того, зразки спеченого діоксиду цирконію обробляють механічно після вторинної виробничої операції, щоб отримати бажані форми та задані розміри. Через різні значення твердості між попередньо спеченою та повністю спеченою керамікою Y-TZP для її формування в основному задіяні два важливі методи виробництва, а саме, м'яка механічна обробка для частково спечених зразків і жорстка механічна обробка для повністю спечених зразків [4, 12, 13]. Оскільки повністю спечені заготовки з цирконію мають надзвичайно високу твердість і крихкість, вони демонструють набагато гіршу оброблюваність, ніж частково спечені. Тому виконувати операцію жорсткої механічної обробки досить складно через швидке зношування інструменту та його катастрофічні поломки, які виникають під час виробництва діоксиду цирконію. Щоб впоратися з проблемою різання, заміна звичайних інструментальних матеріалів надтвердими ріжучими інструментальними стає можливим рішенням. Наприклад, підтверджено, що алмазні інструменти, що мають чудові термомеханічні властивості, довели свою ефективність під час обробки такої кераміки, як діоксид цирконію [14] та карбід кремнію [15, 16]. Більш того, інструменти з полікристалічного алмазу (ПКА), що мають набагато більшу твердість, ніж інструменти зі штучним алмазним покриттям, також дають змогу завершити жорстку обробку зразків повністю спеченого оксиду цирконію. Проте, з огляду літератури, більшість наукових праць зосереджено на обговоренні або фрезерування попередньо спеченого оксиду цирконію [1, 4, 17–19], або фрезерування діоксиду цирконію [10, 20–22], є нечисленні повідомлення про дослідження, що займаються жорстким фрезеруванням повністю спеченої кераміки TZP. Крім того, знос інструментів є важливою проблемою, пов'язаною з різанням повністю спеченої цирконієвої кераміки, і дотепер процес зношування інструментів з ПКА під час різання кераміки з діоксиду цирконію залишається недостатньо вивченим.

Отже, ця робота спрямована на проведення експериментів із жорстким фрезеруванням повністю спеченої цирконієвої кераміки з використанням інструментів з ПКА для дослідження поведінки зношування інструменту. Оскільки основні характеристики цирконієвої кераміки під час механічної обробки, такі як сила і температура різання та якість поверхні, вже було розглянуто в попередньому дослідженні авторів [23], в даній роботі головну увагу було зосереджено лише на зносостійкості інструментів з ПКА. Для досягнення цієї мети тетрагональний полікристал діоксиду цирконію (3Y-TZP), стабілізований ітрієм (3 % (мол.)), було підготовлено за температур повного спінання для отримання зразків заготовки. Експерименти з фрезерування проводили для різних параметрів процесу, а SEM-дослідження – на зношених поверхнях інструментів з ПКА за різних умов різання. Ключове значення даного дослідження полягає у виявленні домінуючих механізмів зносу та відмов під час жорсткого фрезерування повністю спеченої кераміки 3Y-TZP.

ЕКСПЕРИМЕНТ

Підготовка та характеристика цирконієвої кераміки 3Y-TZP

Для виготовлення блоків з діоксиду цирконію використовували порошки 3Y-TZP, надані компанією “Jiawei Co., Ltd.” (Zhuhai, China). Порошкоподіб-

ний 3Y-TZP спочатку піддавали напівсухому пресуванню за тиску 90 МПа, а потім гарячому ізостатичному пресуванню за температури 300 °С і тиску 240 МПа для формування сирих пресованих заготовок. Після цього керамічні блоки спікали за температури 1500 °С всередині печі в атмосферному середовищі для створення повністю спечених зразків діоксиду цирконію. Після досягнення встановлених температур зразки витримували за температури спікання протягом однієї години, а потім охолоджували до кімнатної температури. Фізико-механічні властивості керамічних зразків наведено в табл. 1. Щільність повністю спеченої цирконієвої кераміки вимірювали за методом Архімеда, її значення становить 6,04 г/см³.

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості повністю спеченої цирконієвої кераміки 3Y-TZP

Густина ρ , г/см ³	Твердість, HV	Модуль пружності, E , ГПа	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Коефіцієнт Пуассона ν
6,04	1300	217	2,5	0,34

Крім того, твердоміром за Віккерсом ZHVB-10A вимірювали мікротвердість керамічних зразків за навантаження 5 кг протягом 15 с, отримана твердість за Віккерсом склала 1300 HV. Крім того, для дослідження структурного

стану повністю спеченої кераміки 3Y-TZP також використовували рентгенівський дифрактометр ULTIMA IV. Показано, що повністю спечена кераміка 3Y-TZP містить 98,75 % тетрагональної цирконієвої фази і 1,25 % моноклінної цирконієвої фази. Для характеристики мікроструктур цирконієвої фази кераміки 3Y-TZP було застосовано скануючий електронний мікроскоп (SEM) MIRA3 TESCAN (рис. 1). Поверхня матеріалу повністю спеченої кераміки 3Y-TZP була повністю ущільнена без пор і пустот і пор, а розмір зерен був

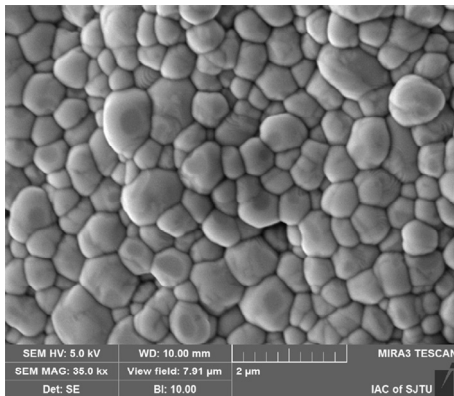


Рис. 1. SEM-аналіз мікроструктур повністю спеченої кераміки 3Y-TZP.

в межах 522,60 нм. Після процесу повного спікання кераміку 3Y-TZP розрізали на прямокутні блоки розміром 50×50×10 мм для формування зразків заготовки.

Експерименти з фрезерування

Експерименти з жорстким фрезеруванням повністю спеченої кераміки 3Y-TZP проводили на п'ятиосьовому обробному центрі HURCO VMX42 в сухих умовах. Щоб реалізувати операцію жорсткої механічної обробки, для різання заготовок з оксиду цирконію було використано фрези з ПКА, надані “Andeke Co., Ltd.” Пряму кромку з ПКА було напаяна на корпус інструменту з карбиду вольфраму (WC/Co) вздовж напрямку осі інструменту, що має нульовий спіральний кут для забезпечення успішного ортогонального фрезерування зразка заготовки. Характерні особливості різального інструменту з ПКА та фізи-

ко-механічні властивості матеріалу з ПКА зведено в табл. 2 і 3 відповідно. Блок діоксиду цирконію міцно затискали кріпленням на робочому столі верстата (рис. 2). Оскільки швидкість шпинделя часто відіграє суттєво важливу роль у зносі ріжучого інструменту під час різноманітних операцій механічної обробки, роботу було зосереджено лише на виявленні впливу різних швидкостей шпинделя на зростання зношування інструменту під час фрезерування кераміки. Щоб прояснити вплив високошвидкісного та низькошвидкісного фрезерування на зношування інструментів з ПКА, значення швидкості шпинделя n було ретельно підібрано, охоплюючи діапазони як низькошвидкісного, так і високошвидкісного різання. Для виключення впливу інших параметрів різання, подача на зуб f_z , радіальна глибина різання a_e і осьова глибина різання a_c залишалися постійними під час проведення експериментів. Детальну інформацію про застосовувані параметри фрезерування наведено в табл. 4. Після процесу фрезерування на зношених поверхнях інструменту з ПКА було проведено SEM та EDS дослідження, щоб дослідити основні механізми та збої, що визначають операцію фрезерування 3Y-TZP. Крім того, для кількісної оцінки ступеня зносу поверхонь інструменту було запропоновано також кількісний параметр, а саме середню ширину зносу VB по задній поверхні. Також було розглянуто вплив різних швидкостей шпинделя на знос інструментів з ПКА.

Таблиця 2. Параметри різального PCD-інструменту

Параметр	Значення
Тип інструменту	Фреза з прямими канавками
Основа (підкладка) інструменту	Карбід вольфраму (WC/Co)
Діаметр, мм	10
Передній кут, град	4
Основний задній кут, град	6
Довжина різальної кромки, мм	6

Таблиця 3. Фізико-механічні властивості інструментального PCD-матеріалу

Густина ρ , г/см ³	Твердість, HV	Модуль пружності E , ГПа	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Коефіцієнт Пуассона ν
4,1	8000	900	560	0,077

Таблиця 4. Параметри різання для твердого фрезерування повністю спеченої цирконієвої кераміки 3Y-TZP

Швидкість шпинделя n , об/хв	Подача на зуб f_z , мкм/з	Радіальна глибина різання a_e , мм	Осьова глибина різання a_p , мм
1500, 4500, 7500	11	0,06	5

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Обробка повністю спеченої цирконієвої кераміки є надзвичайно складним завданням серед виробничих процесів через високу твердість і крихкість тетрагональної фази з оксиду цирконію. Особливі проблеми пов'язані з видаленням крихкої стружки для повністю ущільненого цирконію, оскільки заго-

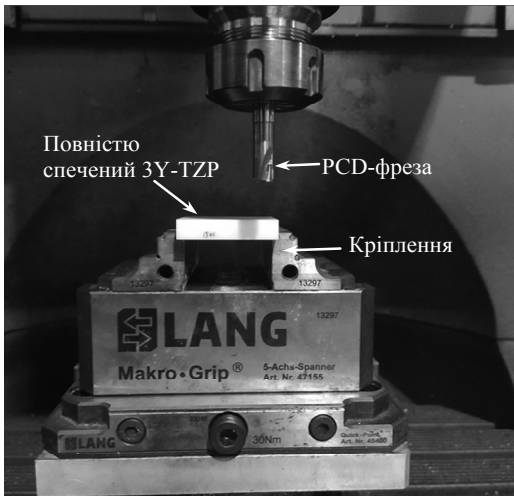


Рис. 2. Експериментальна установка для жорсткого фрезерування повністю спеченого зразка 3Y-TZP.

видалення стружки. У цій роботі особливий акцент зроблено на обговоренні морфології зношування як передніх, так і задніх поверхонь інструменту в різних умовах фрезерування.

Незважаючи на те, що повністю спечена кераміка 3Y-TZP демонструє високу твердість 1300 HV, інструмент з ПКА також може мати набагато більшу тверду (8000 HV) поверхню проти механічної взаємодії, що виникає через тетрагональну цирконієву фазу вбудовану всередину керамічної основи, що робить його можливим для виконання операції жорсткого фрезерування. Тому поверхня інструменту під час жорсткого фрезерування повністю спеченої кераміки 3Y-TZP буде сильно зношуватися. На рис. 3 показано SEM морфологію зношеної передньої грані для інструментів з ПКА за умови найнижчої швидкості фрезерування ($n = 1500$ об/хв). Зрозуміло, що тверда керамічна заготовка сильно впливає на поверхню інструменту з ПКА через надмірну контактну взаємодію тетрагональної фази всередині матеріалу 3Y-TZP. Результати також вказують на те, що під час сильної переривчастої взаємодії інструменту і кераміки у разі жорсткого фрезерування передня поверхня інструменту значно погіршується з утворенням чіткої зони, схильної до зносу. Це пов'язано з наявністю понад 98 % твердих тетрагональних структур діоксиду цирконію всередині керамічної основи, що забезпечує високу твердість поверхні інструменту для опору в процесі видалення матеріалу. Отже, на передній поверхні інструменту утворюються борозни. Оскільки зона передньої поверхні відповідає за поділ матеріалів стружки, то зона, схильна до зносу, фактично є зоною взаємодії інструменту і стружки. У разі збільшення зображення зношеної поверхні інструменту зона, що схильна до зношування, має вигляд нерівної поверхневої порожнини, утвореною відколом алмазних частинок. Це явище пов'язано із сильним ударом і дряпанням керамічної стружки, які викликають велике абразивне зношування поверхні інструменту з ПКА. Оскільки використана подача на зуб була дуже мала, область зношування в основному зосереджена вздовж зони кромки інструменту. Завдяки EDS-аналізу зони зношування на передній грані інструменту (рис. 4) у зоні різальної кромки інструменту виявлено невелику кількість елементів з діоксиду цирконію, що означає наявність частинок діоксиду цирконію на передній поверхні інструменту. На рис. 5 зображено морфологію зношеної задньої

товки в основному не зазнають пластичної деформації під час відділення стружки, що призводить до низької якості поверхні та надмірного зносу інструменту. Оскільки ця робота зосереджена виключно на зношуванні інструменту під час фрезерування повністю спеченого 3Y-TZP, аналізували лише явища зносу, пов'язані з операцією жорсткого різання. Загалом, у разі обробки крихких матеріалів часто зустрічається прогресуючий знос, оскільки частинки твердої основи можуть сильно стирати ріжучі кромки інструментів під час

поверхні інструменту. Уздовж ріжучої кромки інструменту з ПКА визначається зона відколу, яка характеризується відшаровуванням алмазу. Це вказує на катастрофічну поломку інструменту з ПКА під час низькошвидкісного фрезерування, що призводить до закінчення терміну служби інструменту.

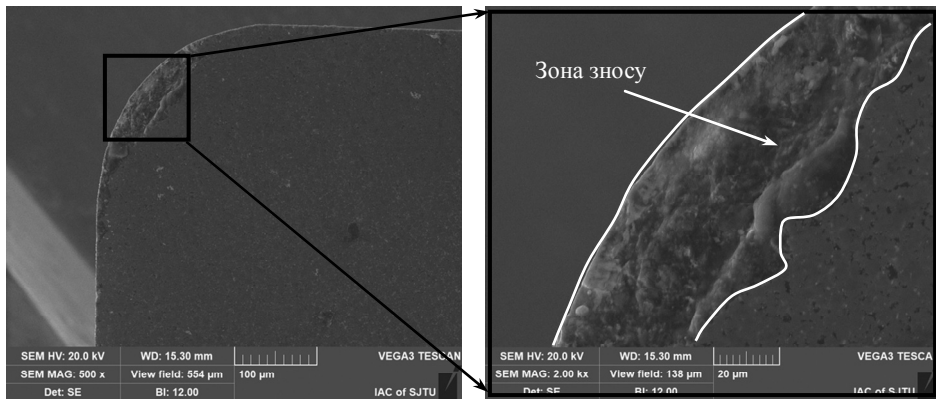
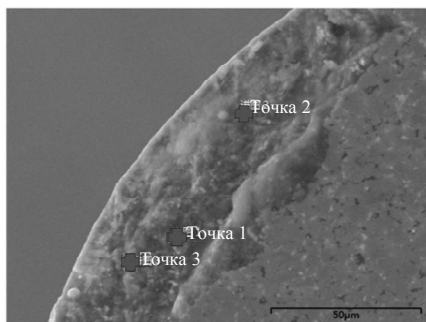


Рис. 3. SEM-морфології зношеної передньої грані PCD-інструменту за умови найнижчої швидкості фрезерування ($n = 1500$ об/хв).



EDS-результати вибраних точок у зоні зносу

wt %	Точка 1	Точка 2	Точка 3
C	85.53	79.72	95.07
O	3.67	16.47	
Co	8.60	2.92	2.96
Zr	0.43		0.28
W	1.77	0.89	1.69
Total	100.00	100.00	100.00

Рис. 4. EDS-аналіз вибраних точок у зоні зносу передньої поверхні інструменту ($n = 1500$ об/хв).

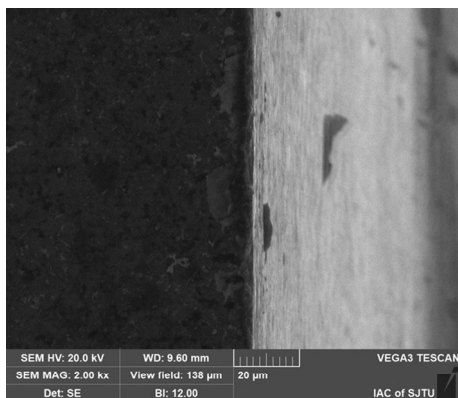
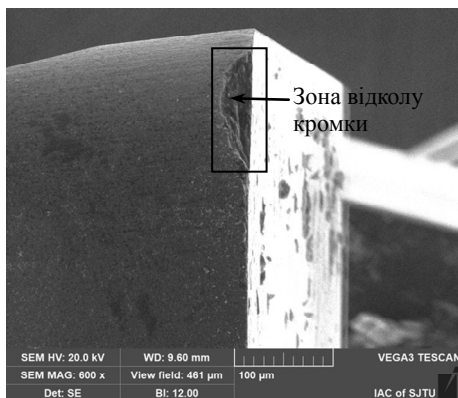


Рис. 5. SEM-морфології зношеної задньої поверхні PCD-інструменту за умови найнижчої швидкості фрезерування ($n = 1500$ об/хв).

На рис. 6 представлено морфологію зношеної передньої поверхні інструменту з ПКА, що працює в умовах середньої швидкості фрезерування ($n = 4500$ об/хв). Зазначається, що передня грань інструменту зазнає дуже мінімального ступеня зносу без наявності видимих порожнин або ямок. Навпаки,

передня грань виглядає дуже гладкою, і виявлено лише мінімальні ознаки стирання, що знаходяться поблизу кромки інструменту. Це означає, що відбувається стабільний процес фрезерування, який регулює поділ стружки повністю спеченого 3Y-TZP за використання помірному рівня швидкості шпинделя. Що стосується зношеної задньої поверхні (рис. 7), то інструмент демонструє мінімальну ступінь пошкодження кромки без появи сколів.

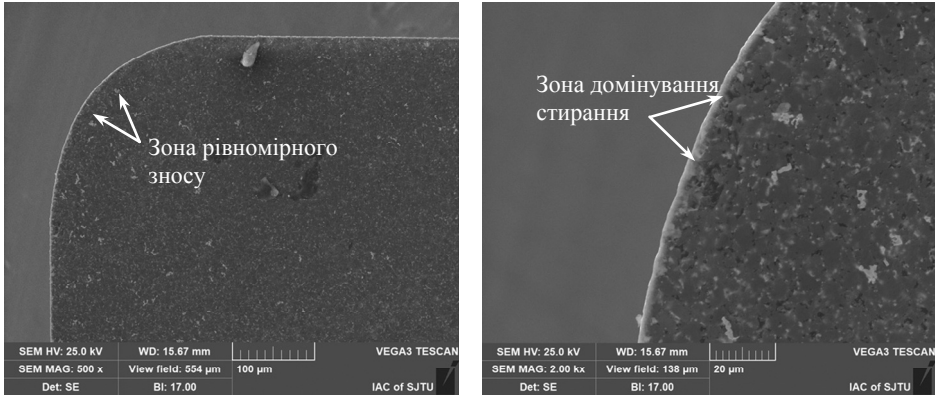


Рис. 6. SEM-морфології зношеної передньої грані PCD-інструменту за умови середньої швидкості фрезерування ($n = 4500$ об/хв).

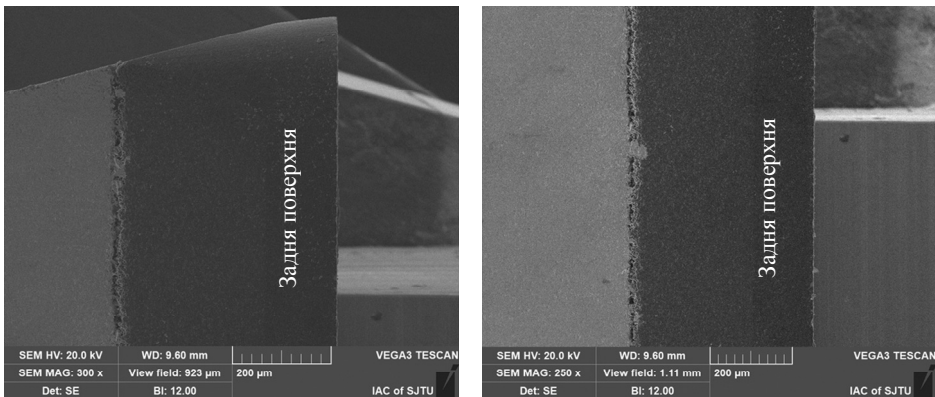


Рис. 7. SEM-морфології зношеної задньої поверхні PCD-інструменту за умови середньої швидкості фрезерування ($n = 4500$ об/хв).

На рис. 8 показано SEM-морфологію зношеної передньої поверхні інструментів з ПКА за умови найвищої швидкості фрезерування ($n = 7500$ об/хв). Видно, що морфологія передньої грані демонструє певну схожість з морфологією, отриманою за умови помірної швидкості фрезерування. Явних порожнин зносу і ямок в зоні передньої поверхні інструменту не утворюється. Під час EDS-аналізу вибраних точок у зоні переднього поверхні інструменту (рис. 9) було відзначено, що вздовж ріжучої кромки існує шар білого кольору, який, як підтверджено, є частинками діоксиду цирконію. Таке явище пов'язано з високою твердістю поверхні керамічної заготовки, що викликає сильне стирання і утворення борозен в інструменті з ПКА. Отже, керамічні уламки можуть стиратися з передньої поверхні інструменту, утворюючи липкий шар під час жорсткої взаємодії інструменту і кераміки під час фрезерування 3Y-TZP. Крім того, за допомогою SEM-дослідження задньої поверхні інструменту вздовж різальної кромки виявля-

но сліди абразивного зношування (рис. 10). Це пов'язано з надзвичайно твердими тетрагональними структурами з діоксиду цирконію всередині 3Y-TZP, які викликають сильні ерозії поверхні інструменту з ПКА, в результаті чого залишаються сліди стирання. Більш того, гострота кромки значно погіршується в умовах максимальної швидкості, що призводить до притуплення кромки інструменту з PCD.

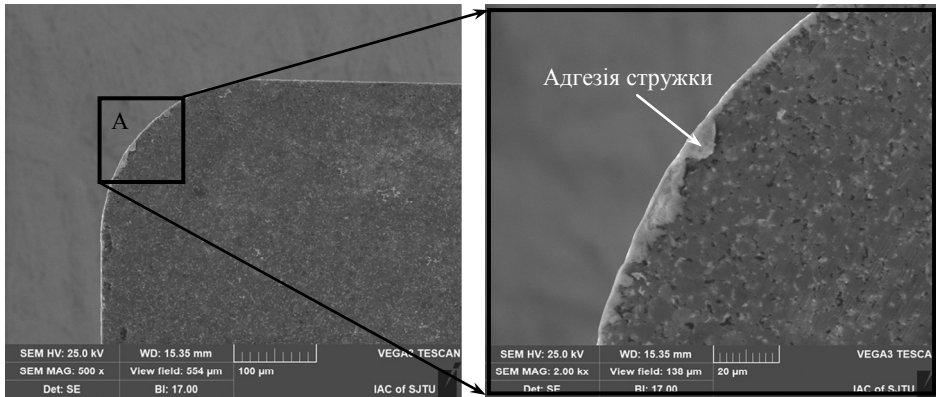
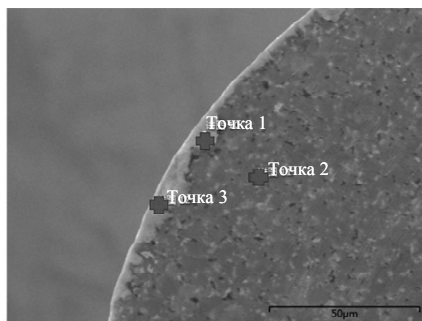


Рис. 8. SEM-морфології зношеної передньої грані PCD-інструменту за умови найвищої швидкості фрезерування ($n = 7500$ об/хв).



EDS-результати вибраних точок у зоні зносу

wt %	Точка 1	Точка 2	Точка 3
C	26.50	97.97	27.34
O	23.34	0.73	27.12
Co	1.26	1.30	1.40
Zr	48.90		44.14
W		0.00	
Total	100.00	100.00	100.00

Рис. 9. EDS-аналіз вибраних точок у зоні зносу передньої поверхні інструменту ($n = 7500$ об/хв).

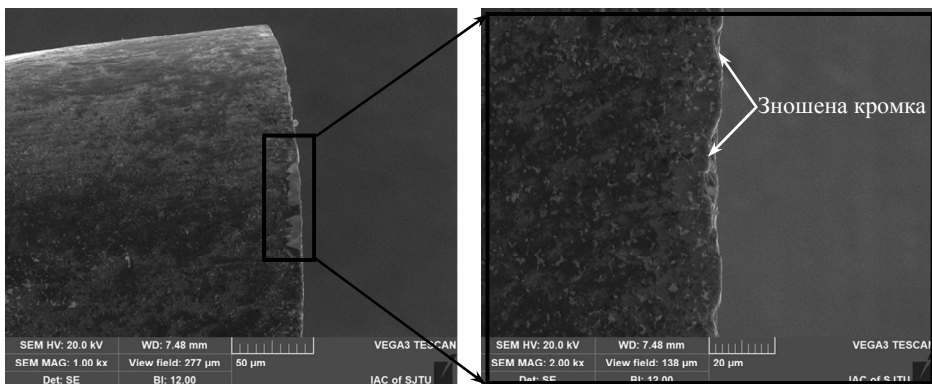


Рис. 10. SEM-морфології зношеної задньої поверхні PCD-інструменту за умови найвищої швидкості фрезерування ($n = 7500$ об/хв).

Для визначення впливу швидкості шпинделя на зношування інструментів PCD було проведено порівняльне SEM дослідження на зношених ін-

струментах за різних швидкостей шпинделя (рис. 11). Для кількісної оцінки критичності зношених поверхонь інструменту було також введено середню ширину зносу VB по задній поверхні. Отримані результати VB наведено в табл. 5. Відзначено, що абразивне зношування є домінуючим і визначає прогрес зношування інструменту з ПКА під час жорсткого фрезерування повністю спеченої кераміки 3Y-TZP, а інтенсивність зношування залежить від режимів різання (тобто, швидкості шпинделя), що використовували. Це пов'язано з високим вмістом твердої тетрагональної структури діоксиду цирконію всередині керамічного зразка, що призводить до сильного орання зони різання інструменту та посилює стирання його поверхні. Крім того, швидкість шпинделя сильно впливає на ступінь зносу. Наприклад, інструменти з ПКА, що працюють в умовах найнижчої швидкості, мають найвище значення середньої ширини зносу по задній поверхні ($VB = 36,42$ мкм) порівняно з тими інструментами, що працюють на середніх та високих швидкостях шпинделя. Застосування нижчого рівня швидкості шпинделя є несприятливим для фрезерування зразків 3Y-TZP, оскільки це призводить до катастрофічного руйнування інструменту з ПКА. Навпаки, використання середнього рівня швидкості шпинделя може привести до найменшого ступеня зношування інструменту ($VB = 8,31$ мкм), що сприяє збільшенню терміну служби інструменту під час жорсткого фрезерування повністю спеченого 3Y-TZP. Ба більше, використання високих швидкостей обертання шпинделя в основному приводить до помірному рівню зносу інструменту з середньою шириною зносу по задній поверхні ($VB = 18,25$ мкм) під час обробки діоксиду цирконію. Тому високошвидкісне фрезерування не дуже сприятливе для жорсткого різання повністю спеченої кераміки 3Y-TZP, особливо з погляду зменшення зносу інструменту. Для продовження терміну служби інструменту ретельний вибір діапазону обертів шпинделя є життєво важливим.

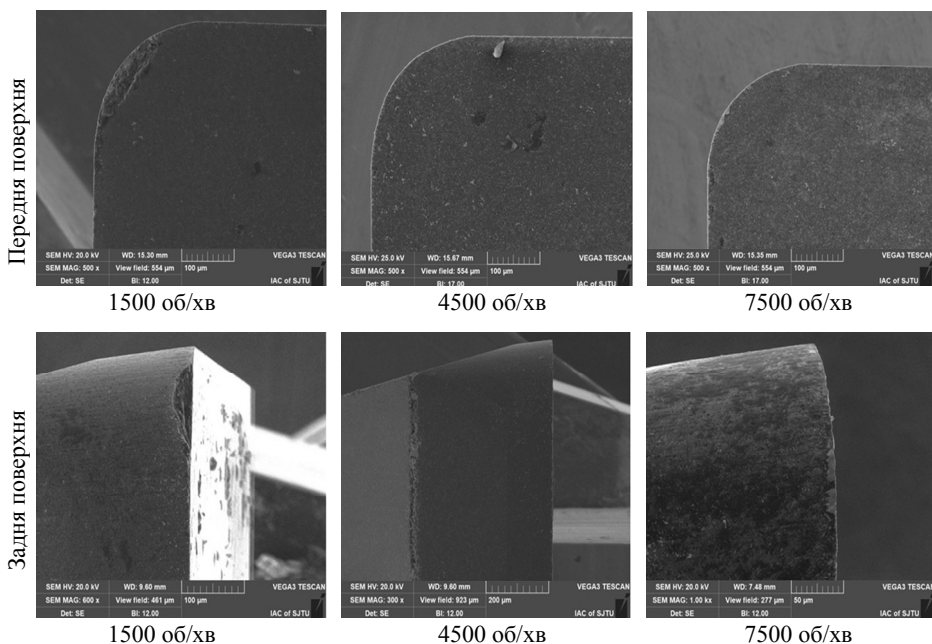


Рис. 11. Порівняльна SEM-морфології PC-D-інструментів під час фрезерування повністю спеченої кераміки 3Y-TZP за різної швидкості шпинделя.

Таблиця 5. Порівняльні середні значення ширини зносу по задній поверхні (VB) PCD-інструментів при різних швидкостях обертання шпинделя

Швидкість шпинделя n , об/хв	1500	4500	7500
Середня ширина зносу по задній поверхні VB, мкм	36,42	8,31	18,25

ВИСНОВКИ

Проведені експерименти з жорстким фрезеруванням повністю спеченої кераміки 3Y-TZP за допомогою інструментів з ПКА за різних швидкостей шпинделя дозволили вивчити процес їхнього зношування.

Показано, що обробка повністю спеченої цирконієвої кераміки призводить до абразивного зношування інструментів з ПКА. Абразивне зношування в основному відбувається вздовж різальної кромки інструменту з PCD через сильні дряпання, що виникає через тверду фазу тетрагонального діоксиду цирконію, вбудовану в підкладку 3Y-TZP. Це призводить до притуплення кромки інструменту, внаслідок чого інструмент втрачає свою початкову гостроту. Деякі частинки діоксиду цирконію присутні в зоні абразивного зношування через неповністю видалені ошурки діоксиду цирконію, що застрягли на поверхні інструменту. Сколювання кромки є критичною несправністю інструментів з ПКА під час жорсткого фрезерування повністю спеченого 3Y-TZP.

Знос інструментів з ПКА значно залежить від частоти обертання шпинделя, що використовували. Застосування низькошвидкісного режиму несприятливо для твердого фрезерування кераміки 3Y-TZP, оскільки різальний інструмент піддається найбільшому зношуванню по задній поверхні та катастрофічному викришуванню.

Застосування високих рівнів швидкості обертання шпинделя не забезпечує задовільних характеристик зношування інструментів з ПКА. На відміну від цього, використання помірних рівнів швидкості обертання шпинделя сприяє створенню найменшої ширини зносу по задній поверхні та сприяє продовженню терміну служби інструменту.

Отримані результати вказують на важливість вибору відповідних умов обробки для зниження ступеня зносу інструментів з ПКА під час фрезерування повністю спеченої кераміки з 3Y-TZP.

Слід зазначити, що механізми зношування ріжучих інструментів, що працюють під час фрезерування повністю спеченої кераміки 3Y-TZP, в основному залежать від умов застосовуваних параметрів процесу.

Виявлені механізми зношування можуть бути ефективними лише за розглянутих технологічних умов даної роботи.

ФІНАНСУВАННЯ

Робота виконана за підтримки Національного фонду природничих наук Китаю (грант № 52175425).

Jinyang Xu*, Linfeng Li, Min Ji, Ming Chen
State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,
School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai, P. R. China

Study on PCD tool wear in hard milling of fully-sintered 3Y-TZP ceramics

The present paper aims to address the wear behaviors and mechanisms of PCD tools following the hard milling of 3Y-TZP ceramics. The workpiece specimens were prepared at the fully sintering temperature to completely porcelainize the zirconia substrate, and the PCD straight edge was brazed onto the tungsten carbide tool body along the tool axis direction to ensure the successful orthogonal milling of the workpiece specimen. A series of hard milling experiments were conducted by changing the spindle speed on a five-axis CNC machining center. The wear morphologies of worn PCD edges were examined using the scanning electron microscope (SEM) to identify the dominant wear modes and failure patterns governing the hard milling of 3Y-TZP ceramics. The effect of the spindle speed on the PCD's wear patterns was studied. The obtained results provide several technical guidance for the hard milling of fully-sintered 3Y-TZP ceramics.

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

1. 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. Japan*. 2010. Vol. 118, no. 1383. P. 1053–1056.
2. 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.
3. Moura C.G., Pereira R., Buciumeanu M., Carvalho O., Bartolomeu F., Nascimento R., Silva F.S. Effect of laser surface texturing on primary stability and surface properties of zirconia implants. *Ceram. Int.* 2017. Vol. 43, no. 17. P. 15227–15236.
4. Ito Y., Kizaki T., Fujii T., Yuasa Y., Sugita N., Mitsuishi M. Precision machining of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal by high-speed milling. *Int. J. Auto. Technol.* 2017. Vol. 11. P. 862–868.
5. 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.
6. Al-Amleh B., Lyons K., Swain M. Clinical trials in zirconia: a systematic review. *J. Oral Rehabil.* 2010. Vol. 37, no. 8. P. 641–652.
7. Al-Radha A.S.D., Dymock D., Younes C., O'Sullivan D. Surface properties of titanium and zirconia dental implant materials and their effect on bacterial adhesion. *J. Dent.* 2012. Vol. 40, no. 2. P. 146–153.
8. 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.
9. Manicone P.F., Rossi Iommetti P., Raffaelli L. An overview of zirconia ceramics: Basic properties and clinical applications. *J. Dent.* 2007. Vol. 35, no. 11. P. 819–826.
10. 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.
11. Ji M., Zhang H., Xu J., Li C., Yu D., Chen M., El Mansori M. Toward the mechanisms of surface texturing on the wear behavior of dental zirconia ceramics under dry and saliva lubricated conditions. *Wear*. 2021. Vol. 484–485. P. 203845.
12. Denry I., Holloway J.A. Ceramics for dental applications: A review, *Materials*. 2010. Vol. 3, no. 1. P. 351–368.
13. Denry I., Kelly J.R. State of the art of zirconia for dental applications, *Dent. Mater.*, 2008. Vol. 24, no. 3. P. 299–307.
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. Super-hard Mater.*, 2020. Vol. 42, no. 6. P. 432–442.
17. Filser F., Kocher P., Gauckler L. Net-shaping of ceramic components by direct ceramic machining. *Assembly Autom.* 2003. Vol. 23, no. 4. P. 382–390.
18. 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.
19. 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.
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. 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.
22. Anand P.S.P., Arunachalam N., Vijayaraghavan L. Study on grinding of pre-sintered zirconia using diamond wheel, *Mater. Manuf. Process.*, 2018, vol. 33, no. 6. P. 634–643.
23. Xu J., Li L., Chen M., Davim J.P. An experimental investigation on milling features of fully-sintered zirconia ceramics using PCD tools. *Mater. Manuf. Process.* 2022. vol. 37, no. 3. P. 318–326.

Надійшла до редакції 02.07.21

Після доопрацювання 05 08 21

Прийнята до опублікування 06.08.21