

СУЧАСНІ АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 666.3-1 (045)

¹О.П. Уманський, д.т.н., проф.²А.Г. Довгаль, асист.³В.І. Субботін, н.с.⁴О.Д. Костенко, інж.**РОЗРОБЛЕННЯ КЕРАМІЧНОГО ЗНОСОСТІЙКОГО МАТЕРІАЛУ
НА ОСНОВІ КАРБІДУ КРЕМНІЮ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ**^{1,2}Національний авіаційний університет¹E-mail: kermet@voliacable.com²E-mail: 270579@ukr.net^{3,4}Інститут проблем матеріалознавства ім. Францевича

Розглянуто особливості утворення структури гарячепресованого керамічного матеріалу на основі карбїду кремнію з домішками оксидів алюмінію і оксидів цирконію. Наведено результати триботехнічних випробувань отриманих керамічних матеріалів в умовах тертя без мастильних матеріалів в повітряному середовищі. Оптимізовано склади і технологічні режими отримання керамічних матеріалів щодо їх пористості та зносостійкості на основі проведених досліджень.

Structure creation features of hot-pressed ceramic material based on silicon carbide with additions of aluminium oxide and zirconium oxide have been studied. Tribological tests of the acquired ceramic materials on condition of friction without lubricating materials in air medium have been performed. Optimization of compositions and technological modes of acquired ceramic materials in relation to their porosity and wear resistance have been completed.

Рассмотрены особенности образования структуры горячепрессованного керамического материала на основе карбида кремния с добавками оксидов алюминия и оксидов циркония. Приведены результаты триботехнических испытаний полученных керамических материалов в условиях трения без смазочных материалов в воздушной среде. Оптимизированы составы и технологические режимы получения керамических материалов относительно их пористости и износостойкости на основании проведенных исследований.

Постановка проблеми

Торцеві ущільнення валів – найефективніші пристрої, що використовуються в газових і гідравлічних машинах, а також у насосах для хімічної, нафтохімічної, паливної, енергетичної, харчової галузей промисловості.

Торцеві ущільнення призначені для розділення простору з різним тиском, робочими середовищами або температурами. Вони запобігають проникненню сторонніх частинок у робоче середовище, витіканню рідини, що перекачується, або витіканню мастила. Ці пристрої прості в обслуговуванні та надійні.

Для виробництва ущільнювальних кілець застосовують:

- графіт;
- сталі;
- тверді сплави;
- кераміку.

Порівняльну характеристику властивостей цих матеріалів для використання їх як торцевих ущільнень наведено в таблиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Графіт, незважаючи на ефект самомащення, має високу корозійну стійкість, низьку вартість, низьку зносостійкість, абразивну стійкість особливо за високих швидкостях ковзання [1].

Класи матеріалів для торцевих ущільнень

Матеріали	Вартість	Зносостійкість	Корозійна стійкість	pV-критерій
Графіти	Низька	Низька	Висока	9–18
Сталі, чавуни	Середня	Середня	Низька	9–35
Сплави ВК	Висока	Висока	Низька	90
Керамічні матеріали	Низька	Висока	Висока	150

Перевагами металу, сталі і чавунів є високі технологічність, жорсткість і в'язкість, низька вартість. Недоліками цього класу матеріалів є низький pV-критерій – близько 9–35 (співвідношення тиску середовища, що ущільнюється, і швидкості обертання [2]) торцевого ущільнення, а також низька корозійна стійкість.

Карбід вольфраму (сплави ВК) має підвищені значення зносостійкості, в'язкості і жорсткості, pV-критерій 90, низьку корозійну стійкість і високу вартість, а також питому вагу.

Керамічні матеріали забезпечують pV-критерій 150. Вони поступаються тільки сталевим кільцям з покриттями з керамічних матеріалів (pV-критерій 200).

Керамічні матеріали на основі оксиду алюмінію мають високу зносостійкість, жорсткість і низьку вартість, але низьку стійкість до зміни температур.

Керамічні матеріали на основі карбїду кремнію мають достатню зносостійкість, жорсткість, і корозійну стійкість, низьку вартість.

Найперспективнішою для виготовлення торцевих ущільнень є конструкційна кераміка на основі тугоплавких з'єднань. Недоліки цього матеріалу – висока крихкість.

Торцеві ущільнення з антифрикційних твердих керамічних матеріалів забезпечують мінімально можливі витікання середовища, що ущільнюється [3].

Сировинна база України має великі запаси кремнезему і глинозему, тому доцільно розробляти та впроваджувати кераміку, основними інгредієнтами якої є карбід кремнію і оксид алюмінію. Вибір карбїду кремнію обґрунтований його високою твердістю, міцністю, ерозійною і корозійною стійкістю в газових і рідких агресивних середовищах. Карбїт кремнію недорогий і недефіцитний матеріал.

Мета роботи – розробити технологію отримання кераміки системи SiC–Al₂O₃ з різним співвідношенням карбїду й оксидної фаз, дослідити вплив цього співвідношення на структуру та властивості (зносостійкість, коефіцієнт тертя) її виробів.

Результати дослідження

Гаряче пресування карбїду кремнію може здійснюватися лише за рахунок переміщення частинок і навантаження. У техніці гарячого пресування процес ущільнення карбїду кремнію не реалізується.

Гаряче пресування карбїду кремнію без зв'язок за температур 2230 – 2370°C дозволило отримати зразок, пористість якого становить 29 – 31%, а за тиску 60 МПа і температури 2350°C гарячепресований карбід кремнію має пористість 16% [4].

Пористість вища за 8% є відкритою. Для техніки ущільнювача матеріали з такою пористістю непридатні.

Проведено дослідження впливу домішок оксиду алюмінію на структуру та властивості карбїдокремневої кераміки.

У системі SiC–Al₂O₃ методом гарячого пресування отримано матеріали з домішкою 20, 50, 80% Al₂O₃. Попередньо порошки оксиду алюмінію (ТУ 6-09-2486-77) і карбїду кремнію (ТУ 6-09-03-350-73) у відповідних співвідношеннях змішували в сталевих барабанах зі сталевими розмольними тілами в планетарному млині «Санд-1» у середовищі ацетону протягом 4–6 год. Отриману шихту сушили і просіювали через сито (250 мкм), після чого шихту засипали в графітну пресформу, робочі поверхні якої захищали шаром нітриду бору, для уникнення взаємодії пресованого матеріалу та високоміцного графіту марки МПГ-7.

Гаряче пресування проводили на установці СПД-120 з індукційним нагріванням без захисної атмосфери. Температуру контролювали за допомогою пірометра. Навантаження прикладали за температури 800°C.

Зразки матеріалу SiC –20% Al₂O₃ пресували за температур 1600, 1870, 2150°C і максимального тиску 30 МПа. За температури 1600°C процес ущільнення відбувався майже без усадки, тобто з підвищенням температури відчутного ущільнення не відбувалося.

Залишкова пористість зразка становила 25%. Підвищення температури пресування до 1870°C інтенсифікувало процес ущільнення зразка, проте залишкова пористість – достатньо висока 16%.

За температури 2150°C спостерігалось незначне збільшення усадки, проте отримати безпористі зразки матеріалу SiC –20% Al₂O₃ не вдалося. Пористість зразків у цьому випадку становила 10%.

Гаряче пресування кераміки, що містить 50% Al₂O₃, за температури 1600°C характеризується значною усадкою, але отримати безпористу структуру не вдалося.

У разі збільшення температури пресування до 1870°C отримано безпористі зразки.

Ущільнення під час гарячого пресування кераміки SiC – 80% Al₂O₃ відбувається інтенсивно вже за температури 1600°C. У отриманих зразках пор не знайдено. Уведення домішок оксиду алюмінію у процесі гарячого пресування карбиду кремнію не тільки сприяє інтенсифікації процесу ущільнення, але і дозволяє істотно знизити температуру гарячого пресування.

Визначено фізико-механічні властивості гарячепресованих зразків SiC – 50% Al₂O₃.

Границя міцності триточкового згину ISO/TC206 становить 640–700 МПа, твердість 89–91 HRA.

Карбідокремнієву кераміку SiC – 50% Al₂O₃ у подальших дослідженнях використовували як базовий матеріал, до складу якого для підвищення фізико-механічних і експлуатаційних властивостей додавали оксид цирконію.

Оксид цирконію є активуючим компонентом, що зумовлює інтенсифікацію масоперенесення і дифузійних процесів на міжфазовій межі під час утворення рідкої фази.

Кінетику ущільнення матеріалів (залежність відношення фактичної густини до теоретичної від часу) показано на рис. 1.

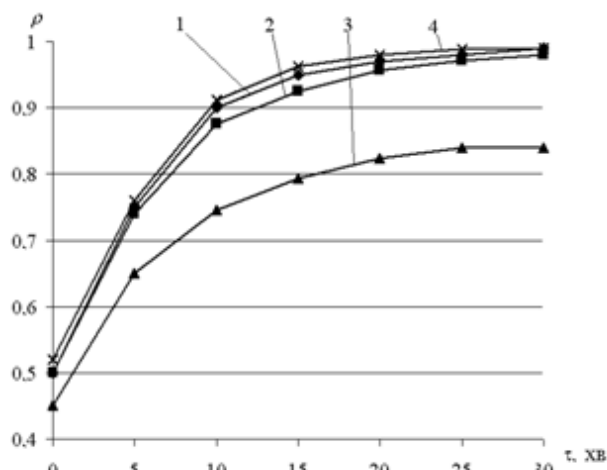


Рис. 1. Кінетика ущільнення матеріалів залежно від складу зв'язки (температура розігрівання 1870°C):

1 – 20% SiC – 80% Al₂O₃;

2 – 50% SiC – 50% Al₂O₃;

3 – 80% SiC – 20% Al₂O₃;

4 – 50% SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂

Склади 20% SiC – 80% Al₂O₃, 50% SiC – 50% Al₂O₃, 50% SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂ вже на 5-й хвилині починають активно ущільнюватися і наприкінці процесу (через 30 хв) їх пористість становить 1–2%, пористість складу 80% SiC – 20% Al₂O₃ істотно відрізняється і наприкінці процесу становить 16%.

Структуру отриманих матеріалів показано на рис. 2.

Мікроструктура керамічного матеріалу системи SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂ є дрібнодисперсною через те, що співвідношення оксидів цирконію й алюмінію відповідає евтектичному складу.

Карбід кремнію є основною фазою (темні вкраплення). Уздовж меж зерен SiC розміщується оксид алюмінію, який у вигляді окремих дрібних сферичних зерен містить оксид цирконію.

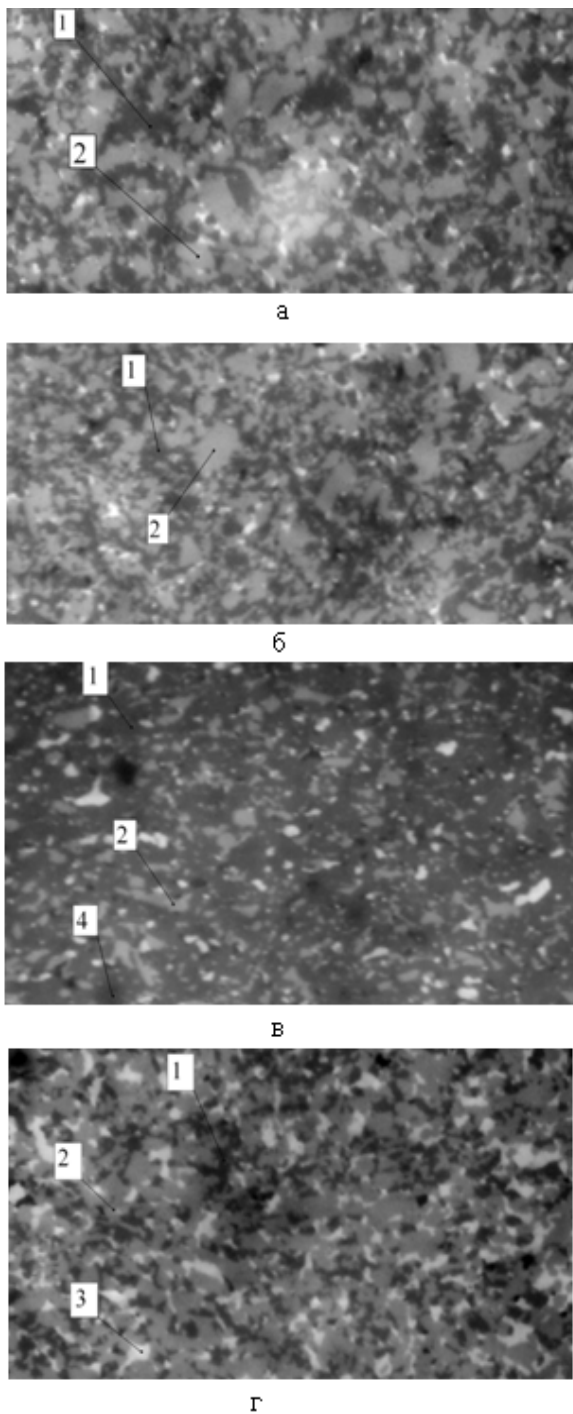


Рис. 2. Мікроструктура керамічного матеріалу $\times 500$:

a – 20% SiC – 80% Al₂O₃;

б – 50% SiC – 50% Al₂O₃;

в – 80% SiC – 20% Al₂O₃;

г – 50% SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂;

1 – карбід кремнію,

2 – оксид алюмінію,

3 – оксид цирконію;

4 – пори

Оксид ZrO₂ у цій системі виконує роль дисперсно-зміцнювального компонента.

Розмір зерен фази карбиду не перевищував 5 мкм, тоді як ширина оксидних плівок становить 0,5–1 мкм.

Керамічний матеріал на основі карбиду кремнію з домішками оксидів алюмінію і цирконію має більш високі, порівняно з композиційним матеріалом SiC–50% Al₂O₃, властивості: $\sigma_{3r} = 1020$ МПа.

Зі збільшенням кількості зв'язок Al₂O₃ значно зменшується пористість, а оптимальна кількість зв'язок 50% формує більш дисперсну структуру на відміну від складів 20% SiC – 80% Al₂O₃ і 80% SiC – 20% Al₂O₃, які мають вкраплення агрегатів карбидокремнієвої і оксидноалюмінієвої фаз (рис. 2, *a*, *в*).

Уведення оксиду цирконію в зв'язку кераміки в евтектичній концентрації (68% Al₂O₃ + 34% ZrO₂) формує ще більш дрібнодисперсну структуру і майже до нуля знижує пористість виробів, про що свідчить кінетика ущільнення цього складу (рис. 1).

Усі чотири склади випробовували на зносостійкість із контртілом з легованої сталі в широкому діапазоні швидкостей ковзання та навантажень.

Межі діапазонів швидкостей і навантажень відповідають моделюванню реальних умов роботи низко- і середньошвидкісних торцевих ущільнень відцентрових насосів типу СЦН і СЦЛ, які широко застосовують для перекачування авіаційного палива в технологічному устаткуванні паливозаправників і систем централізованої заправки аеропортів.

Вивчено вплив домішок оксидів цирконію і алюмінію на триботехнічні характеристики карбидокремнієвої кераміки. Ці характеристики оцінювали за схемою «площина–площина» [5] за різних швидкостях ковзання 2–7 м/с і навантаженнях 1–7 МПа, на повітрі, без мастила в парі з контртілом зі сталі Х16Н4. Вплив на триботехнічні характеристики швидкості випробувань розроблених матеріалів досліджували за постійного тиску, вплив величини навантаження – за постійної швидкості (рис. 3).

Насамперед проведено випробування розроблених матеріалів за постійного навантаження 5 МПа при різних швидкостях (рис. 3, а, б).

Зі збільшенням швидкості інтенсивність зношування та коефіцієнти тертя для всіх досліджених матеріалів зменшуються.

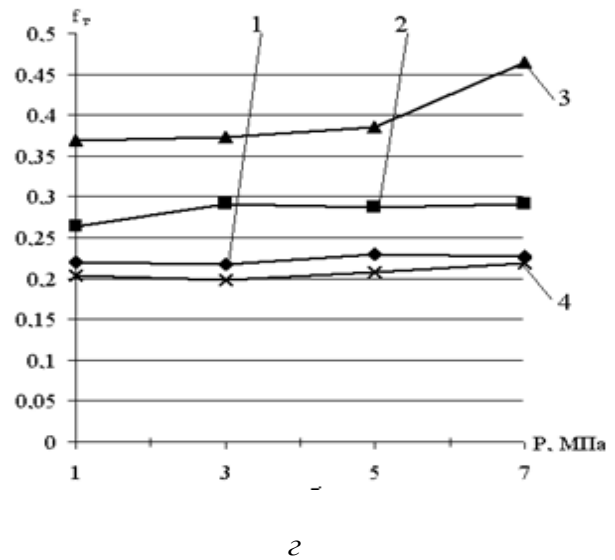
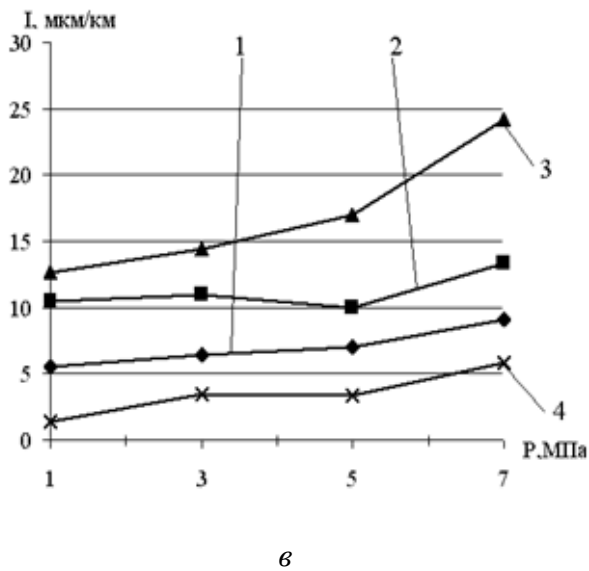
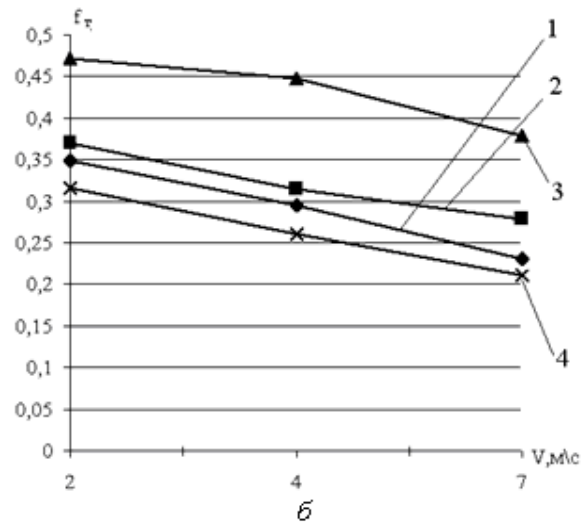
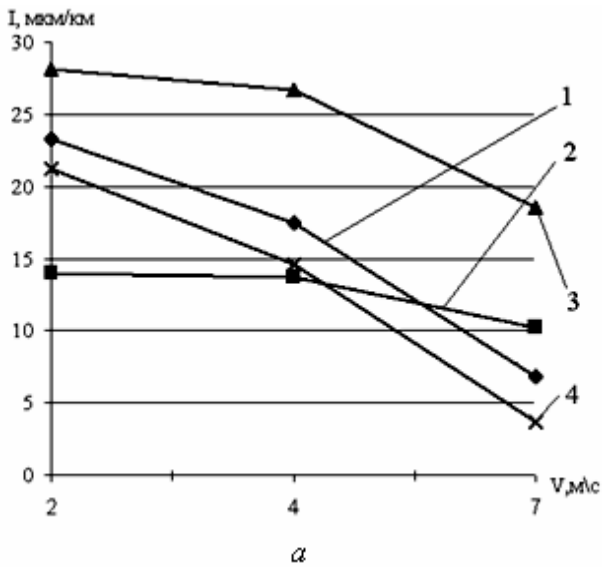


Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування (а) і коефіцієнта тертя (б) від швидкості ковзання (а, б) та навантаження (в, г) для складів керамічних матеріалів:
 1 – 20% SiC – 80% Al₂O₃;
 2 – 50% SiC – 50% Al₂O₃;
 3 – 80% SiC – 20% Al₂O₃;
 4 – 50% SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂

Найбільш інтенсивно процес зношування протікає у матеріалі SiC – 20% Al₂O₃. За швидкості 2 м/с зношування цього матеріалу становить 28 мкм/км, а зі збільшенням швидкості до 7 м/с зношування зменшується до 18 мкм/км. Коефіцієнти тертя також зменшуються з 0,47 до 0,37.

Зі збільшенням вмісту оксиду алюмінію до 50% у карбіді кремнію спостерігається значне підвищення триботехнічних характеристик, які за швидкості випробувань 7 м/с ставлять $I = 10$ мкм/км, $f_T = 0,22$.

Найкращі триботехнічні характеристики залежно від швидкості випробувань має кераміка SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂.

Величина зношування цього матеріалу у разі швидкості 2 м/с становить 21 мкм/км, а у разі швидкості 7 м/с зменшується до 4 мкм/км. Коефіцієнти тертя для цього матеріалу в досліджених режимах зменшуються з 0,31 до 0,21.

Випробування матеріалів за постійної швидкості та різних навантажень показали, що зі збільшенням навантаження інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя збільшуються для всіх складів (рис. 3, в, з).

Найбільш інтенсивно зношується матеріал SiC – 20% Al₂O₃. За навантаження 1 МПа зношування цього матеріалу становить 13 мкм/км, а зі збільшенням навантаження до 7 МПа збільшується до 24 мкм/км.

Коефіцієнт тертя в цьому разі також збільшувався з 0,37 до 0,47. В умовах великих навантажень матеріал працював як фрикційний. Зі збільшенням вмісту оксиду алюмінію до 50% у карбіді кремнію спостерігається значне підвищення триботехнічних характеристик, які за навантаження 7 МПа становлять $I = 13$ мкм/км, $f_T = 0,29$.

Найкращі триботехнічні характеристики залежно від навантаження (як і в полі швидкостей ковзання) має кераміка SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂. Значення величини зношування цього матеріалу за швидкості 1 МПа становить 2 мкм/км, а за швидкості 7 МПа зменшується до 6 мкм/км.

Коефіцієнти тертя для цього матеріалу в досліджених режимах змінюється з 0,2 до 0,22.

Таким чином, найвищі триботехнічні характеристики має кераміка складу 50% SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂.

Для пояснення отриманих результатів досліджено та проаналізовано доріжки тертя розроблених і випробуваних матеріалів.

Зовнішній вигляд поверхонь тертя досліджених за швидкості 7 м/с і тиску 5 МПа показано на рис. 4.

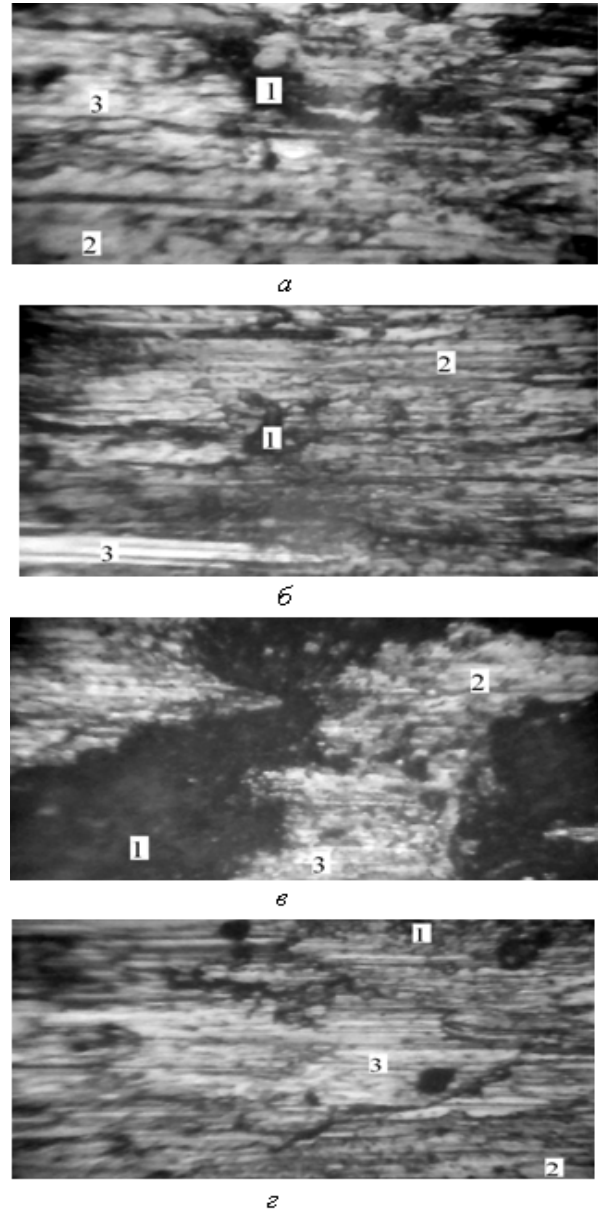


Рис. 4. Мікроструктура поверхонь тертя керамічних матеріалів $\times 500$:

а – 20% SiC – 80% Al₂O₃;

б – 50% SiC – 50% Al₂O₃;

в – 80% SiC – 20% Al₂O₃;

з – 50% SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂;

1 – карбід кремнію;

2 – оксидна зв'язка;

3 – ділянки масопереносу контртіла (сталь)

Кераміка складу 20% SiC – 80% Al₂O₃ має грубу текстуровану структуру оксиду алюмінію з вкрапленнями більших агрегатів карбіду кремнію, на якій помітні ділянки масоперенесення сталевого контртіла (рис. 4, а).

Поверхня тертя матеріалу складу 50% SiC – 50% Al₂O₃ має дрібнодисперсну текстуровану поверхню, що свідчить про високий рівень припрацювання до сталевого контртіла й оптимальної шорсткості контакту, а отже, і збільшені площі фактичного контакту. Також помітні ділянки масоперенесення сталевого контртіла (рис. 4, б).

Характерну острівкову структуру має поверхня тертя кераміки 80% складу SiC – 20% Al₂O₃ – це ділянки збагачені алюмінієвооксидною зв'язкою, а тому утворюють більш міцні зони, які міцно утримують частинки карбіду кремнію, у наслідок чого на них помітні рясні ділянки масоперенесення сталевого контртіла.

Ділянки, збіднені зв'язкою, мають незадовільну когезію і тому легко й інтенсивно зношуються (рис. 4, в).

Поверхня тертя кераміки 50% складу SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂ відрізняється дрібнодисперсною рівномірною текстурою вкраплень карбіду кремнію в двокомпонентній зв'язці, що зазнала трибомодифікацію.

Оскільки співвідношення зв'язки евтектичне, то вона легко пристосовується в результаті трибоактивації. Таким чином формується найбільш оптимальна поверхнева дрібнодисперсна структура, що відповідає оптимальній шорсткості та максимальній площі фактичного контакту, зміцнена включеннями карбіду кремнію і здатна локалізувати трибовзаємодію в тонкому поверхнево-му об'ємі матеріалу, не зношуючи при цьому інтенсивно контртіло, зношування якого у всіх випадках не перевищувало 10 мкм/км.

Висновки

Розроблено нові керамічні матеріали на основі карбіду кремнію та досліджено кінетику їх ущільнення і вплив її на структуру отриманих матеріалів. Установлено, що введення в карбід кремнію керамічної зв'язки оксиду алюмінію знижує температуру пресування, пористість і підвищує триботехнічні властивості матеріалів на основі карбіду кремнію. Розроблені матеріали випробувано в умовах сухого тертя.

Найкращі триботехнічні властивості в ділянці низьких швидкостей ковзання має матеріал складу 50% SiC – 50% Al₂O₃, а в ділянці високих швидкостей – 50% SiC – 34% Al₂O₃ – 16% ZrO₂.

Дослідження поверхні тертя матеріалів показали, що вони мають дрібнодисперсну структуру, яка позитивно впливає на фізико-механічні властивості матеріалів.

Література

1. *Торцовые уплотнения аппаратов химических производств* / Г.В. Антипин, М.Т. Банников, А.Д. Домашнев и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 112 с.
2. *Комиссар А.Г. Уплотнительные устройства опор качения: справ.* / А.Г. Комиссар. – М.: Машиностроение, 1980. – 192 с.
3. *Мельник В.А. Торцевые уплотнения валов: справ.* / В.А. Мельник. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
4. *Карбид кремния* / С.А. Добролеж, М.М. Зубкова, В.А. Кравец и др. – К.: Изд-во техн. лит., 1963. – 315 с.
5. *Комплекс машин і методики визначення антифрикційних властивостей матеріалів при терті-ковзанні* / Є.Т. Мамикін, М.К. Ковпак, А.І. Юга та ін. // Порошкова металургія. – 1973. – №1. – С. 67–72.