

О.Ю. ФЕДОРЕНКО, Л.О. ЯЩЕНКО, Д.О. ФЕДОРЕНКО, В.О. ФЕДОРОВИЧ, О.М. КОНЄВ

РОЗРОБКА ЛЕГКОПЛАВКИХ СКЛОКЕРАМІЧНИХ ЗВ'ЯЗОК ДЛЯ ВИСОКОРЕСУРСНОГО АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Дослідження спрямовано на створення високоресурсних алмазно-абразивних інструментів з крупнопористою структурою робочого шару, використання яких зменшує виникнення дефектів шліфування при обробці чутливих до перегріву матеріалів. За наявності відкритої структури робочого шару забезпечується ефективне видалення стружки, що виключає зниження різальної здатності інструменту внаслідок забруднення шліфувальним шламом та створює сприятливі умови для інтенсивного різання матеріалів при використанні за швидкісних режимів шліфування. Для реалізації цієї задачі розроблено легкоплавкі склокерамічні зв'язки для алмазно-абразивних інструментів, які дозволяють збільшити ресурс експлуатації інструменту завдяки попередженню передчасного руйнування алмазних зерен та створенню умов для раціонального самозвтовчування алмазних зерен під час шліфування. З використанням комплексу розрахункових даних щодо основних характеристик склакомпозицій шляхом факторного планування визначено залежності «склад – властивості» та встановлено область оптимальних складів склокерамічних зв'язок, які забезпечують спікання алмазовмісного композиту за температури 550–650 °С. Показана ефективність використання алюмосилікатних мікросфер техногенного походження як структуроутворюючого наповнювача, що забезпечує формування крупнопористої структури. Визначено особливості хімічного і фазового склад техногенних золосфер, вилучених із золи виносу Криворізької ТЕС. Встановлено, що при спіканні алмазоносного шару інструменту в оболонці золосфер відбувається формування кристалічних новоутворень з високою твердістю (герциніт, муліт, магнетит, шпінель). З використанням золосфер та розроблених легкоплавких зв'язок, до складу яких входять до 30 мас. % відходів скловиробництва, виготовлено лабораторні зразки алмазовмісних композитів з відкритою пористістю 45–50 %. Дослідження їх мікроструктури та морфологічних особливостей дозволили визначити розміри пор (130–200 мкм) та встановити, що при шліфуванні відбувається часткове руйнування золосфер з утворенням додаткових різальних елементів, що підвищує різальну здатність інструменту в цілому. Результати досліджень вказують на доцільність використання обраного підходу до вибору складових алмазно-керамічного композиту, а також режимів термообробки алмазоносного шару при створенні інструменту. Такий підхід суттєво розширить можливості виготовлення алмазно-абразивного інструменту на легкоплавких склокерамічних зв'язках та сприятиме покращенню обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів.

Ключові слова: алмазно-абразивний інструмент, легкоплавка склокерамічна зв'язка, техногенні мікросфери, крупнопориста структура робочого шару, різальна здатність.

Е.Ю. ФЕДОРЕНКО, Л.А. ЯЩЕНКО, Д.О. ФЕДОРЕНКО, В.А. ФЕДОРОВИЧ, А.Н. КОНЄВ

РАЗРАБОТКА ЛЕГКОПЛАВКИХ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ СВЯЗОК ДЛЯ ВИСОКОРЕСУРСНОГО АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Исследования направлены на создание високоресурсных алмазно-абразивных инструментов с крупнопористой структурой рабочего слоя, использование которых уменьшает возникновение дефектов шлифования при обработке чувствительных к перегреву. Формирование открытой структуры рабочего слоя обеспечивает эффективное удаление стружки, исключает снижение режущей способности инструмента вследствие загрязнения шлифовальным шламом и создает благоприятные условия для интенсификации обработки материалов при использовании скоростных режимов резания. В рамках исследований разработаны легкоплавкие стеклокерамические связки для алмазно-абразивных инструментов, которые позволяют увеличить ресурс эксплуатации инструмента благодаря предупреждению преждевременного разрушения алмазных зерен и созданию крупнопористой открытой структуры рабочего слоя. С использованием комплекса расчетных данных об основных характеристиках стекломпозиций путем факторного планирования определены зависимости «состав – свойства» и установлена область оптимальных составов стеклокерамических связок, обеспечивающих спекание алмазосодержащего композита при температуре 550–650 °С. Показана эффективность использования алюмосиликатных микросфер техногенного происхождения как структурообразующего наполнителя, обеспечивающего формирование крупнопористой структуры. Определены особенности химического и фазового состав техногенных золосфер, извлеченных из зола уноса Криворожской ТЭС. Установлено, что при спекании алмазоносного слоя инструмента в оболочке золосфер происходит формирование кристаллических новообразований с высокой твердостью (герцинит, муллит, магнетит, шпинель). С использованием золосфер и разработанных легкоплавких связок, в состав которых входят до 30 масс. % стеклоотходов, изготовлены лабораторные образцы алмазосодержащих композитов с открытой пористостью 45-50%. Исследования их микроструктуры и морфологических особенностей позволили определить размеры пор (130-200 мкм) и установить, что при шлифовании происходит частичное разрушение золосфер с образованием дополнительных режущих элементов, что повышает режущую способность инструмента в целом. Результаты исследований свидетельствуют о целесообразности использования предложенного подхода при выборе состава алмазно-керамического композита и режимов термообработки алмазоносного слоя при создании инструмента. Такой подход существенно расширит возможности изготовления високоресурсного алмазно-абразивного инструмента на легкоплавких стеклокерамических связках и будет способствовать улучшению обработки деталей из труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: алмазно-абразивный инструмент, легкоплавкая стеклокристаллическая связка, техногенные микросферы, крупнопористая структура рабочего слоя, режущая способность.

© О.Ю. Федоренко, Л.О. Ященко, Д.О. Федоренко, В.О. Федорович, О.М. Конєв, 2021

DEVELOPMENT OF LOW-MELTING GLASS-CERAMIC BONDS FOR HIGH RESOURCE DIAMOND-ABRASIVE TOOLS

Research is aimed at creating high-resource diamond-abrasive tools with a large-pore structure of the working layer, the use of which reduces the occurrence of grinding defects when processing materials sensitive to overheating. The formation of an open structure of the working layer ensures effective chip removal, which excludes a decrease in the cutting ability of the tool due to contamination with grinding sludge and creates favorable conditions for intensifying the processing of materials when using high-speed cutting modes. As part of the research, low-melting glass-ceramic binders for diamond-abrasive tools have been developed, which make it possible to increase the tool service life due to the prevention of diamond grains premature destruction and the creation of a large-pore open structure of the working layer. Using a set of calculated data about the main characteristics of glass compositions by factor planning means, the dependences «composition - properties» were determined and the area of optimal compositions of glass-ceramic bonds was established, which ensure sintering of a diamond-containing composite at a temperature of 550–650 °C. The efficiency of the use of aluminosilicate microspheres of technogenic origin as a structure-forming filler providing the formation of a large-pore structure is shown. The features of the chemical and phase composition of the technogenic spheres recovered from the fly ash of the Krivoy Rog TPP have been determined. It has been established that when the diamond-bearing layer of the tool is sintered in the shell of the ash spheres, crystalline new formations with high hardness (hercynite, mullite, maghemite, spinel) are formed. Using ash spheres and developed low-melting binders, which include up to 30 mass. % of glass waste, the laboratory samples of diamond-containing composites with open porosity of 45-50% were made. Studies of their microstructure and morphological features made it possible to determine the pore size (130-200 μm) and establish that during grinding, partial destruction of ash spheres occurs with the formation of additional cutting elements, which increases the tool cutting ability. The research results indicate the advisability of using the proposed approach for selection of the diamond-ceramic composite components and the modes of heat treatment of the diamond-bearing layer when creating a tool. This approach will significantly expand the possibilities of manufacturing large-pore diamond-abrasive tools with a high service life at minimal material costs and will improve the processing of parts made of difficult-to-machine materials.

Keywords: diamond abrasive tool, low-melting glass-crystalline bond, technogenic microspheres, large-pore structure of the working layer, cutting ability.

Вступ. Сучасний рівень науки і техніки визначає високі вимоги до якості і продуктивності обробки поверхонь деталей та обумовлює необхідність створення нових високоєфективних інструментів для потреб підприємств різного спрямування машинобудівної галузі, а також військово-промислового комплексу. На сьогодні алмазне шліфування є найбільш високопродуктивним способом обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів: твердих сплавів, ситалів, кераміки, а також надтвердих неметалічних матеріалів на основі алмазу та кубічного нітриду бора (Ш). Незважаючи на численні дослідження в напрямку удосконалення технології виготовлення алмазно-абразивного інструменту (ААІ), питання підвищення його продуктивності та ресурсності залишається відкритим [1-3].

Одним з перспективних напрямків підвищення ефективності алмазно-абразивної обробки є використання алмазних кругів на керамічних зв'язках, які у порівнянні з металевими або полімерними зв'язками підвищують твердість алмазоносного шару ААІ, збільшують припустиму температуру шліфування, забезпечують високу точність обробки деталей з інструментальних металів і сплавів, композиційних матеріалів, склокераміки та здатні до раціонального самозаточування [3-6]. Головний недолік існуючих керамічних зв'язок для ААІ пов'язаний з високою температурою спікання таких керамоматричних композитів. Тому відомі типові керамічні зв'язки застосовують переважно для виготовлення шліфувального

інструменту з температуростійких абразивів (ельбору або корунду). Як відомо, спікання алмазовмісних композитів в таких умовах викликає передчасне руйнування алмазних зерен внаслідок виникнення в них напруг, а також графітизації, що унеможливує використання типових керамічних зв'язок при виготовленні ААІ [7, 8].

З огляду на вищевикладене, створення високоресурсних алмазно-абразивних інструментів з використанням легкоплавких склокерамічних зв'язок із заданими властивостями, які забезпечують збереження цілісності зерен при спіканні алмазовмісного шару на етапі виготовлення інструментів та покращують алмазоутримання при шліфуванні, є актуальним.

Мета роботи. Широке застосування, а в багатьох випадках і незамінність алмазно-абразивного інструменту (ААІ) в різних областях промисловості визначають актуальність наукових досліджень в напрямку удосконалення складів і властивостей алмазно-абразивних композитів, в тому числі, зв'язок для підвищення їх працездатності і інтенсифікації процесу шліфування. Тому метою даного дослідження була розробка легкоплавких склокерамічних зв'язок із комплексом заданих фізико-механічних і теплофізичних властивостей для виготовлення алмазовмісного композиту у виробництві алмазно-абразивних інструментів.

Основна частина. Невпинний темп зростання потреб багатомільярдної абразивної індустрії вимагає розробки нових і вдосконалення існуючих складів аб-

разивних інструментів. Завдяки рекордній твердості алмаз є незамінним при обробці виробів з важкооброблюваних матеріалів. Абразивні інструменти нового покоління з надтвердих матеріалів, зокрема алмазно-абразивні, користуються широким попитом у всіх галузях, пов'язаних з надточною обробкою деталей з різних груп матеріалів для потреб авіа- та машинобудування, електроніки та енергетики.

На сьогодні ринок алмазно-абразивного інструменту на сьогодні представлений інструментами на органічних (полімерних, вулканітових) та неорганічних (металевих, керамічних) зв'язках. ААІ на полімерних та металевих зв'язках не забезпечують раціонального самозаточування інструменту та швидко «засалюються», що призводить до передчасної втрати ріжучої здатності, необхідності використання штучних методів відновлення їх робочої поверхні та зниження якості та продуктивності обробки. Натомість використання ААІ на керамічних зв'язках дозволяють вести обробку в режимі раціонального самозаточування, коли в процесі шліфування відбувається оновлення різальних поверхонь зерен та їх видалення з робочої поверхні після остаточної втрати різальної здатності. Серед переваг ААІ на керамічних зв'язках можна відзначити точність, підвищену продуктивність обробки деталей, а також можливість «холодного» шліфування.

Основним недоліком існуючих композитів на керамічних зв'язках є висока температура формування (понад 800 °С), за яких відбувається графітизація алмазів. Вказаний недолік можна подолати за рахунок використання легкоплавкої склокерамічної зв'язки, яка забезпечує спікання алмазозносного шару інструменту за зниженої температури (550-600 °С). В свою чергу склокерамічні зв'язки надають можливості для формування крупнопористої структури керамоматричного алмазовмісного композиту з регульованою пористістю. В цьому випадку виключається «засалювання» робочої поверхні алмазних кругів, що спричиняє виникнення дефектів шліфування (припалів) завдяки зниженню температури в зоні різання внаслідок інтенсифікації повітряного потоку, який потрапляє в зону різання.

Аналіз сучасних розробок, спрямованих на отримання високоструктурного крупнопористого абразивного інструменту, свідчить, що формування поруватої структури відбувається за механізмом спучування (за умови використання газотвірних добавок) або при використанні керамічних мікросфер як структуроутворюючого наповнювача. Зокрема для виготовлення високоструктурних корундових абразивних

кругів використовують сфєрокорунд. Проте їх виготовлення відбувається за високих температур (950-1350 °С залежно від складу керамічної зв'язки), що є неприпустимим для алмазно-абразивного інструменту, оскільки високотемпературний випал спричиняє графітизацію алмазних зерен [9].

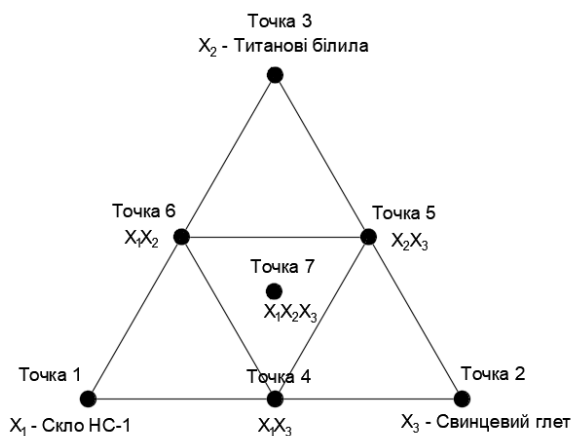
Втім існує перспектива використання техногенних мікросфер (золосфер), які утворюються при спалюванні вугілля на підприємствах паливно-енергетичного комплексу та знайшли використання як заповнювач композиційних в'язучих матеріалів [10, 11]. Золосфери мають ідеальну сферичну форму та володіють унікальним комплексом властивостей: низька густина (200–600 кг/м³); жаростійкість (температура плавлення понад 1200 °С), міцність на всебічний стиск (5–10 МПа); низька теплопровідність (0,07–0,11 Вт/(м·К)), хімічна стійкість [12]. На сьогодні вже існують технології вилучення золосфер із золи-виносу теплоелектростанцій ТЕС, що дозволяє розглядати порожнисті алюмосилікатні золосфери, як ресурсоцінну техногенну мінеральну сировину, що є аналогом штучних алюмосилікатних мікросфер. До того ж використання у матеріалоемному виробництві абразивного інструменту золосфер, які разом із золошлаковими відходами (ЗШВ) збираються у величезних об'ємах у шламонакопичувачах, сприятиме вирішенню проблеми утилізації відходів ТЕС та поліпшенню екологічного стану навколишнього середовища [12, 13].

Отже необхідність розробки легкоплавких зв'язок для ААІ та перспективність використання золосфер для досягнення поставленої мети авторами було послідовно вирішено наступні задачі:

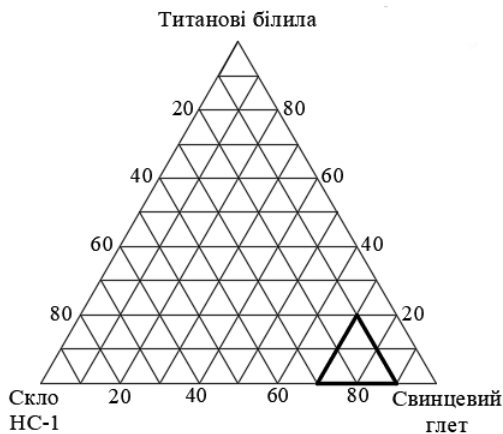
- з використанням прикладних програм розраховано властивості модельних композицій в рідкому та твердому стані;
- за результатами факторного планування встановлено відповідні залежності «склад – властивості» модельних композицій та визначено область оптимальних складів зв'язки;
- експериментально досліджено склад та властивості техногенних золосфер, як структуроутворюючого наповнювача абразивних композитів;
- розроблено склад алмазовмісних композитів та досліджено їх морфологічні особливості.

Для вирішення задачі вибору оптимального складу трикомпонентної сировинної суміші і вивчення взаємозв'язку складу і основних властивостей склокерамічної зв'язки, що визначає її функціональність, використовували симплекс-гратчастий метод

Шеффе, суть якого полягає в отриманні аналітичних залежностей властивостей від складу матеріалу з використанням спеціальних алгоритмів [14]. Враховуючи можливу нелінійність аналітичних залежностей «склад – властивості», при плануванні експерименту використана спеціальна кубічна модель (рис. №1а). Як фактори X_i ($i = 1...3$) прийнято наступний вміст компонентів сумішей: склобій (натрій-кальцій-силікатне скло НС-1) 10–30 мас. %; титанові білила 0–20 мас. %; свинцевий глет 70–90 мас. %. При цьому вміст нітрату вісмуту (III) у складі сумішей залишався сталим – 8 мас. % (понад 100 % на суху речовину). Область факторного простору експерименту представлена на рис. №1б.



а



б

Рисунок 1 – Область дослідного факторного простору: а – розташування експериментальних точок на симплексі неповного 3-го порядку, б – область факторного простору експерименту

В табл. 1 приведена план-матриця експерименту в натуральному масштабі факторів. Хімічний склад дослідних модельних композицій проводили з використанням відомостей щодо хімічного складу компо-

нентів сировинних сумішей та урахуванням введення до складу добавки нітрату вісмуту (III) в кількості 8 мас. % (понад 100 % на суху речовину). Результати розрахунків подано в табл. 2.

Таблиця 1 – План-матриця експерименту в натуральному масштабі факторів

№ точки	Шифр складу	Вміст компонентів у складі сировинної суміші, мас. %		
		Склобій	Свинцевий глет	Титанові білила
1	1	30	70	0
2	2	10	90	0
3	3	10	70	20
4	12	20	80	0
5	13	10	80	10
6	23	20	70	10
7	123	16,67	76,77	6,67

В подальшому проводили прогнозні розрахунки властивостей розплаву модельних композицій та вітрифікованої зв'язки в твердому стані. Серед властивостей зв'язки в твердому стані були розглянуті теплофізичні та фізико-механічні властивості. Слід звернути увагу на те, що саме фізико-механічні властивості зв'язки обумовлюють такі важливі характеристики алмазовмісного шару абразивних інструментів як продуктивність, тривалість ефективної експлуатації, алмазоутримання. Адитивним методом для вітрифікованих зв'язок можна спрогнозувати дійсну густину, модулі пружності та здвигу, а також твердість. Результати розрахунків основних фізико-механічних властивостей модельних композицій згідно стандартних методик надані в табл. 3.

В подальшому результати прогнозних розрахунків використовували для обробки даних планованого експерименту, що дозволило здійснити вибір раціонального складу легкоплавкої зв'язки відповідно до задач дослідження. Узагальнення та аналіз отриманих даних дозволили визначити область оптимальних складів композицій (рис. 2), які задовольняють висунуті вимоги як за властивостями розплаву, що визначають інтенсивність спікання алмазовмісного композиту, так і за властивостями зв'язки, що обумовлюють поведінку алмазоносного шару інструменту при шліфуванні.

Склади та властивості легкоплавких склокерамічних зв'язок А, В, С, які належать до області оптимальних композицій, надані відповідно в табл. 4, 5. Для порівняння спроектований склад

зв'язки D, при виготовленні якої як склоутворюючу складову використовували борну кислоту (замість ампульного бою). Експериментальні дослідження плавкості розроблених склокерамічних зв'язок показали, що температура їх плавлення знаходиться в

інтервалі температур 500–600 °С, що відповідає поставленій меті. При цьому найнижчою температурою плавлення (500 °С) характеризується зв'язка D, а найширший інтервал плавлення (60 °С) має зв'язка А.

Таблиця 2 – Хімічний склад модельних композицій

Модельні композиції	Вміст компонентів*, мас.%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PbO	TiO ₂	Σ
1	21,9	1,35	0,3	2,1	1,2	2,55	0,6	70	0	100
2	7,3	0,45	0,1	0,7	0,4	0,85	0,2	90	0	100
3	7,3	0,45	0,1	0,7	0,4	0,85	0,2	70	20	100
4	14,6	0,9	0,2	1,4	0,8	1,7	0,4	80	0	100
5	7,3	0,45	0,1	0,7	0,4	0,85	0,2	80	10	100
6	14,6	0,9	0,2	1,4	0,8	1,7	0,4	70	10	100
7	12,12	0,75	0,16	1,13	0,66	1,41	0,33	76,77	6,67	100

* всі композиції містять 4,52 мас. % В₂O₃

Таблиця 3 – Розрахункові властивості модельних композицій

Модельні композиції	Уявна густина ρ, кг/м ³	Модуль зсуву G, Н/м ²	Модуль пружності E, Н/м ²	Коефіцієнт Пуассона μ	Твердість, Н/мм ²
1	3882,81	1,87·10 ¹⁰	5,1·10 ¹⁰	0,2554	6511
2	4319,6	1,56·10 ¹⁰	4,51·10 ¹⁰	0,2691	3281
3	4154,6	2,64·10 ¹⁰	7,02·10 ¹⁰	0,2139	6419
4	4101,21	1,71·10 ¹⁰	4,81·10 ¹⁰	0,2623	4896
5	4637,1	2,1·10 ¹⁰	5,76·10 ¹⁰	0,2415	4850
6	4018,71	2,25·10 ¹⁰	6,06·10 ¹⁰	0,2347	6465
7	4120,99	2,02·10 ¹⁰	5,54·10 ¹⁰	0,2461	5394

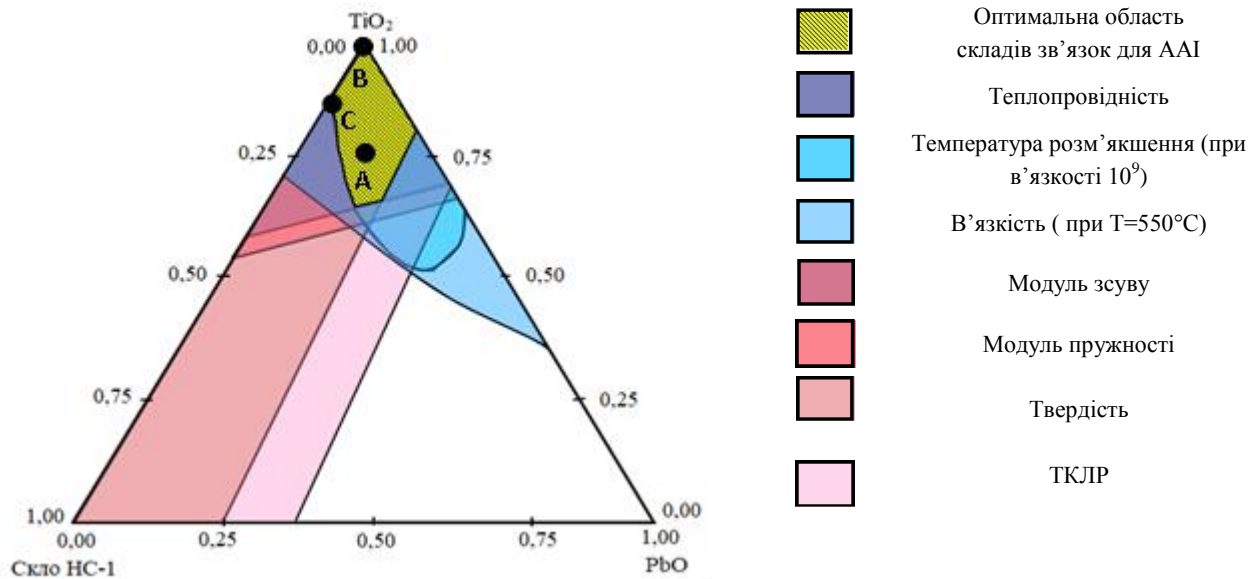


Рисунок 2 – Обрана область сировинних композицій для розробки легкоплавких склокерамічних зв'язок для алмазно-абразивного інструменту

Таблиця 4 – Сировинні композиції для отримання склокерамічних зв'язок, спроектованих в межах оптимальної області складів модельних композицій

Компоненти сировинної суміші	Вміст компонентів у складі зв'язок, мас. %			
	A	B	C	D
Титанові білила	16	20	19	—
Свинцевий глет	73	70	70	70,34
Бій ампульний (склад НС-1)	11	10	11	—
Борна кислота	—	—	—	11,96
Оксид купруму (II)	—	—	—	12,56
Глинозем ГО-00	—	—	—	5,14
$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ (понад 100 %)	8	8	8	8

Таблиця 5 – Властивості розроблених склокерамічних зв'язок

Властивості	A	B	C	D
Характеристики зв'язок у стані розплаву				
В'язкість η , Па·с ($\lg\eta$) за температури спікання композиту 550 °С	2	2,4	2,6	3,57
Температура розм'якшення ($\eta = 10^9$ Па·с)	400	405	405	430
Характеристики зв'язок в твердому стані				
ТКЛР $\alpha \cdot 10^6, 1/\text{K}$	10,6	10,6	10,8	8,59
Теплопровідність, Вт/м·К	0,34	0,36	0,35	—
Модуль пружності, Н/м ²	$7 \cdot 10^{10}$	$6,8 \cdot 10^{10}$	$6,6 \cdot 10^{10}$	—
Модуль здвигу, Н/м ²	$2,6 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{10}$	$2,45 \cdot 10^{10}$	—
Твердість за Віккерсом, Н/мм ²	$6,5 \cdot 10^9$	$6,5 \cdot 10^9$	6250	—

Дослідження фазового складу розробленої склокерамічної зв'язки (склад D) здійснювали з використанням рентгенофазового аналізу (ДРОН 3М, $\text{CuK}\alpha$ -випромінювання; нікелевий фільтр). У складі продуктів випалу зв'язки (пробу отримано за умов спікання керамоматричного алмазовмісного композиту) ідентифіковано значну кількість рентгеноаморфної склофази та наступні кристалічні фази: тенорит (CuO), мідьвісна шпінель ($\text{CuO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), сполука складу $4\text{PbO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{V}_2\text{O}_5$. Отже результати РФА свідчать про склокристалічний характер зв'язки. При цьому наявність мідьвісної шпінелі (аналога природного термаерогініту, що має густину $4,87 \text{ г/см}^3$ і твердість за Мосом 7 [15]), є позитивним технологічним фактором, оскільки присутність цієї фази підвищує зносостійкість зв'язки.

Для виготовлення крупнопористих алмазовмісних керамоматричних композитів з регульованою пористістю як структуроутворюючий наповнювач використовували золосфери, вилучені з золи-виносу Криворізької ТЕС (рис. 3). Експериментально визначено властивості золосфер Криворізької ТЕС: насипна густина – $0,4 \text{ г/см}^3$; питома густина – $0,7 \text{ г/см}^3$; міцність на всебічне стиснення – 10 МПа. Рентгено-

фазовий аналіз (РФА) показав, що матеріал золосфер є практично рентгеноаморфним, оскільки містить лише сліди кристобаліту. Встановлені морфологічні особливості золосфер: товщина оболонки (60–70 мкм), скловидний характер матеріалу з якої вона складається, наявність в крупних (20–25 мкм) і дрібних (до 5 мкм) сферичних пор.

Оскільки після термообробки золосфер була помічено зміна їх кольору, зроблено припущення щодо можливості формування в них кристалічних новоутворень під час випалу композиту. З використанням якісного РФА досліджено фазовий склад золосфер після годинної витримки за температури 600 °С. За результатами досліджень в якості основних фаз ідентифіковані герциніт $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, муліт $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, маггеміт $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ та гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. У підпорядкованій кількості присутня шпінель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ і кварц SiO_2 . Як відомо, кристалічні фази герценіту, маггеміту та шпінелі, що кристалізуються у кубічній сингонії, мають підвищену густину і твердість. Наявність мулітової фази в зв'язці сприяє підвищенню її хімічної стійкості та розширює інтервал плавлення. Таким чином, утворення в оболонках золосфер вказаних фаз в умовах спікання алмазовмісного композиту сприяти-

ме збільшенню абразивності наповнювача та ефективності шліфування отриманим з його використанням високоструктурним інструментом. Отже, одержані дані підтвердили нашу гіпотезу щодо перспективності застосування золосфер як структуроутворюючого наповнювача, здатного виконувати роль вторинного абразиву, при виготовленні ААІ на легкоплавких склокерамічних зв'язках.

В подальшому з використанням розроблених легкоплавких склокерамічних зв'язок були виготовлені лабораторні зразки алмазовмісних композитів з використанням алмазних порошоків різної зернистості (АС6 160/125 та АС6 80/63) та золосфер фракцій

0,315–0,5 мкм та 0,15–0,315 мкм. Для цього суміш тонкодисперсних компонентів зв'язки змішували з алмазним порошком в кількості 11,73 мас. %, що відповідає 25 %-й концентрації зерен в алмазоносному шарі інструменту, а також золосферами, вміст яких залежав від фракції та становив відповідно 20 % і 30 %. Брикетування шихт здійснювали під тиском 5 МПа та піддавали вільному випалу в силітовій печі за температури 550 °С з витримкою впродовж 15 хв. Для випалених зразків визначили показники відкритої пористості (43,61–50,68 %) та лінійної усадки (0,71–1,07 %).

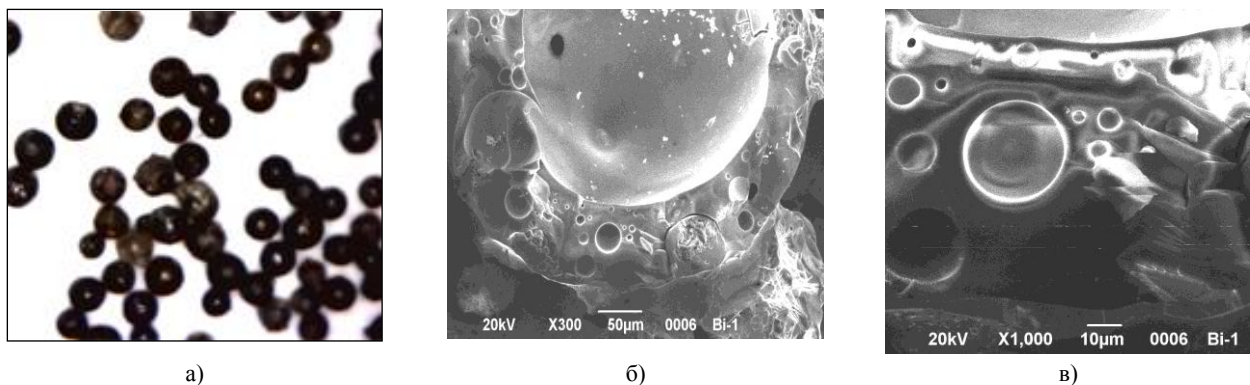


Рисунок 3 – Мікрофотознімки золосфер, вилучені з відходів Криворізької ТЕС: а) збільшення $\times 50$, б) збільшення $\times 300$, в) збільшення $\times 1000$

Дослідження мікроструктури отриманих високоструктурних алмазовмісних композитів на легкоплавкій склокристалічній зв'язці показало, що алмазоносний шар складається з склокерамічної матриці, яка утримує алмазні зерна і золосфери та містить як ізольовані, так і сполучені пори розміром 100–200 мкм. Зв'язка щільно огортає зерна, забезпечуючи необхідне алмазоутримання на робочій поверхні інструменту. На вільних від зв'язки поверхнях золосфер помітні кристалічні новоутворення, що відрізняються за формою та розмірами. Під час шліфування золосфери, в яких за даними РФА кристалізуються високотверді фази (шпінель, герциніт і муліт), не зазнають остаточного руйнування, а утворюють додаткові різальні елементи.

Висновки. В результаті комплексу теоретичних і експериментальних досліджень розроблено серію легкоплавких склокристалічних зв'язок, використання яких дозволяє вести спікання алмазоносного шару ААІ за температури 550–650 °С. Показана можливість використання при виготовленні зв'язок до 30 % склобою натрій-кальцій-силікатного складу (НС-1), що дозволить знизити собівартість виробництва ААІ.

Встановлено, що при нагріванні зв'язки утворюються фази, які збільшують її зносостійкість (мідна шпінель), розширюють інтервал плавлення, що покращує спікання композиту (муліт) та є нерозчинними у водних змащувально-охолоджуючих розчинах лужного характеру (рН = 8,5–10,5).

Визначено хімічний та фазовий склад золосфер Криворізької ТЕС, показана доцільність їх використання в якості структуроутворюючого наповнювача, що виконує роль вторинного абразиву. Встановлено, що в умовах спікання алмазоносного шару на легкоплавких склокерамічних зв'язках відбувається утворення високотвердих фаз (маггеміту, герциніту, шпінелі), що поліпшує їх абразивні властивості. Показано, що за умови введення 20–30 % золосфер до складу алмазно-керамічної композиції поруватість алмазоносного шару інструменту змінюється в межах 43–50 %. При цьому розміри пор (100–200 мкм), які утворюють золосфери, забезпечують відведення шламу, що попереджає «засалювання» робочої поверхні інструменту та забезпечує бездефектне шліфування. Показано, що при шліфуванні відбувається часткове руйнування золосфер та утворення додаткових різальних елементів.

льних елементів на робочій поверхні інструмента, що сприяє підвищенню продуктивності обробки.

Проведені дослідження вказують на доцільність використання комплексного теоретичного та емпіричного підходу до вибору раціональних характеристик компонентів високоструктурних крупнопористих ААІ та оптимальних умов спікання алмазозносного шару при виробництві алмазно-абразивного інструменту на легкоплавких склокерамічних зв'язках. Такий підхід дозволить істотно розширити технологічні можливості виготовлення різних ААІ (кругів, брусків, головок), а також підвищити ресурсність інструменту та ефективність процесу шліфування.

Список літератури

- Uede K. Latest technical trends of machine tools. *Koyo Engineering Journal English Edition*. 2004. No. 165E. P. 14-19.
- Klockea F., Barth S., Mattfeld P. High performance grinding. *Procedia CIRP*. 2016, Vol. 46. P. 266–271.
- Rowe W.B. Principles of modern grinding technology.– USA: Elsevier, 2014. 480 p.
- Chen Y., Zhang L. Polishing of diamond materials: mechanisms, modeling and implementation. – London: Springer, 2013. 174 p.
- Staniewicz-Brudnik B., Plichta J., Nadolny K. Effect of porous glass-ceramic materials addition on the cubic boron nitride (cBN) tools properties. *Optica Applicata*. 2005. Vol.35. No. 4. P.809–817.
- Boland J.N., Li X.S. Microstructural characterisation and wear behaviour of diamond composite materials. *Materials*. 2010. Vol.3. P.1390–1419.
- Majstrenko A.L., Novikov N.V., Bogatyreva G.P., Olejnik N.A. Substantiation of a concept of a selective destruction of diamond synthesis product. *Sverkhтвердые Материалы*. 2005., No. 1,P.17–27.
- Meng D., Yue W., Lin F., Wang C., Wu Z. Thermal stability of ultrahard polycrystalline diamond composite materials. *Journal of Superhard Materials*. 2015. Vol.37. P.67–72.
- Майстренко А. Л., Боримский А. И., Девин Л. Н., Бологова Л.М., Щербakov А.В., Сулима А.Г. К вопросу о механизме разупрочнения кристаллов синтетического алмаза при высокотемпературном нагревании. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.М. Бакуля НАН Украины, 2010. Вып. 13. С. 272–279.
- Wang Q., Wang D., Chen H. The role of fly ash microsphere in the microstructure and macroscopic properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 83. P. 125–137.
- Jow J., Dong Y., Zhao Y., Ding S., Li Q., Wang X., Lai S. Fly Ash-based Technologies and Value-added Products Based on Materials Science. 2015 World of Coal Ash (WOCA) Conference in Nashville, May 5–7, 2015. 26 p.
- Черепанов А.А., Кардаш В.Т. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ. Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 2. С. 98–115.
- Liu H., Sun Q., Wang B., Wang P., Zou J. Morphology and Composition of Microspheres in Fly Ash from the Luohuang Power Plant, Chongqing, Southwestern China. *Minerals*. 2016. Vol. 6, No. 2. P. 30.
- Ильченко К. Д., Морозенко Е. П. Планирование эксперимента при исследовании теплофизических свойств шихтовых материалов металлургии. – Дніпропетровськ: Січ, 2004. 176 с.
- Andal V., Buvanewari G., Lakshmiathy R. Synthesis of CuAl₂O₄ Nanoparticle and Its Conversion to CuO Nanorods. *Journal of Nanomaterials*. *Nanomaterials for Sustainable Development: the UN 2030 goals Volume 2021* |Article ID 8082522 | <https://doi.org/10.1155/2021/8082522/>

References (transliterated)

- Uede K. Latest technical trends of machine tools. *Koyo Engineering Journal English Edition*. 2004. No. 165E. P. 14-19.
- Klockea F., Barth S., Mattfeld P. High performance grinding. *Procedia CIRP*. 2016, Vol. 46. P. 266–271.
- Rowe W.B. Principles of modern grinding technology.– USA: Elsevier, 2014. 480 p.
- Chen Y., Zhang L. Polishing of diamond materials: mechanisms, modeling and implementation. – London: Springer, 2013. 174 p.
- Staniewicz-Brudnik B., Plichta J., Nadolny K. Effect of porous glass-ceramic materials addition on the cubic boron nitride (cBN) tools properties. *Optica Applicata*. 2005. Vol.35. No. 4. P.809–817.
- Boland J.N., Li X.S. Microstructural characterisation and wear behaviour of diamond composite materials. *Materials*. 2010. Vol.3. P.1390–1419.
- Majstrenko A.L., Novikov N.V., Bogatyreva G.P., Olejnik N.A. Substantiation of a concept of a selective destruction of diamond synthesis product. *Sverkhтвердые Материалы*. 2005., No. 1,P.17–27.
- Meng D., Yue W., Lin F., Wang C., Wu Z. Thermal stability of ultrahard polycrystalline diamond composite materials. *Journal of Superhard Materials*. 2015. Vol.37. P.67–72.
- Maystrenko A. L., Borimskiy A. I., Devin L. N. Bologova L.M., Shcherbakov A.V., Sulima A.G. K voprosu o mekhanizme razuprochneniya kristallov sinteticheskogo almaza pri vysokotemperaturnom nagevanii. Porodorazrushayushchiy i metalloobrabatyvayushchiy instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniya i primeneniya: sb. nauch. tr. – K.: ISM im. V.M. Bakulya NAN Ukrainy. 2010. Vyp. 13. S. 272–279.
- Wang Q., Wang D., Chen H. The role of fly ash microsphere in the microstructure and macroscopic properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 83. P. 125–137.
- Jow J., Dong Y., Zhao Y., Ding S., Li Q., Wang X., Lai S. Fly Ash-based Technologies and Value-added Products Based on Materials Science. 2015 World of Coal Ash (WOCA) Conference in Nashville, May 5–7, 2015. 26 p.
- Kompleksnaya pererabotka zoloshlakovykh otkhodov TETs / Cherepanov A.A., Kardash V.T. // *Geologiya i poleznye iskopyemyye Mirovogo okeana*. – 2009. – № 2. – S. 98–115.
- Liu, H. Morphology and Composition of Microspheres in Fly Ash from the Luohuang Power Plant, Chongqing, Southwestern China / H. Liu, Q. Sun, B. Wang, P. Wang, J. Zou // *Minerals*. – 2016. – Vol. 6, No. 2. – P. 30. <https://doi.org/10.1155/2021/8082522/>
- Ilchenko K. D., Morozenko E. P. Ilchenko K. D. Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii teplofizicheskikh svoystv shikhtovykh materialov metallurgii. – Dnipropetrovsk: Sich. 2004.176 s.
- Andal V., Buvanewari G., Lakshmiathy R. Synthesis of CuAl₂O₄ Nanoparticle and Its Conversion to CuO Nanorods. *Journal of Nanomaterials*. *Nanomaterials for Sustainable Development: the UN 2030 goals Volume 2021* |Article ID 8082522 | <https://doi.org/10.1155/2021/8082522/>

Надійшла (received) 09.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Федоренко Олена Юріївна (Федоренко Елена Юрьевна, Fedorenko Olena Yuriivna) – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; тел. +38(057)707-64-82 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0831-3485>; e-mail: fedorenko_e@ukr.net.

Яценко Лариса Олександрівна (Яценко Лариса Александровна, Yashchenko Larysa Oleksandrivna) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри безпеки праці та навколишнього середовища; м. Харків, Україна; тел.: +38(057) 707-64-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4939-1244>; e-mail: mla72@ukr.net.

Федоренко Дмитро Олегович (Федоренко Дмитрий Олегович, Fedorenko Dmytro Olehovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри Інтегрованих технологій машинобудування; м. Харків, Україна; тел. +38(093)254 - 51-61 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2300-8171>; e-mail: dmitriy_fedorenko@ukr.net.

Федорович Володимир Олексійович (Федорович Владимир Алексеевич, Fedorovych Volodymyr Oleksiiovych) – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри Інтегрованих технологій машинобудування; м. Харків, Україна; тел. +38(093)254 -51-61 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4440-3656> e-mail: fedvlad49@gmail.com.

Конєв Олександр Миколайович (Конєв Александр Николаевич, Koniev Oleksandr Mykolaiovych) – студент кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; тел. +38(057) 707-64-82; e-mail: aleksandr09konev@gmail.com.