

УДК 621.922.34

**Jinyu Shang¹, Ruien Yu^{1, 2, *}, Boheng Zhu¹, Wenjie Gong¹,
Zhicong Tian¹, Kenan Li³, Qingchun Ma¹, Xijing Zhu¹**

¹Shanxi Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology,
North University of China, Taiyuan, P.R. China

²Xinjiang Key Laboratory of High Value Green Utilization
of Low-rank Coal, Changji University, P.R. China

³State Key Laboratory for High Performance Tools,
Zhengzhou Research Institute for Abrasives & Grinding Co., Ltd,
Zhengzhou, P.R. China

*yuruien@nuc.edu.cn

Вплив наномонтморилоніту на властивості алмазних кругів на склокерамічній зв'язці

Досліджено додавання наномонтморилоніту до склокерамічного зв'язуючого матеріалу та створення алмазних шліфувальних кругів на композитній склокерамічній зв'язці з різним дозуванням наномонтморилоніту за допомогою золь-гель методу. Показано, що введення відповідної кількості наномонтморилоніту може ефективно покращити комплексну продуктивність алмазних шліфувальних кругів на склокерамічній зв'язці завдяки використанню його розмірного та поверхневого ефектів.

Ключові слова: склокерамічна зв'язка, наномонтморилоніт, золь-гель метод, шліфувальний круг, продуктивність шліфування.

ВСТУП

З розвитком сучасної промисловості різко зростає попит на обробку твердих і крихких матеріалів. Традиційні шліфувальні інструменти часто є недостатніми для задоволення цих вимог до обробки, що робить розробку нових абразивних матеріалів центральним напрямком досліджень [1]. Алмазні шліфувальні круги на склокерамічній зв'язці привертають значну увагу багатьох дослідників завдяки унікальному поєднанню властивостей. Склокерамічна зв'язка – це матеріал, який спеціально використовують для виготовлення абразивних матеріалів, вона міцно зв'язує абразивні частинки між собою за підвищених температур за допомогою процесів плавлення та склування, з утворенням таким способом склокристалічних абразивних матеріалів з високою міцністю, відмінною хімічною стійкістю, термічною стабі-

льністю та підвищеною пористістю [2, 3]. Алмаз має високі твердість і теплопровідність та гострі абразивні зерна. Завдяки поєднанню цих властивостей алмазні шліфувальні круги на склокерамічній зв'язці мають чудову продуктивність шліфування, що забезпечує їм широкий спектр застосування в прецизійній і надточній обробці [4, 5].

Алмазні шліфувальні круги на склокерамічній зв'язці мають три основні компоненти: алмазні абразивні зерна, склокерамічну зв'язку та пористість. Алмазне абразивне зерно є основним елементом, що виконує завдання шліфування [6]. Склокерамічна зв'язка, яка є основним матеріалом для закріплення абразивних зерен, безпосередньо впливає на загальну продуктивність та ефективність обробки шліфувального інструменту [7]. Пористість забезпечує простір для розміщення та відведення шліфувальних відходів і ефективно полегшує потік змащувально-охолоджувальної рідини, що допомагає контролювати температуру під час процесу шліфування для запобігання засміченню круга або погіршенню продуктивності через високі температури [8]. Дослідники вивчають оптимізацію складу склокерамічної зв'язки, оптимальний розподіл алмазних абразивних зерен та інноваційні конструкції кругів за допомогою міждисциплінарних підходів, що включають матеріалознавство, хімічну інженерію та машинобудування, з метою оптимізації продуктивності кругів [9–11]. Для подальшого підвищення продуктивності шліфувального круга необхідно активно досліджувати методи модифікації зв'язки, зокрема, шляхом додавання спеціальних добавок для поліпшення властивостей зв'язки, таких як підвищення термостійкості, зміцнення механічної міцності або оптимізація взаємодії зв'язки з абразивними зернами [12].

З моменту появи повідомлень про підвищені зміцнювальні властивості наноматеріалів дослідники покладають великі надії на їхній потенціал у вирішенні проблем крихкості та труднощів обробки, пов'язаних з використанням склоподібних шліфувальних інструментів [13]. Наноматеріали, завдяки своєму малому розміру частинок і великій питомій поверхні, можуть істотно змінювати мікроструктуру і міжфазні властивості матеріалів, тим самим впливати на їхні макроскопічні характеристики [14]. В останні роки, зі стрімким розвитком нанокерамічної технології, все більше застосувань цієї технології інтегрується в шліфувальні круги на склокерамічній зв'язці [15]. У [16] додавали нано- Al_2O_3 , -SiO_2 та нанорідкісноземельні оксиди Y_2O_3 і CeO_2 до склокерамічної зв'язки і виявив, що включення наноматеріалів може ефективно покращити текучість склокерамічної зв'язки, зменшити вогнетривкість, підвищити міцність на вигин, покращити зернистість та підвищити кристалічність. У [17] виявили, що коли вміст нано- SiO_2 становив 10 %, а нано- Al_2O_3 – 5 %, вогнетривкість, текучість і міцність на вигин склокерамічної зв'язки були кращими, ніж у традиційних шліфувальних інструментів зі склокерамічної зв'язки. Експерименти зі шліфування підтвердили, що ефективність обробки шліфувальними інструментами з наносклокерамічною зв'язкою також була кращою. У [18] дослідили ідеальну рівномірну дисперсію графенових наночастинок у склопластиковій матриці і виявили, що завдяки покращенню властивостей графенових наночастинок (ГНЧ) і зміцненню міжфазної міцності зв'язку між ГНЧ і склопластиковою матрицею можна ефективно підвищити загальну в'язкість на руйнування склокомпозитного матеріалу.

Монтморилоніт, як природний шаруватий силікатний мінерал, переважно складається з двох шарів тетраедрів Si-O та інтеркальованого октаедра Al-O [19]. На нанорівні наномонтморилоніт, що має унікальний розмір і поверхневі ефекти, характерні для наноматеріалів, більш рівномірно диспергується в

склі та встановлює ефективний міжфазний контакт. Його унікальна пластинчаста структура може перешкоджати поширенню тріщин, поглинати і розсіювати енергію на вершині тріщини, збільшувати звивистість шляху тріщини та зменшувати швидкість розширення тріщини, і тим самим забезпечує зміцнюючий ефект [20–22]. У [23] значно підвищили в'язкість руйнування і зносостійкість алюмооксидної склокерамічної матриці завдяки включенню монтморилоніту за допомогою методів порошкової металургії та іскрового плазмового спікання.

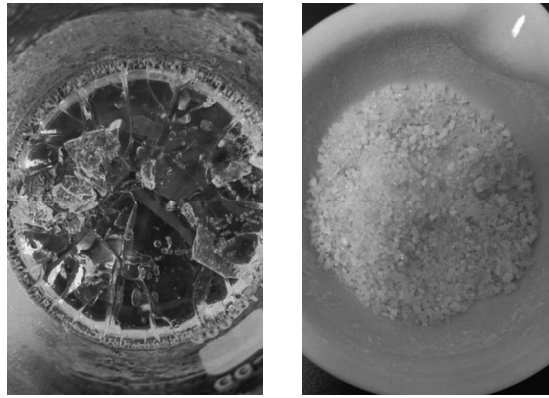
Дана робота зосереджена на оптимізації експлуатаційних характеристик склокерамічних зв'язок через додавання наномонтморилоніту. Завдяки чудовій колоїдній дисперсності наномонтморилоніту золь-гель метод застосовують для створення композитного матеріалу з алмазного порошку та склокерамічної зв'язки з наномонтморилоніту для використання в алмазних шліфувальних кругах. Вивчено вплив вмісту наномонтморилоніту на властивості склокерамічної зв'язки та продуктивність шліфування алмазного шліфувального круга на склокерамічній зв'язці.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Підготовка склокерамічної зв'язки

Для створення склокерамічної зв'язки було обрано систему $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Na}_2\text{O}$ [24]. Як модифікуючий агент було обрано наномонтморилоніт DK0 (Zhejiang Fenghong New Material Co. Ltd.), який має відмінну колоїдну дисперсність. Модифіковану склокерамічну зв'язку отримували золь-гель методом. Основними реагентами були $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ (Tianjin Dengfeng Chemical Reagent Factory) та NaNO_3 , $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, H_3BO_3 (Tianjin Hengxing Chemical Reagent Manufacturing Co. Ltd.), що використовували в золь-гель процесі. Як абразив використовували алмазний порошок W80, 200 меш (Zhecheng Fangyuan Diamond Factory).

На водяній бані за температури 40°C до еквівалентного об'єму деіонізованої води додавали різні масові частки наномонтморилоніту в еквівалентному об'ємі деіонізованої води. Після ретельного перемішування суміш залишали на 12 год для отримання п'яти наборів дисперсій монтморилоніту з різною концентрацією (0, 2, 4, 6, 8 % (за масою)). Розчин прекурсору для діоксиду кремнію (SiO_2) готували за допомогою гомогенного змішування безводного етанолу, деіонізованої води та тетраетил ортосилікату (TEOC) у вказаних пропорціях. Крім того, розчин прекурсорів для оксиду алюмінію (Al_2O_3) і оксиду бору (B_2O_3) було сформовано завдяки послідовному розчиненню нітрату натрію (NaNO_3), негідрату нітрату алюмінію ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) і борної кислоти (H_3BO_3) в деіонізованій воді для створення розчину прекурсорів $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$. Дисперсію наномонтморилоніту, розчин гідролізу TEOC і розчин прекурсору $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$ потім з'єднували і рівномірно перемішували на водяній бані за температури 40°C . pH розчину доводили до 4 за допомогою азотної кислоти (H_3NO_3), після чого давали суміші відстоятися. Після цього її помістили в сушильну шафу і витримували за температури 100°C протягом 12 год для отримання вологого гелю наномонтморилонітової композитної склокерамічної зв'язки. У процесі висушування кристалізаційну воду видаляли за температури 500°C для отримання сухого гелю. Потім сухий гель подрібнювали в кульовому млині та просіювали через сито 200 меш для отримання нанокompозитного порошку монтморилонітового склокерамічного зв'язувального матеріалу. Отриманий вологий і сухий гель представлено на рис. 1.



а б
Рис. 1. Вологий (а) і сухий (б) гель.

Зважували п'ять порцій порошку склокерамічної зв'язки, що містила наномонтморилоніт, додавали декстрин як тимчасову зв'язку, рівномірно перемішували, а потім використовували процес холодного пресування для формування брусків розміром $\varnothing 10 \times 10$ мм під тиском 20 МПа протягом 3 хв, з температурою спікання 850°C і часом витримки 2 год, охолоджували в печі, а потім використовували для вивчення високотемпературної текучості склокерамічної зв'язки. Прямокутні прутки розміром $36 \times 6 \times 4$ мм формували під тиском 20 МПа протягом 3 хв, з температурою спікання 850°C і витримкою 2 год, охолоджували в печі, після чого використовували для дослідження механічних властивостей склокерамічної зв'язки.

Виготовлення шліфувального круга зі склокерамічною зв'язкою

Алмазні шліфувальні бруски виготовляли з використанням алмазного абразиву, наномонтморилонітової зв'язки та тимчасової зв'язки як сировини. Алмазний абразив мав зернистість W80, 200 меш. Після ультразвукового очищення та сушіння безводним етанолом та деіонізованою водою алмазний абразив зважували в масовому співвідношенні 3:1 зі скловолокном, а потім, після додавання тимчасової зв'язки, рівномірно перемішували. Процес холодного пресування використовували для отримання брусків розміром $36 \times 6 \times 4$ мм, з температурою спікання 770°C і часом витримки 2 год. Температурний режим спікання показано на рис. 2.

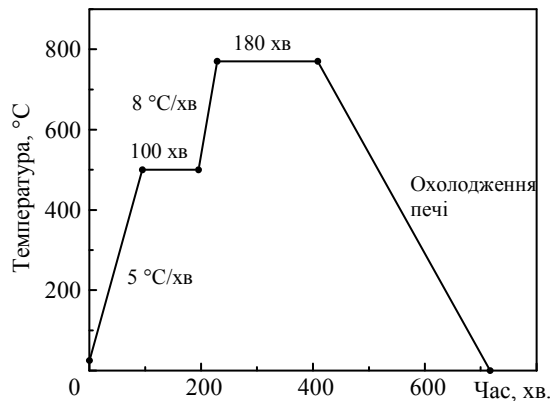


Рис. 2. Крива температури спікання.

Наномонтморилонітову склокерамічну зв'язку, отриману на основі оптимізованої формули та за описаним вище процесом її підготовки, рівномірно змішували з алмазним абразивом та тимчасовою зв'язкою у відповідній пропорції. Для створення монолітної структури заготовки шліфувального круга із зовнішнім діаметром 25 мм, товщиною 8 мм і внутрішнім діаметром 6 мм використовували процес холодного пресування. Зразки склокерамічних алмазних кругів з різним дозуванням наномонтморилоніту спікали в агломераційній печі та затверджували відповідно до встановлених температур спікання склокерамічних зв'язок.

Вимірювання та характеристика

Вогнетривкість. У промисловості для визначення вогнетривкості сполуки зазвичай використовують метод вогнетривкого конуса. Однак через обмеження експериментальних умов цей метод не можна було використати для визначення вогнетривкості сполуки. Відповідно до принципу випробування на вогнетривкість, для вимірювання вогнетривкості зв'язки було обрано метод випробування на температуру розм'якшення зв'язки. Циліндричні зразки модифікованої наномонтморилонітом склокерамічної зв'язки з різною кількістю інкорпорації висушували, потім поміщали в піч для спікання і підвищували температуру зі швидкістю нагріву $7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. Коли верхні краї і кути циліндра повністю зникали, цю температурну точку встановлювали як значення вогнетривкості наномонтморилонітової склокерамічної зв'язки.

Текучість. Зв'язку витримували за виміряної температури вогнетривкості протягом 1 год, а після охолодження вимірювали діаметр потоку на вогнетривкій плиті. Це вимірювання проводили шість разів, для розрахунку використовували середнє арифметичне значення. Текучість зв'язуючого агента розраховували за формулою

$$\varphi = \frac{D}{D_0} \times 100\%, \quad (1)$$

де φ – значення текучості зв'язки; D , мм – діаметр зразка після спікання; D_0 , мм – початковий діаметр зразка до спікання.

Коефіцієнт теплового розширення. Коефіцієнт теплового розширення (КТР) зразків наномонтморилонітових склокерамічних зв'язок з різною кількістю включення визначали за допомогою термомеханічного аналізатора ТМА 402 F3 (Xiangtan Instrumentation Ltd.) в умовах навколишнього середовища за температури детектування $23,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відносної вологості 49 %. Для вимірювання використовували зовнішній мікрометр з цифровим дисплеєм, модель MDC-1"РХ. У середовищі азоту температуру підвищували зі швидкістю $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ від 25 до $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. КТР наномонтморилонітових композитних склопластиків визначали за формулою

$$\partial = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta t} + c, \quad (2)$$

де ∂ – КТР, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; L_0 , мм – початкова довжина зразка; ΔL , мм – лінійне збільшення зразка в межах вимірюваного діапазону температур; Δt , $^{\circ}\text{C}$ – зміна температури від початкової до кінцевої; c – поправочний коефіцієнт приладу.

Міцність на вигин. Міцність на згин зразка прямокутного прутка вимірювали за допомогою методу триточкового вигину, з використанням універсальної випробувальної машини CMT5105 (Shenzhen Sansi Testing Instrument Ltd.), прольотом 30 мм і швидкістю прикладання навантаження $0,5\text{ мм}/\text{хв}$. Міцність на згин розраховували за формулою

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}, \quad (3)$$

де σ , МПа – межа міцності під час згину; P , Н – навантаження на руйнування; L , мм – проліт між двома опорами; b , мм – ширина тріщини; h , мм – висота тріщини.

Рентгеноструктурний аналіз. Після шліфування та ультразвукового очищення поперечних зрізів підготовлених алмазних кругів на склокерамічній зв'язці досліджували мікроструктуру, розподіл та розмір пор різних зразків за допомогою растрового електронного мікроскопа Sigma 300, а також проводили аналіз енергетичного спектру поперечних зрізів. Для подальшого визначення фазових складових абразивних кругів проводили рентгеноструктурний аналіз на рентгеноструктурному аналізаторі TDM-20 (Dandong Tongda Technology Ltd.) з мішенню випромінювання з міді, робочою напругою 40 кВ і робочим струмом 40 мА.

Коефіцієнт зносу. Випробування шліфуванням проводили на різних зразках шліфувальних кругів на склокерамічній зв'язці з різною кількістю наноморилоніту. Для випробування використовували прецизійний шліфувальний верстат з ЧПК типу ZCS-QGM3050 (Luoyang Chuanshun Machinery Equipment Ltd.) з повітряним переміщенням з точністю позиціонування 3 мкм, швидкістю подачі маховика 1 мкм на один паз, швидкістю шліфування 3500 об/хв, швидкістю подачі 200 мм/хв та глибиною шліфування 1 мкм. Заготовки було виготовлено з високомарганцевої сталі, а шліфувальні круги мали розміри 25×8×6 мм. Для шліфування заготовок однакової маси використовували шліфувальні круги з різним вмістом наномонтморилоніту. Після шліфування протягом однакової тривалості коефіцієнт зносу, який відображає продуктивність шліфування шліфувальних кругів, розраховували за допомогою вимірювання витрат шліфувальних кругів і заготовок за формулою

$$W = \frac{\Delta G_1}{\Delta G_2} = \frac{G_1 - G'_1}{G_2 - G'_2}, \quad (4)$$

де G_1 і G_2 – маса шліфувального круга і заготовки до шліфування відповідно; G'_1 і G'_2 – маса шліфувального круга і заготовки після шліфування відповідно; ΔG_1 і ΔG_2 – знос шліфувального круга і заготовки; W – коефіцієнт зносу.

Растрова електронна мікроскопія. За допомогою растрової електронної мікроскопії Talos L120C (Beijing Purisys Ltd.) досліджено морфологію поверхні заготовок, відшліфованих шліфувальними кругами на склокерамічній зв'язці з різною кількістю наномонтморилоніту, та визначено шорсткість поверхні високомарганцевої сталі.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Вогнетривкість і текучість

На рис. 3 показано вогнетривкість склокерамічних зв'язок з різними дозуваннями наномонтморилоніту. Зі збільшенням кількості змішування наномонтморилоніту вогнетривкість склокерамічної зв'язки також зростає, а її вогнетривкість досягає максимуму 1230 °С, коли кількість змішування наномонтморилоніту становить 8 % (за масою), що вказує на те, що відповідна кількість наномонтморилоніту може покращити в'язкість розплаву склокерамічної зв'язки за температури розплаву. Текучість зв'язуючого агента має важливий вплив на виготовлення прес-форми та експлуатаційні характеристики виробу. У процесі випалу кількість розплавленої рідкої фази зв'язки

збільшується, в'язкість поступово зменшується, а рухливість збільшується, що сприяє рівномірному розподілу зв'язки навколо абразивних зерен і підвищенню міцності абразивного інструменту, а теплові властивості склокерамічної зв'язки змінюють високотемпературну рухливість зв'язки, що впливає на міцність зв'язуючого агента. Коли текучість зв'язки надто повільна, зв'язка не може рівномірно розподілятися між абразивними зернами, що впливає на міцність зв'язку між зв'язуючим матеріалом та абразивними зернами; навпаки, коли текучість надто велика, абразивні вироби будуть деформовані.

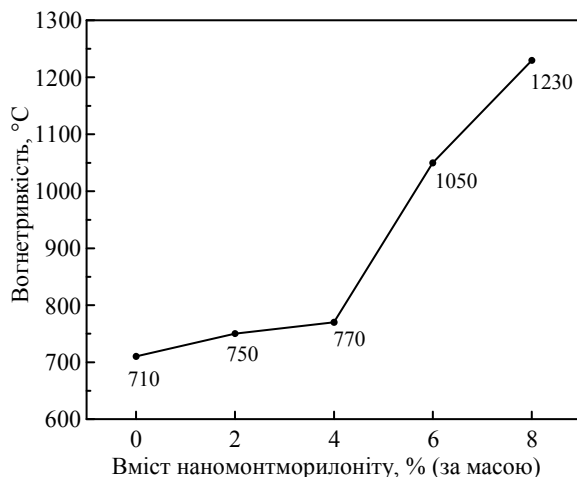


Рис. 3. Вогнетривкість склокерамічної зв'язки з різними дозуваннями наномонтморилоніту.

На рис. 4 показано результати випробувань текучості склокерамічної зв'язки з різним вмістом наномонтморилоніту. Текучість склокерамічної

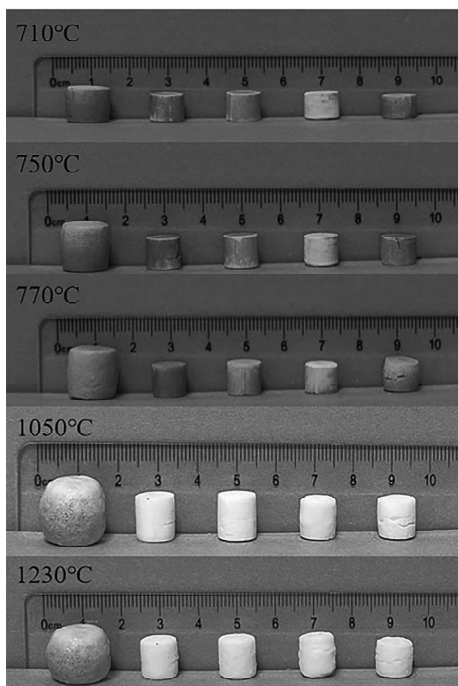


Рис. 4. Текучість склокерамічної зв'язки з різним вмістом наномонтморилоніту.

зв'язки була більшою, коли наномонтморилоніт не додавали, а текучість склокерамічної зв'язки значно зменшилася після додавання різного вмісту наномонтморилоніту. Коли інші умови однакові, в'язкість розплаву збільшується зі збільшенням сили зв'язку між катіонами та іонами кисню, сила поляризації катіонів більша, іони кисню зв'язку оксиду кремнію поляризовані, деформація більша, а ослаблення зв'язку оксиду кремнію більше, що проявляється в зменшенні в'язкості. Коли співвідношення O/Si більше, існує менше зв'язків між тетраедрами кремнезем-кисень, і взаємодія між тетраедрами в значній мірі залежить від зв'язку R-O, Li^+ з найбільшою силою зв'язку має найвищу в'язкість, і в'язкість зменшується відповідно до порядку Li_2O , Na_2O і K_2O . З іншого боку, іони лужноземельних металів мають відносно

більшу електричну валентність, ніж лужні метали, малий іонний радіус і потужну силу зв'язку, тому їм легше об'єднувати катіони маленьких кремнеземно-кисневих тетраедрів навколо себе, що призводить до збільшення в'язкості. Після додавання наномонтморилоніту до склокерамічної зв'язки збільшується співвідношення O/Si , а наномонтморилоніт містить не тільки Li^+ , Na^+ та K^+ , але й іони лужноземельних металів Mg^{2+} та Ca^{2+} , що певною мірою приведе до збільшення в'язкості склоподібної зв'язки та зменшення його рухливості [25]. Крім того, коли вміст наномонтморилоніту надмірний, він буде збиратися на поверхні селітри з утворенням пластинчастого наношару, змінювати мікроструктуру силікату, збільшувати питому теплоємність селітри та впливати на розкладання селітри за високих температур, і таким способом впливати на текучість склокерамічного зв'язуючого агента.

Коефіцієнт теплового розширення

На рис. 5 наведено залежність КТР склокерамічних зразків від різної кількості наноморилоніту. КТР склокерамічної зв'язки був нижчим, ніж у решти добавок за кількості 6 % (за масою) наноморилоніту і стабільно зростає у діапазоні температур від 150 до 560 °C, що є найбільш сумісним з коефіцієнтом теплового розширення алмазного абразиву. КТР склокерамічної зв'язки у разі додавання 6 % (за масою) наноморилоніту є нижчим за КТР решти добавок і стабільно зростає в діапазоні температур від 150 до 560 °C, що є найбільш близьким до КТР алмазного абразиву. Спінання наближає зв'язку до склоподібного тіла і в загальній структурі силікатної зв'язки в склоподібному стані силосанова структура є основною частиною. Після додавання наномонтморилоніту, хоча монтморилоніт і R_2O в зв'язці змушує мережу відключитися і збільшити КТР зв'язки, все ж у монтморилоніті міститься велика кількість Al_2O_3 , який може відігравати роль відновлювача структури та зменшити КТР [26]. Коли легування наномонтморилоніту становить 6–8 % (за масою), КТР збільшується, і коли кількість наномонтморилоніту збільшується до певного значення, він буде агрегуватися на поверхні сполук з утворенням пластинчастого наношару, що сприяє інгібуванню розкладання оксидів та кристалічної води, що призведе до передчасного утворення склоподібної решітчастої структури склокерамічної зв'язки, матиме тенденцію до стабільності та зменшує в такий спосіб ступінь щільності структури склокерамічної зв'язки.

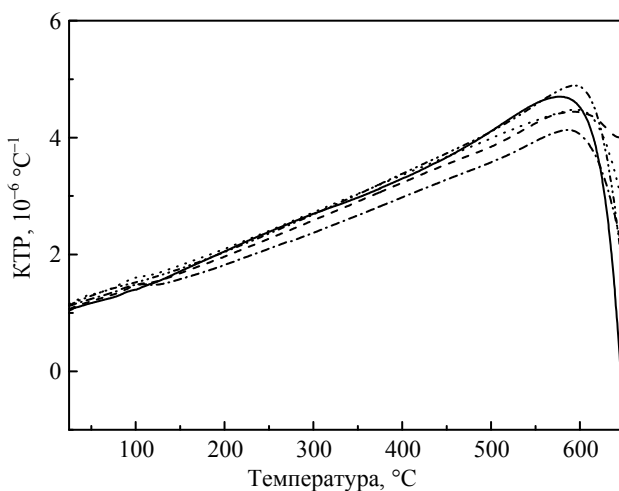


Рис. 5. Криві КТР склокерамічної зв'язки в залежності від вмісту наномонтморилоніту: 0 (—), 2 (---), 4 (···), 6 (----), 8 (-----) % (за масою).

Коли значення КТР алмазу та склокерамічної зв'язки занадто сильно відрізняються, під час охолодження на межі зв'язки та алмазу виникають напруження розтягування, і ця невідповідність може призвести до появи мікротріщин всередині абразивного інструменту, що знижує загальну міцність. Алмаз, який використовували, має значення КТР $\sim 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, і майже не зазнає значних розмірних змін у разі підвищення температури. Значення КТР отриманої склокерамічної зв'язки було менше $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. У порівнянні з більшістю склокерамічних зв'язок зі значеннями КТР $(5\text{--}10) \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, значення КТР отриманої склокерамічної зв'язки набагато ближче до значень алмазу, а напруження розтягування, що генеруються на межі між зв'язкою та алмазом, є набагато нижчими.

Міцність на вигин

На механічні властивості шліфувальних кругів на склокерамічній зв'язці впливають такі фактори, як зв'язка, абразивний матеріал і виробничий процес. Серед них міцність на вигин зв'язки є найважливішим джерелом міцності круга, яка залежить від таких факторів, як хімічний склад, ступінь кристалізації та мікроструктура [27]. На рис. 6 показано міцність на вигин алмазних шліфувальних кругів зі зв'язкою зі склокераміки за різних температур спікання і з різним вмістом наномонтморилоніту. Видно, що за відсутності наномонтморилоніту в композиційному матеріалі зі склокерамічною зв'язкою межа міцності на вигин є найнижчою і досягає мінімуму 22 МПа за температури спікання $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і максимуму 25 МПа за $810 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Межа міцності на вигин алмазного композиційного матеріалу на основі склокераміки після легування наномонтморилонітом значно вища, ніж без наномонтморилоніту за всіх температур спікання.

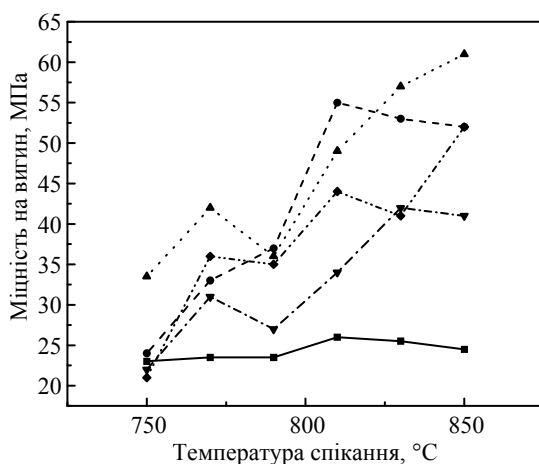


Рис. 6. Міцність на вигин зразків шліфувальних кругів з алмазного композита з різним вмістом наномонтморилоніту (0 (■), 2 (●), 4 (▲), 6 (▼), 8 (◆) % (за масою)) за різної температури спікання.

За температури спікання від 750 до $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ алмазний композитний матеріал на основі склокерамічної зв'язки зі вмістом наномонтморилоніту 4 % (за масою) демонструє найбільшу міцність на вигин, особливо за температури спікання $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$, де збільшення міцності на вигин є найбільш значним у порівнянні з іншими зразками. З врахуванням реальної ситуації з використанням алмазу як абразиву, температура спікання не повинна перевищувати $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ для запобігання втрати абразиву. Отже, оптимальними умовами було визначено температуру спікання $770 \text{ }^{\circ}\text{C}$ із вмістом наномонтморилоніту 4 % (за масою),

за якої межа міцності на вигин досягає максимуму 42 МПа, що на 82,6 % більше порівняно зі зразком алмазного композиційного матеріалу на склокерамічній зв'язці без легування наномонтморилонітом. Додавання наномонтморилоніту може підвищити міцність на вигин алмазного композитного матеріалу зі скловолокна в різному ступені, що покращує загальну структурну міцність композита. Однак, коли вміст наномонтморилоніту є надмірним, це призведе до зниження загальної міцності склокерамічної зв'язки.

Аналіз фазового складу

На рис. 7 показано рентгенограми алмазних композиційних матеріалів зі склокерамічними зв'язками з різним вмістом наномонтморилоніту. Рентгеноструктурний аналіз часто використовують під час аналізу складу кристалічних фаз у речовинах, і на результати впливають різні фактори, такі як методи підготовки зразків, умови тестування і т. д. У цьому дослідженні прагнули забезпечити однорідність усіх зразків завдяки оптимізації процесу підготовки зразків та умов тестування. Зразок без наномонтморилоніту мав на один пік більше (за $\theta = 21,2^\circ$, що відповідає NaAlSiO_4), ніж зразок з монтморилонітом. Це пояснюється тим, що додавання наномонтморилоніту спричинило блокування катіонів іонообмінними властивостями наномонтморилоніту, і NaAlSiO_4 не міг генеруватися у великій кількості. У чотирьох зразках, що містили наномонтморилоніт, основними фазами були алмазні з гострою формою піків, а найвищий ступінь кристалізації спостерігали, коли легування наномонтморилоніту становило 8 % (за масою). Це можна пояснити тим, що частинки наномонтморилоніту мали сприятливу термічну стабільність, вогнезахисні властивості та багаточастинкову структуру, і ці властивості могли запобігти окислювальному розкладанню алмазного абразиву за високих температур та забезпечити існування алмазу за високої температури.

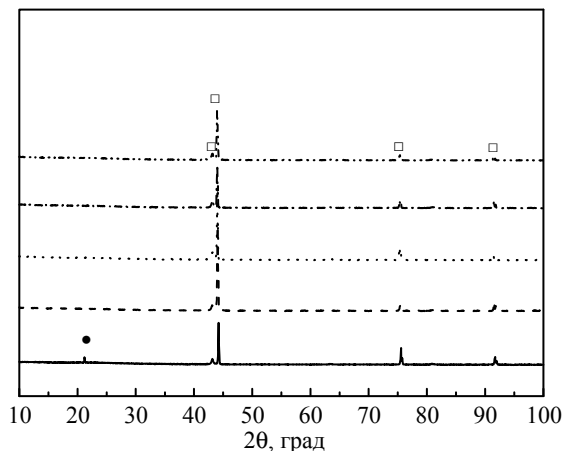


Рис. 7. Рентгенограма склокерамічної зв'язки алмазного композита з різним вмістом наномонтморилоніту: 0 (—), 2 (---), 4 (···), 6 (— · —), 8 (— · — · —) % (за масою); алмаз (□), NaAlSiO_4 (●).

Мікроморфологія

На рис. 8 показано зображення сканувальної електронної мікроскопії (SEM) поперечних перерізів зразків алмазного композиційного матеріалу зі склокерамічними зв'язками за температури спікання 770°C і з різним вмістом наномонтморилоніту. Як видно на рис. 8, незважаючи на спікання за високих температур, частина наночастинок монтморилоніту після спікання

все ж таки зберегла свою початкову морфологію і текстурні характеристики. В основному це пов'язано з унікальною пластинчастою структурою наномонтморилоніту, яка проявляє певну термічну стабільність у процесі спікання, у результаті чого деякі частинки не зазнають значних структурних змін у процесі спікання. Крім того, за високих температур частинки наномонтморилоніту можуть не повністю інтегруватися через фізичну ізоляцію одна від одної або від матеріалу матриці, і зберігати так свою початкову морфологію.

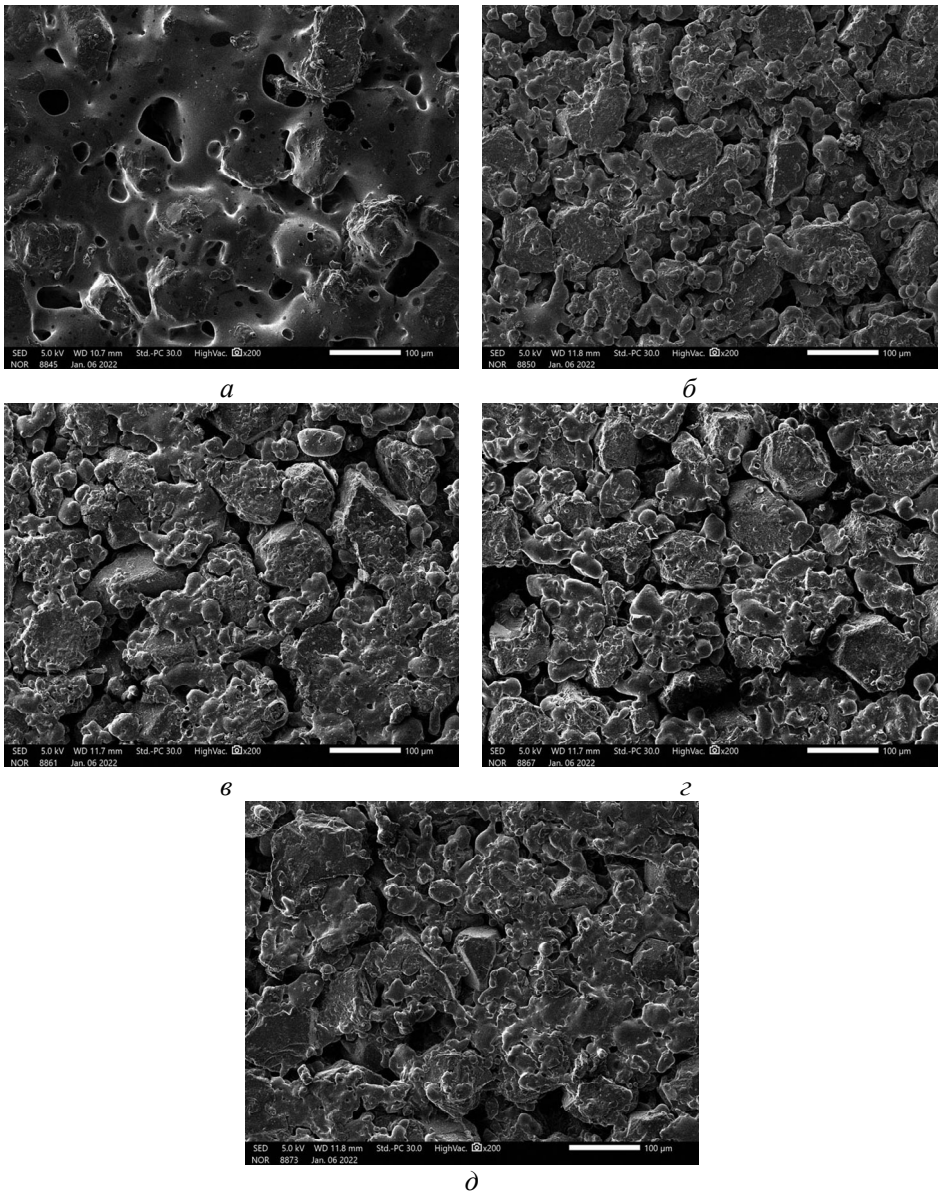


Рис. 8. Мікрофотографії кожної ділянки шліфувального круга: 0 (а), 2 (б), 4 (в), 6 (г), 8 (д) % (за масою).

Хоча деякі частинки наномонтморилоніту зберегли свою початкову морфологію, рис. 7 показує, що спечена склокерамічна зв'язка має аморфні характеристики. Це пояснюється тим, що сам наномонтморилоніт містить певну частку

аморфних компонентів, які не дають чітких дифракційних піків. Під час процесу спікання наномонтморилоніт проходить процес часткової рекристалізації завдяки своїм іонообмінним властивостям та особливій багатошаровій структурі, що приводить до утворення більшої кількості аморфних фаз. Крім того, міжфазні реакції між наномонтморилонітом і матрицею також приводять до утворення нових аморфних фаз. Інші компоненти системи склокерамічних зв'язок, такі як фази силікатного скла, мають тенденцію до утворення аморфних фаз під час процесу спікання. Ці аморфні фази займають основний об'єм композита, у результаті чого загальна рентгенограма показує аморфні характеристики.

За відсутності наномонтморилоніту алмазний абразив був повністю інкапсульований зв'язуючою речовиною, а після додавання наномонтморилоніту зв'язка не змогла повністю інкапсулювати алмазний абразив, і відкрита частина неінкапсульованих алмазних частинок використовується як така, що несе навантаження під час шліфування. У попередньому аналізі було зроблено висновок, що наномонтморилоніт може ефективно інгібувати потік зв'язуючого агента, тому, спостерігали, що у всіх зразках після додавання наномонтморилоніту склокерамічна зв'язка є більш щільною, а розподіл пор рівномірним за рівня легування 4 % (див. рис. 8, в), розмір відкритих і закритих пор є співмірним, що доводить, що зразки мають найбільшу міцність на вигин за такого рівня легування наномонтморилоніту.

Коефіцієнт зносу шліфувального круга та шорсткість поверхні заготовки

Коефіцієнт зносу шліфувального круга та шорсткість поверхні заготовки зображено на рис. 9. За вмісту монтморилоніту в склокерамічній зв'язці 4 % (за масою) шорсткість поверхні високомарганцевої сталі після шліфування досягає найнижчого значення 0,584 мкм, а коефіцієнт зносу є найменшим і становить 926. Алмазний шліфувальний круг зі склокерамічною зв'язкою, за умови вмісту наномонтморилоніту 4 % (за масою), має високу міцність на вигин і відмінну стійкість до деформації, що приводить до меншого коефіцієнту зносу. Керамічна фаза міцно з'єднана з алмазним абразивом, а різальні кромки абразиву більш відкриті, що також робить шліфовану поверхню більш гладкою. Результати шліфування зразків узгоджуються з результатами аналізу міцності на вигин, текучості та мікроструктури після додавання наномонтморилоніту, що підтверджують один одного.

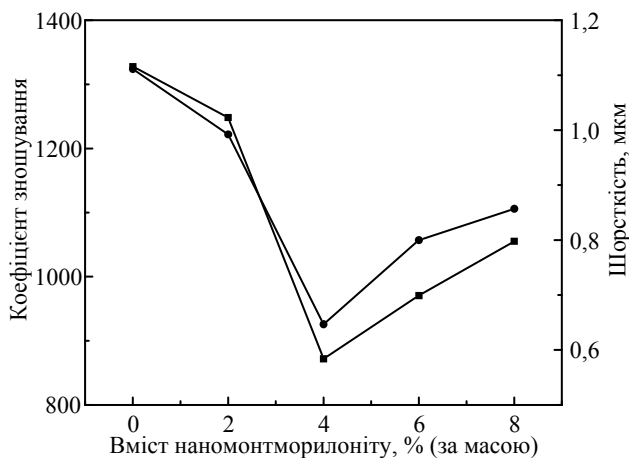


Рис. 9. Коефіцієнт зношування (●) та шорсткість шліфування (■) алмазного круга на склокерамічній зв'язці з різним вмістом наномонтморилоніту.

ВИСНОВКИ

Системним дослідженням впливу наномонтморилоніту на структуру та властивості алмазних шліфувальних кругів на склокерамічній зв'язці завдяки введенню різної кількості наномонтморилоніту в склокерамічну зв'язку виявлено, що наномонтморилоніт може певною мірою покращити властивості алмазних композитів на основі склокерамічної зв'язки та відкрити новий шлях для розробки високоефективних матеріалів шліфувальних кругів.

Наномонтморилоніт може ефективно зменшити вогнетривкість склокерамічної зв'язки та її теплове розширення. Коли вміст наномонтморилоніту становить 6 % (за масою), склокерамічна зв'язка має найменший коефіцієнт теплового розширення.

За вмісту наномонтморилоніту 4 % (за масою) міцність на вигин алмазного композиційного матеріалу зі скловолокнистою зв'язкою зростає найбільше і досягає 42 МПа за температури спікання 770 °С, що становить 82,6 % збільшення міцності на вигин у порівнянні зі зразком без наномонтморилоніту.

Відомо, що наномонтморилоніт може ефективно захищати алмазні абразиви за високих температур. Наномонтморилоніт може зменшити потік керамічної фази, через це зв'язок між алмазним абразивом і зв'язуючим матеріалом стає більш щільним. За вмісту наномонтморилоніту 4 % (за масою) структура є найбільш щільною, а міцність зв'язки – оптимальною.

За вмісту наномонтморилоніту 4 % (за масою) шліфувальний ефект алмазного шліфувального круга зі склокерамічною зв'язкою є найкращим, шорсткість поверхні становить 0,584 мкм, а коефіцієнт зносу зменшується на 30 % порівняно з алмазним шліфувальним кругом зі склокерамічною зв'язкою без наномонтморилоніту.

Додавання наномонтморилоніту може ефективно пригнічувати рухливість склокерамічної зв'язки, що допомагає підтримувати стабільність алмазних абразивів за умов високих температур, а також зменшує рухливість склокерамічної фази, що сприяє тісному зв'язку між алмазними абразивами та зв'язкою та зменшує усадку та деформацію, які певною мірою виникають під час спікання шліфувального круга.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

ФІНАНСУВАННЯ

Робота була підтримана Національним фондом природничих наук Китаю [номер гранту 51902294], проектом спеціального плану трансформації патентів провінції Шаньсі [номер гранту 20240012] та Фондом відкриття Синьцзянської ключової лабораторії високоцінного зеленого використання низькосортного вугілля [номер гранту XJDX2314-YB202403].

Jinyu Shang¹, Ruiren Yu^{1, 2}, Boheng Zhu¹, Wenjie Gong¹,
Zhicong Tian¹, Kenan Li³, Qingchun Ma¹, Xijing Zhu¹

¹Shanxi Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology,
North University of China, Taiyuan, P.R. China

²Xinjiang Key Laboratory of High Value Green Utilization
of Low-rank Coal, Changji University, P.R. China

³State Key Laboratory for High Performance Tools, Zhengzhou Research
Institute for Abrasives & Grinding Co., Ltd, Zhengzhou, P.R. China

Impact of nano-montmorillonite on the properties of vitrified bonded diamond grinding wheels

The article investigated the introduction of nano montmorillonite into vitrified bond, and the preparation of composite vitrified bond and vitrified bond diamond grinding wheels with different dosages of nano montmorillonite by sol-gel method. The results show that the introduction of appropriate amount of nano montmorillonite can effectively improve the comprehensive performance of vitrified bond diamond grinding wheels by utilizing its size effect and surface effect.

Keywords: vitrified bond, nano-montmorillonite, sol-gel, grinding wheel, grinding performance.

1. Guo Y., Chen B., Fu X. J., Xu H., Sun S.W. Experimental study on grinding 2.5D C/SiC composites by electroplated grinding wheel with ordered abrasive clusters. *Diam. Relat. Mater.* 2024. Vol. 142, art. 110838.
2. Zhang C., Qu S., Xi W.C., Liang Y.D., Zhao J., Yu T.B. Preparation of a novel vitrified bond CBN grinding wheel and study on the grinding performance. *Ceram. Int.* 2022. Vol. 48, no. 11. P. 15565–15575.
3. Wang X.Z., Ming C., Zheng Y.H., Hou N., Wang M.H. Study on grinding nickel-based superalloy GH4169 with vitrified bond CBN wheel controlling abrasive orientation by magnetic field. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022. Vol. 121, nos. 9–10. P. 6635–6645.
4. Chen Z.Q., Xiao N., Han P., Wang Z., Bai G.J. Fabrication of vitrified bond diamond grinding wheel via LCD photopolymerization. *Coatings.* 2023. Vol. 13, no. 12, art. 2079.
5. Kong S.F., Liu Y.B., Sun Y. Investigation on preparation of composite vitrified bonding ultrafine diamond grinding wheel and machining of PcBN inserts. *Ceram. Int.* 2023. Vol. 49, no. 3. P. 4631–4640.
6. Li W., Hu X.L., Long G., Shang A.S., Guo B. Grain wear properties and grinding performance of porous diamond grinding wheels. *Wear.* 2023. Vols. 530–531, art. 204993.
7. Rom M., Brakhage K.H., Barth S., Wrobel C., Mattfeld P., Klocke F. Mathematical modeling of vitrified bond bridges in grinding wheels. *Math. Comput. Simul.* 2018. Vol. 147. P. 220–236.
8. Kundrák J., Fedorenko D.O., Fedorovich V.A., Fedorenko E.Y., Ostroverkh E.V. Porous diamond grinding wheels on ceramic binders: Design and manufacturing. *Manuf. Technol.* 2019. Vol. 19, no. 3. P. 446–454.
9. Ding K., Li Q.L., Lei W.N., Zhang C.D., Xu M.Z., Wang X. Design of a defined grain distribution brazed diamond grinding wheel for ultrasonic assisted grinding and experimental verification. *Ultrasonics.* 2022. Vol. 118, art. 106577.
10. Yi J., Wang Z.W., Yi T., Deng H., Zhou W. Research on the wear of groove structured grinding wheel based on the simulation and experiment of single abrasive particle scratching. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2024. Vol. 25, no. 6. P. 1153–1166.
11. Guo B.J., Jiang H.Y. Influence of Li₂O Addition on the performance of vitrified bond and vitrified diamond composites. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 2020. Vol. 35, no. 4. P. 699–705.
12. Shi Y., Chen L.Y., Xin H.S., Yu T.B., Sun Z.L. Investigation on the grinding properties of high thermal conductivity vitrified bond CBN grinding wheel for titanium alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020. Vol. 107, nos. 3–4. P. 1539–1549.
13. Wiśniewski P. Polymer binders of ceramic nanoparticles for precision casting of nickel-based superalloys. *Nanomaterials.* 2021. Vol. 11, no. 7, art. 1714.
14. Baig N. Two-dimensional nanomaterials: A critical review of recent progress, properties, applications, and future directions. *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.* 2023. Vol. 165, art. 107362.
15. Chen F.X., Zheng H.J., Zhao Z.W., Zhao X.M., Chen Q.L., Mao S.F. Effect of V₈C₇–Cr₃C₂ nanocomposite on microstructure and properties of vitrified bond CBN grinding tools prepared by microwave heating method. *Mater. Lett.* 2018. Vol. 219. P. 41–44.
16. Zhang C., Zhao J., Sun X., Chen H., Yu T., Yu T.B. The synergistic effect of nano Y₂O₃/CeO₂ and nano Al₂O₃/SiO₂ on the properties of vitrified bond and vitrified bond CBN composites. *Ceram. Int.* 2020. Vol. 46, no. 9. P. 14224–14231.
17. Shi Y., Wang Z.H., Xu S.Z., Yu T.B., Sun Z.L. Study on the grindability of nano-vitrified bond CBN grinding wheel for nickel-based alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. Vol. 100, nos. 5–8. P. 1913–1921.

18. Cui E.Z., Zhao J., Wang X.C., Sun Z.F. Improved fracture resistance and toughening mechanisms of GNPs reinforced ceramic composites. *Ceram. Int.* 2022. Vol. 48, no. 17. P. 24687–24694.
19. Wei P.C., Zheng Y.Y., Zaoui A., Yin Z.Y. Atomistic study on thermo-mechanical behavior and structural anisotropy of montmorillonite under triaxial tension and compression. *Appl. Clay Sci.* 2023. Vol. 233, art. 106817.
20. Alani S., Hassan M.S., Jaber A.A., Ali I.M. Effects of elevated temperatures on strength and microstructure of mortar containing nano-calcined montmorillonite clay. *Constr. Build. Mater.* 2020. Vol. 263, art. 120895.
21. Montayev S., Shakeshev B., Zharylgapov S., Belov V.V. Development of a technology for producing ceramic refractory material in a composition of montmorillonite clays (bentonite-like) and ferrochrome production wastes. *MATEC Web of Conferences.* 2020. Vol. 315, art. 07007.
22. Jmal Ayadi A., Baklouti S., Kammoun A., Soro J. Study of clay's mineralogy effect on mechanical properties of ceramic body using an experimental design. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 2022. Vol. 19, no. 3. P. 1477–1489.
23. Cygan T., Wozniak J., Petrus M., Adamczyk-Cieslak B., Kostecki M., Olszyna A. The effect of microstructure evolution on mechanical properties in novel alumina-montmorillonite composites. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2019. Vol. 80. P. 195–203.
24. Shu G.J., Chuang K.H., Liao M.T., Huang C.J., Wu M.W. Sintering, microstructure, and mechanical properties of vitrified bond diamond composite. *Ceram. Int.* 2021. Vol. 47, no. 23. P. 33259–33268.
25. Wang S.F., Hsu Y.F., Liao Y.L., Lin T., Jasinski P. Effects of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , and K^{+} substitutions on the microstructure and electrical properties of GdCoO_3 ceramics. *J. Electroceram.* 2020. Vol. 45, no. 2. P. 75–83.
26. Ji Y.R., Fu R.L., Lv J.L., Zhang X.Y., Chen X.D., Li G.J., Liu X.H. Enhanced bonding strength of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}$ ceramics joined via glass frit with gradient thermal expansion coefficient. *Ceram. Int.* 2020. Vol. 46, no. 8. P. 12806–12811.
27. Nagaraj N., Jule L.T., Shanmugakani S.K., Prakash C., Singhal P., Thangarajan Sivasankaran, S., Ramaswamy K. Investigation of the performance characteristics of grinding wheel using low melting vitrified bonds. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part E.* 2024. Vol. 238, no. 4. P. 1072–1078.

Надійшла до редакції 03.05.24

Після доопрацювання 19.10.24

Прийнята до опублікування 29.11.24