

Л. Б. Приймак, А. Г. Довгаль*, В. В. Варюхно

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

*kalibr201@ukr.net

**Дослідження зносостійкості
нових композиційних матеріалів
на основі оксиду алюмінію спеціального
триботехнічного призначення**

Досліджено структуру та базові механічні властивості композиційного матеріалу на основі корунду легованого частинками графіту. Вивчено триботехнічну поведінку отриманого композита в умовах сухого тертя у парі з конструкційною сталлю 45 за високонавантаженого трибоконтакту за низьких швидкостей ковзання. Визначено значення інтенсивності зношування та коефіцієнтів тертя для отриманого матеріалу. Досліджено поверхні тертя та визначено механізми зношування отриманого матеріалу. Обґрунтовано перспективність застосування вказаного матеріалу для фрикційних сполучень, що працюють в умовах агресивних середовищ та не вимагають мащення.

Ключові слова: композиційний матеріал, кераміка, структура, зернистість, зносостійкість, механізм зношування.

ВСТУП

Сучасні методи порошкової металургії дозволяють отримувати композиційні матеріали з заданим широким спектром фізико-механічних властивостей, варіюючи складом та технологічними особливостями отримання матеріалу. Наявність технічного завдання, а саме форми й умов роботи майбутньої деталі, та ресурсної бази конкретної географічної території можливо проектувати композиційний матеріал для конкретних умов експлуатації й серійного виробництва. Попередні дослідження у порошковій металургії стверджують, що кращі властивості має композиційний матеріал, складниками котрого є коштовні компоненти. Проте, вдаючись до наукових та технологічних заходів, можна отримувати високоміцні та зносостійкі матеріали з не коштовних компонентів. Також важливим є наявність компонентів для майбутнього матеріалу в ресурсній базі України. Тому для майбутнього композиційного матеріалу було обрано оксид алюмінію, що виготовляють із глинозему та який має ряд важливих технологічних властивостей, потрібних для виготовлення вузлів тертя. Тому дане дослідження присвячено вивченню особливостей структуроутворення та механізмів зношування композиційного матеріалу на основі оксиду алюмінію в умовах тертя високонавантажених вузлов підйомно-транспортних механізмів аеропортів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для отримання композиційного матеріалу триботехнічного призначення важливо враховувати передовий досвід структуроутворення та перелік властивостей, отриманих іншими дослідниками з подібних складників. Це важливо

насамперед для уникнення виявлених помилок і систематизації та вдосконалення технологічних режимів отримання матеріалу, а також для формулювання рекомендацій з отримання конкретних виробів для зазначених вузлів тертя. Так, у [1] отримували матеріал високотемпературного призначення для роботи до температури 1700 °С, виготовлений з компонентів електрокорунду та розплавленого муліту (сполука оксидів алюмінію та кремнію), відкрита пористість матеріалу складала ~ 16,5 %, а статична міцність на згин – 25 МПа.

Дослідниками [2] було отримано композиційну корундову кераміку для бронезахисту антен радіолокаторів. Композит отримували формуванням у сталевих формах з подальшим обпалюванням у печі за температури 1450 °С, а сам корунд легували кварцом та хромом, титаном та залізом, що у подальшому перетворювалися в оксиди. Маючи задовільну бронейістність, композит оптимізували за радіопрозорістю.

В [3] алундову кераміку використовували в робочому органі лізиметра для дослідження розчинності різних речовин у воді. Були визначені оптимальні характеристики алундових дисків для дослідження ґрунтових вод.

Було проведено фундаментальне дослідження [4] структури глиноземної кераміки, призначеної для електротехнічних цілей. Легування алундової кераміки оксидом магнію (0,25 % (за масою)) дозволило отримати кераміку із зернистістю 15–25 мкм та міцністю на згин 300 МПа. Введення добавки 1 % (за масою) евтектики $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2$ дозволило отримати кераміку із зернистістю 3–6 мкм та міцністю на згин 400 МПа. А високочистий глинозем фірми “Almatis” (Німеччина) вихідної зернистості < 1 мкм без добавок дозволив синтезувати кераміку зернистістю 2–3 мкм та міцністю на згин 290 МПа.

У [5] отримували оксидоалюмінієву кераміку, армовану ультрадисперсними частинками металевого нікелю в кількості 2,2 та 6,5 % (за об’ємом), також отримували оксидоалюмінієві композити з лігатурою алюмінідом нікелю (20 % (за об’ємом)) дисперсністю 0,5–0,9 мкм, що мали міцність на згинання 690 МПа. Отже, методом гарячого пресування було отримано високоміцні композити, що одночасно відрізнялися і високою зносостійкістю, тобто можливістю застосування їх для триботехнічного призначення.

Змочування графіту розплавам на основі алюмінію та оксиду алюмінію досліджували в [6]. Встановлено, що не існує міжфазної взаємодії графіту ні з металевим алюмінієм, ні з оксидом алюмінію, а тому можливе лише створення їхніх механічних сумішей з графітом.

Було досліджено [7] балістичні властивості оксидоалюмінієвої кераміки. Армовану оксидоалюмінієву кераміку з 92, 96 і 99 % (за масою) оксиду алюмінію пресували та спікали впродовж 6 год за температури 1600 °С. Міцність на згин варіювала в межах від 210 до 300 МПа. У результаті балістичних випробувань було визначено, що кераміка із 92 % (за масою) оксиду алюмінію витримує без пошкоджень влучання кулі калібром 7,62 мм, що дозволило рекомендувати її у якості панцирного захисту.

У [8] було отримано оксидоалюмінієву кераміку методом кальцинування сульфідів алюмінію, одержаного в результаті розчинення бруксового алюмінію у сірчаній кислоті. Досліджено структуру отриманої кераміки та встановлено, що вона має переважно корундовий склад.

Фізичні та механічні властивості оксидоалюмінієвої кераміки досліджено в [9], зокрема, встановлено прямий зв’язок між складом та фізичними, електричними, термічними та механічними властивостями оксидоалюмінієвої кераміки.

Отже, оксидоалюмінієву кераміку давно та ретельно досліджують у багатьох країнах світу для використання в найрізноманітніших царинах, проте нау-

ковий інтерес викликає застосування оксидоалюмінієвої кераміки для втулок вузлів тертя високонавантажених підйимально-транспортних механізмів та маніпуляторів робототехніки завдяки такій важливій властивості, як постійний коефіцієнт тертя під час зміни швидкості ковзання (рух таких механізмів буде точний та плавний, як це потрібно біля повітряного судна в аеропорту).

Особливо важливе дослідження оксидоалюмінієвої кераміки для використання у вузлах тертя стрілових маніпуляторів машин протикригової обробки літаків [10], де звичайні вентильовані мащені вузли тертя піддаються впливу антикригової рідини, що розпилюють у просторі, тому розробка безсервісного (самозмащеного) композита дозволить виконати такі вузли тертя герметичними, а тому більш надійними та довговічними.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження було отримання зносостійкого та дрібнозернистого матеріалу на основі оксиду алюмінію для високонавантаженої безсервісної трибосистеми імпрегнованого графітом у якості твердого мастила трибосполучення, трибологічні випробування, визначення трибологічної сумісності та механізмів зношування отриманих матеріалів.

МЕТОДИКА І МАТЕРІАЛИ

Попередньо порошок оксиду алюмінію (ТУ 6-09-2486-77), середній розмір частинок якого складав 40–45 мкм, розмелювали в футерованих барабанах із алундовими розмельними тілами у планетарному млині Санд-1 у середовищі ацетону протягом 10 год до розміру шихти 5–10 мкм. Питома потужність розмельного обладнання планетарного млина Санд-1 складала 5 Вт/г. Отриману шихту сушили та просіювали через сито, потім у композицію додавали порошок графіту ГЛ-1 середнього розміру 3–5 мкм (ГОСТ 5279-74) у концентрації $Al_2O_3-5\%C^1$ та ретельно перемішували на рольганговому млині у ємності місткістю 1 л звичайної конструкції протягом 20–30 год до рівномірного розподілу компонентів шихти. Питома потужність розмельного обладнання рольгангового млина складала 1,2 Вт/г.

Гаряче пресування кераміки здійснювали на установці СПД-120 з індукційним нагріванням без захисної атмосфери. Шихту порошоків засипали в прес-форму з високоміцного графіту марки МПГ-7. Робочі поверхні прес-форми попередньо змащували нітридом бору для запобігання взаємодії між матеріалом, що пресується, і графітом. Нагрівання здійснювали зі швидкістю 100 °С/хв. Під час гарячого пресування безперервно фіксували усадку за допомогою мікрометричного індикатора, механічно з'єданого з важелем плити преса. Навантаження прикладали за температури 800 °С. Повну усадку кераміки $Al_2O_3-5\%C$ відбувалося протягом 5 хв за температури 1700–1750 °С, навантаження складало 25 МПа. Керамічні зразки складу $Al_2O_3-5\%C$ пресували у вигляді паралелепіпедів розміром 6×6×36 мм для випробувань на міцність та трибовипробувань, а також диска Ø 90 мм, $h = 10$ мм для контртіла машини тертя. Температуру під час гарячого пресування контролювали оптичним пірометром “Промінь”. Отримані зразки шліфували на площинно-шліфувальному станку алмазними кругами.

Зразки матеріалу $Al_2O_3-5\%C$ пресували за температур 1700–1750 °С і максимального тиску 25–30 МПа, варіюючи вміст графіту від 2 до 10 % для вивчення впливу концентрації графіту на структуру та властивості композита.

¹ Тут і далі склад графіту наведено в % (за масою).

Для дослідження структури і фазового складу кераміки на основі Al_2O_3 –5 %С, а також поверхонь їх тертя проводили металографічний (МГ), рентгенофазовий (РФ) і мікрорентгеноспектральний (МРС) аналізи. МГ аналіз досліджуваних матеріалів проводили на оптичних мікроскопах МИМ-8 і Неофот.

РФ аналіз зразків виконували на рентгенівських дифрактометрах ДРОН-2.0 і ДРОН-3.0 в $\text{CuK}\alpha$ -випромінненні.

Для дослідженні структури, фазового складу, а також розподілу і складу елементів в кожній із фаз кераміки використовували МРС аналіз на мікроаналізаторі електронного мікроскопу Сатеса SX-50.

Дослідження процесу зношування кераміки Al_2O_3 –5 %С з різними домішками графіту в умовах тертя ковзання без мастильних матеріалів проводили на допрацьованій установці “Шліф” по торцевій схемі площина–площина, конструкція якої дозволяє визначати в процесі експерименту коефіцієнт тертя.

Ваговий знос визначали на аналітичних терезах ВЛР-200. Далі по ваговому зносу визначали лінійний знос за формулою

$$I = 10^{-4} \frac{\Delta m}{S\rho}, \text{ мкм/км,}$$

де Δm – ваговий знос зразків, г/км; S – площа тертя зразка, см^2 ; ρ – густина зразка, г/см^3 .

Випробування проводили за швидкостей ковзання 0,1–0,2 м/с і навантаження 20–60 МПа, що моделюють роботу шарнірів підйнятно-транспортних механізмів аеропортів.

Використовували два варіанти контртіла – сталеве (загартована сталь 45 HRC 60–64), що використовують у якості корпусного елемента шарнірів, і керамічне з композита Al_2O_3 –5 %С. Така схема випробувань дозволяє моделювати два варіанти компоновки шарніру: кераміка–сталь і кераміка–кераміка.

Значення основних параметрів визначали після завершення процесу припрацювання до стабілізації коефіцієнта тертя і вагового зносу пари тертя. В процесі експерименту випробовували 3–5 зразків, а остаточні параметри визначали як середнє з отриманих значень. Довжина шляху під час випробування складала 1 км. Для матеріалів, у яких знос був < 5 мкм/км, довжина шляху дорівнювала 10 км, а знос на 1 км визначали як десяту частину від сумарного зносу, проте вважали, що всі 10 км зразок зношувався рівномірно.

Мікротвердість компактних зразків, а також покриттів вимірювали за допомогою приладу ПМТ-3 втискуванням алмазної піраміди в поліровану поверхню шліфа за навантаження 0,1 Н.

Твердість зразків за Роквеллом вимірювали за допомогою приладу ТК-2 (ГОСТ 3882–74) втискуванням алмазного індентора за навантаження $P = 60$ кгс (шкала HRA).

Визначення міцності на згинання проводили на установці AS-102 згідно з ГОСТ 18228–72. Для випробувань використовували гарячепресовані зразки розміром $6 \times 6 \times 36$ мм. Швидкість навантаження складала 6 мм/с.

Границю міцності під час згинання розраховували за формулою

$$\sigma_{зг} = \frac{3Pl}{2a^3},$$

де P – навантаження під час руйнування, Н; l – відстань між опорами, мм; a – ширина зразка, мм.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Загальну морфологію композита Al_2O_3 -5 %C наведено на рис. 1 зі збільшенням $\times 200$, $\times 500$ і $\times 1000$. Із першої світлини (див. рис. 1, *a*) можна зробити висновок, що структура композита є дрібнозернистою та рівномірною без суттєвих відхилень та скупчень концентрації компонентів.

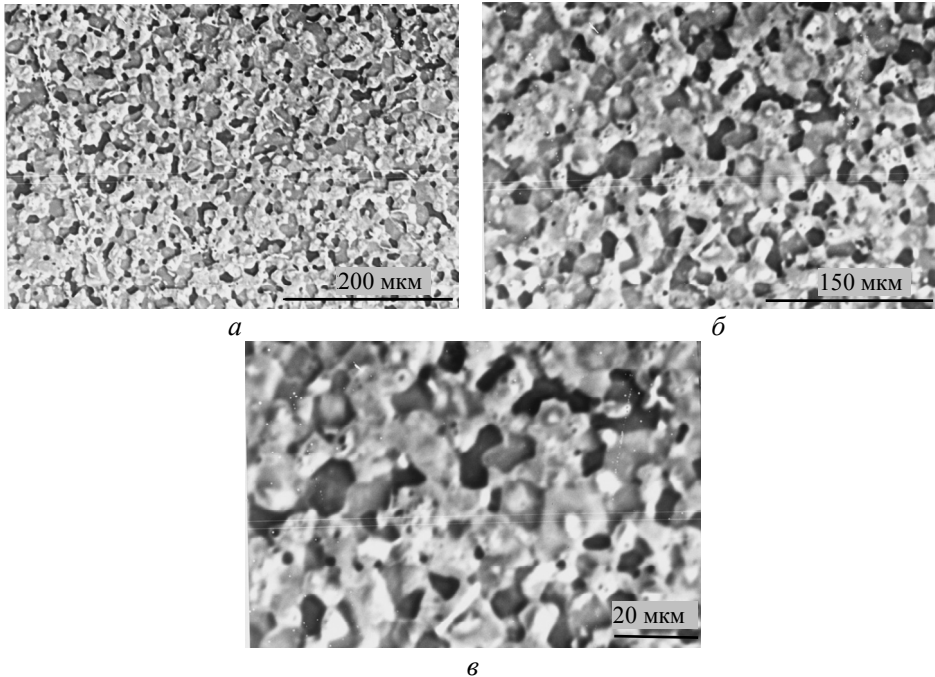


Рис. 1. Мікроструктура отриманих зразків системи Al_2O_3 -C за збільшення $\times 200$ (*a*), $\times 500$ (*b*), $\times 1000$ (*v*).

Друга світлина за збільшення $\times 500$ (див. рис. 1, *b*) дозволяє розділити кольоровий контраст трьох типів фаз, зокрема світло-сірої, темно-сірої та чорної. Третя світлина (див. рис. 1, *v*) дозволяє визначити розмір фаз: сірі та світло-сірі фази не перевищують 5–10 мкм, а темні – 10–20 мкм. Для вивчення вмісту фаз було проведено поелементний МРС аналіз уздовж лінії, що перетинає характерні фази за збільшення $\times 200$ (рис. 2, *a*), результати якого наведено на рис. 2, *b–г*.

Отже, можна зробити висновки, що темні фази є фазами графіту, про це свідчить розподіл вуглецю (див. рис. 2, *a, г*), а сірі та світло-сірі фази є фазами на основі алюмінію та кисню, про це свідчать спектри рис. 2, *б і в*, але не відомо якого стехіометричного та алотропічного походження. Для цього було проведено РФ аналіз та визначено наявність у композиті фаз вуглецю гексагональної ґратки та двох політипів оксиду алюмінію: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – корунд гексагональної ґратки, та $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ – кубічної ґратки. Розмір зерен композиційного матеріалу варіюється в межах від 5 до 10 мкм.

Для визначення триботехнічних характеристик цих композитів було проведено триботехнічні випробування в умовах, що моделюють роботу шарнірних з'єднань підіймачів на раніше згаданому обладнанні у парі з керамічним та сталевим контртілом в залежності від навантаження за постійної швидкості ковзання 0,2 м/с (рис. 3).

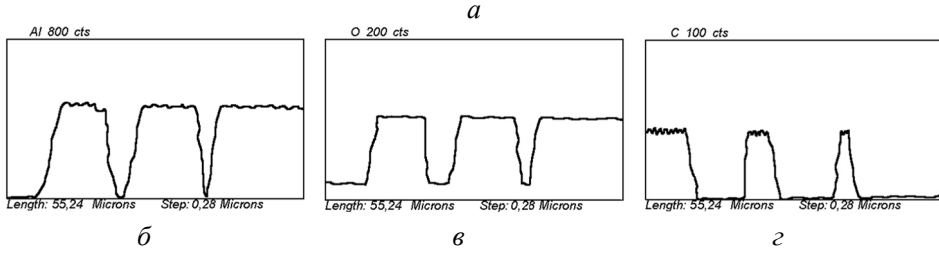
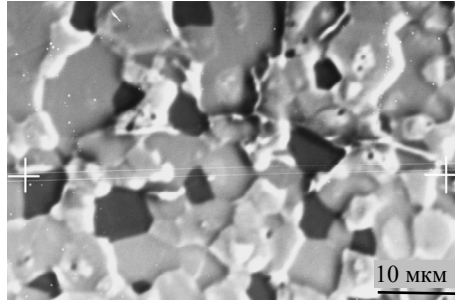


Рис. 2. Мікроструктура отриманих зразків системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ (а) та розподіл у ній алюмінію (б), кисню (в), вуглецю (з).

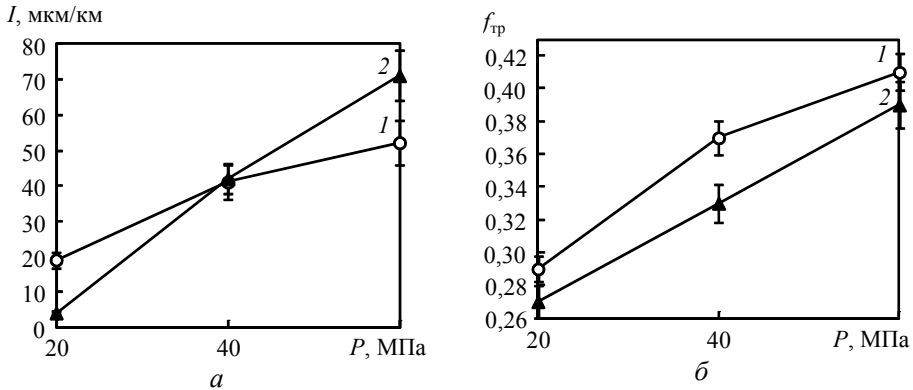


Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування (а) та коефіцієнта тертя (б) від навантаження: 1 – по сталевому контртілу (загартована сталь 45); 2 – по керамічному контртілу ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-5\%C}$).

Отже, зі збільшенням навантаження від 20 до 60 МПа по сталевому контртілу інтенсивність зношування зростала від 19,2 до 52,3 мкм/км, а по керамічному контртілу – від 4,2 до 71,2 мкм/км (рис. 3, а). Коефіцієнти тертя по сталевому контртілу зростали від 0,29 до 0,41, а по керамічному – від 0,27 до 0,39 (рис. 3, б), що свідчить, що композит в діапазоні експлуатаційних навантажень буде працювати в антифрикційному діапазоні. Для пояснення отриманих результатів та встановлення механізмів зношування було проведено МГ та МРС аналізи поверхонь тертя. Результати такого аналізу за навантаження 60 МПа та за збільшення $\times 200$ наведено на рис. 4.

Отже, по керамічному контртілу (див. рис. 4, а) поверхня тертя має дрібнодисперговану структуру з характерним виступами, що спостерігали у верхньому куті зліва, у центрі та у середній частині справа. Очевидно, що основне трибонавантаження було направлено на ці ділянки.

По сталевому контртілу (див. рис. 4, б) поверхня тертя має характерну лускату морфологію. Водночас ліворуч спостерігали ділянку вигладжених ліній ковзання на кшталт суцільної плівки, а праворуч – лускату поверхню сколювання.

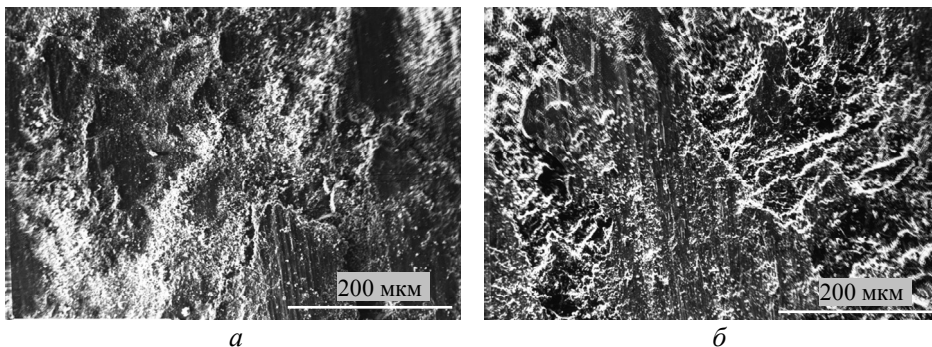


Рис. 4. Електронні зображення поверхонь тертя композита системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ по керамічному (а) і сталевому (б) контртілі.

Для встановлення механізмів зношування вказаних композитів з метою оптимізації складу та технології отримання було проведено МРС аналіз цих поверхонь тертя за збільшення $\times 1000$. Світлини поверхонь тертя наведено на рис. 5, а та б, а результати такого аналізу наведено на рис. 5, в–е.

Отже, по керамічному контртілі (див. рис. 5, а) у вершинах трибоконтакту знаходяться часточки графіту, про що свідчить МРС аналіз (див. рис. 5, д, ліворуч), решта поверхні тертя – це є диспергована суміш оксиду алюмінію та вуглецю (рис. 5, в–д, ліворуч). По сталевому контртілі (рис. 5, б) поверхня тертя складається із двох ділянок: суцільної плівки (ліворуч) та ділянки сколювання (праворуч). Про склад суцільної плівки дає уявлення МРС аналіз – це суміш оксидів заліза, що переноситься із контртіла, та алюмінію (див. рис. 5, в, г, е), вкритий незначним шаром вуглецю (рис. 5, д). Ділянка сколювання розділяється на окремі зерна оксиду алюмінію, графіту та заліза (рис. 5, в–е).

Отже, можна констатувати, що під час тертя розробленого композита системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-5 \% C}$ по керамічному контртілі реалізується абразивний механізм зношування, включення графіту відіграють роль твердого мастила, а під час тертя по сталевому контртілі зароджуються ділянки окиснювального зношування, які за великих навантажень плівки є вкрай нестійкими та сколюються з поверхні. Збільшення вмісту графіту у композиті неможливо через зниження механічних властивостей композита.

ВИСНОВКИ

Розроблено новий композиційний матеріал на основі оксиду алюмінію з домішкою 5 % графіту, сировина для якого є в ресурсній базі України (глинозем і графіт).

За допомогою вивчення мікроструктури та механізму зношування розробленого матеріалу методами скануючої електронної мікроскопії встановлено, що графіт сприяє перерозподілу теплових потоків у процесі гарячого пресування та формує дрібнозернисту структуру алундового композита, і це не лише зменшує знос сталевому контртіла, але і забезпечує високі фізико-механічні властивості композита.

Дослідження механізму зношування розробленого матеріалу для встановлення умов його трибосумісності у парі тертя як зі сталевим, так із керамічним контртілом, показало позитивний вплив графіту на антифрикційні властивості композита: коефіцієнт тертя дорівнював 0,27–0,4. Це дозволяє висунути гіпотезу про безсервісність трибосистеми, що не потребуватиме мащення (хоча тривалих дослідів наразі не проводили).

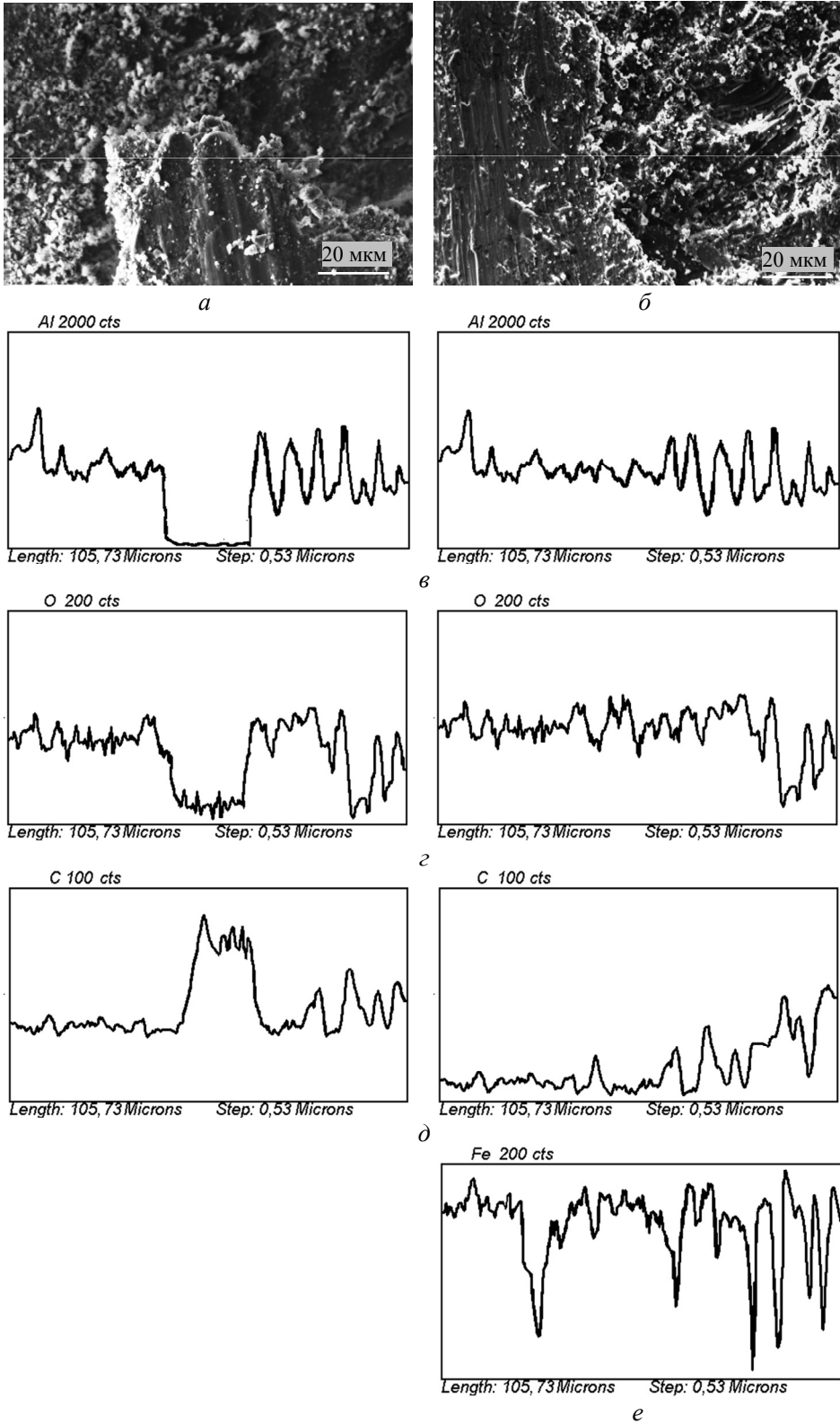


Рис. 5. Електронні зображення поверхонь тертя композита системи Al_2O_3 -5%С по керамічному (*a*) і сталевому (*б*) контртілі та розподіл хімічних елементів: алюмінію (*в*), кисню (*г*), вуглецю (*д*), заліза (*е*).

Рівень зносостійкості композита показав задовільні показники щодо їх застосування – 52,3–71,2 мкм/км.

L. B. Pryimak, A. H. Dovhal, V. V. Varijukhno

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Wear resistance research of the new composition materials
made of alumina intended for specific tribotechnical application

The structure and main mechanic proerties of composition material made of corundum alloyed by graphite particles. Tribotechnical properties of the acquired composition material within the conditions of dry friction with steel 45in highly loaded friction contact have been investigated. Values of wear rates and friction factors have been detected. Features of friction surfaces and regularities of wear mechanisms have been researched. Prominent application of material researched for friction joints working in aggressive environments without lubricants is justified.

Keywords: composition material, ceramics, structure, granularity, wear resistance, wear mechanism.

1. Храновская Т.М., Саванина Н.Н., Рогов Г.К. Практическое использование корундомул-литового огнеупорного материала. Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов. *Тез. докл. XVIII Междунар. науч.-техн. конф.* 23–25 окт. 2007 г. Обнинск, 2007. С. 31.
2. Голдин Б.А., Рябков Ю.И., Секушин Н.А. СВЧ-спектроскопия корундовой керамики, легированной Cr, Ti, Fe, в диапазоне частот 8–26 ГГц. Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов. *Тез. докл. XVIII Междунар. науч.-техн. конф.* 23–25 окт. 2007 г. Обнинск: 2007. С. 43.
3. Neary A.J., Touassurn F. Preparation of alundum/ceramic plate tension lysimeters for soil water collection. *Can. J. Soil Sci.* 1985. Vol. 65. P. 169–177.
4. Ануфриева Е.В., Лукин Е.С. Высокоплотная корундовая керамика для электронной техники. Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов. *Тез. докл. XVIII Междунар. науч.-техн. конф.* 23–25 окт. 2007 г. Обнинск: 2007. С. 65.
5. Евдокимов В.Ю., Овсянников Н.А., Чернявский А.С., Тютюкова Ю.Б., Гнидаш С.В., Баринов С.М. Разработка композиционных материалов с алюмооксидной матрицей и дисперсными металлическими частицами. Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов. *Тез. докл. XVIII Междунар. науч.-техн. конф.* 23–25 окт. 2007 г. Обнинск: 2007. С. 113.
6. Верховлюк А.М., Беспальый А.А., Железняк А.В. Смачивание графитов расплавами на основе алюминия. *Материалы Междунар. науч.-практ. конф. “Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейной индустрии”.* 19–21 окт. 2010 г. Украина, Киев Форум. С. 30.
7. Silva M.V., Stainer D., Al-Qureshi H.A., Montedo O.R.K., Hotza D. Alumina-based ceramics for armor application: mechanical characterization and ballistic testing. *Hindawi Publishing Corporation. J. Ceramics.* 2014. Vol. 1. P. 1–6.
8. Khamirul A.M., Loy C.W., Mansor H., Ismayadi I., Mohd H., Mohd Z. Phase transformations of α -alumina made from waste aluminum via a precipitation technique int. *J. Mol. Sci.* 2012. Vol. 13. P. 16812–16821.
9. Pertti A. Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics. *Technical Research Center of Finland. Espoo,* 1996. 26 p.
10. Danilejko O.V. Lifetime prolongation of highly loaded hinges of airport hoisting gears using the new composition materials. *Polit 2019. Modern Challenges of Science. XIX Int. Sci. and Practical Conf. Young Scientists and Students. Paper of Theses.* April 3–5, 2019. Kyiv: 2019. P. 1–2.

Надійшла до редакції 08.12.21

Після доопрацювання 10.01.22

Прийнята до опублікування 11.01.22