

УДК 620.193.16

О. І. НЕКОЗ, О. А. ЛИТВИНЕНКО, Д. В. РИНДЮК, В. П. КАВУН

*Національний університет харчових технологій, Україна*

## **ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОРУНДОВОЇ КЕРАМІКИ ДЛЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ КАВІТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ**

*В статті наведено результати експериментальних досліджень кавітаційної зносостійкості корундової кераміки. Встановлено, що швидкість зношування визначається вмістом оксиду алюмінію та інтенсивністю мікроударного навантаження. Корундова кераміка може використовуватись для виготовлення робочих органів гідродинамічних кавітаційних апаратів (ГКА).*

**Ключові слова:** *гідродинамічні кавітаційні апарати, корундова кераміка, оксид алюмінію, кавітація, зносостійкість.*

**Вступ та постановка задачі досліджень.** Для виготовлення робочих органів ГКА важливим є вибір зносостійких конструкційних матеріалів, оскільки традиційні матеріали мають недостатню зносостійкість і обмежений ресурс роботи. У зв'язку з цим заслуговує на увагу використання керамічних матеріалів на основі оксидів алюмінію ( $Al_2O_3$ ). У літературних джерелах дані про їх кавітаційне зношування обмежені. Через це важливе практичне значення мають дослідження кавітаційно-ерозійної стійкості та закономірностей зношування кераміки.

**Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем.** Для харчової промисловості фірма «Ceramag» (Німеччина) виготовляє деталі різноманітного призначення з практично чистого  $Al_2O_3$ . Їх використання крім високих технологічних показників виключає перебіг корозійних процесів та забезпечує високий рівень санітарно-гігієнічного стану обладнання [1]. В [2] запропоновано вибирати кераміку для клапанів гомогенізаторів. Наприклад, зразок із спеченої кераміки на основі  $Al_2O_3$  мав незначні пошкодження після 1000 год експлуатації. Корундова кераміка на основі оксиду алюмінію стійка в умовах гідроабразивного зношування, перевищуючи за показниками довговічності корозійностійкі нержавіючі сталі [3]. В [4] встановлено, що в керамічних матеріалах, як і в металах, внаслідок ударно-хвильової дії кавітаційних бульбашок виникають пружні деформації, які спричиняють виникнення поверхневих тріщин та їх поступове руйнування [5]. Експериментальні дослідження кавітаційного зношування зразків з керамічних матеріалів внаслідок їхнього руйнування під дією ультразвукової кавітації показують, що за зносостійкістю вони не поступаються традиційним конструкційним матеріалам [6]. Кераміка з вмістом  $Al_2O_3$  понад 95 % є корундовою з практично повною відсутністю муліту. В матеріалах такого типу фазовий склад містить корунд і склоподібні включення, які утворюються при охолодженні суміші [7], повністю відсутня пластична деформація і крихкий характер її руйнування є найбільш типовим. Залежно від вмісту  $Al_2O_3$  в керамічній композиції та співвідношення складових розрізняють мулітову, мулітокорундову та корундову кераміку, що визначає їх різні фізико-механічні властивості, вплив яких на кавітаційну зносостійкість практично не досліджений.

**Методика досліджень та обговорення результатів.** Для визначення зносостійкості корундової кераміки використовували дослідну ультразвукову

установку на базі УЗДН-2Т. Магнітострикційний вібратор (МСВ) закріплювали в штативі з можливістю переміщення у вертикальному напрямку для регулювання зазору між концентратором МСВ і поверхнею зразка, який закріплювали в оправці. Оправку встановлювали в камері з водяною сорочкою для підтримання сталої температури середовища. Охолодження МСВ і встановлення частоти коливань його концентратора здійснювали через базову установку УЗДН-2Т.

Дослідження проводили при частоті коливань 22 і 44 кГц, амплітуді коливань концентратора МСВ 20 мкм. Зразки розміщували під концентратором на відстані 0,5 мм, яку контролювали за допомогою щупа. Як робоче середовище використовували водопровідну дегазовану відстояну воду, температуру якої підтримували  $20 \pm 1$  °С і контролювали лабораторним ртутним термометром ТЛ–2.

Інтенсивність зношування визначили ваговим методом за втратою маси зразків через фіксовані проміжки часу за допомогою лабораторних електронних вагів Radwag 210 з точністю до 0,0001 г. Перед зважуванням зразки попередньо послідовно промивали у дистильованій воді та спирті, просували при температурі 70...80 °С протягом 5 хв в термостаті ТС–80М2, охолоджували та зберігали в ексикаторі.

Зразки у вигляді циліндрів діаметром 10 мм і довжиною 18 мм для досліджень одержували з помеленого технічного глинозему, який є сумішшю оксиду алюмінію  $\alpha$ ,  $\beta$  та  $\gamma$  модифікацій [7]. Вихідний матеріал подрібнювали до 15...30 мкм на вібромліні, просіювали, змішували з близько 2% пластифікатора та піддавали пресуванню на гідравлічному пресі під тиском 3 т/см<sup>3</sup>. Після пресування зразки піддавали спіканню при температурі до 1500 °С. Таким методом можна одержувати вироби з точністю до  $\pm 0,1$  мм [9].

Вибраний тиск, як показали мікроскопічні спостереження, забезпечує відносно низьку пористість зразків, оскільки з її підвищенням характеристики міцності зразків знижуються внаслідок концентрації напружень навколо порожнистостей (пор) та зменшення контактної поверхні зерен [7]. Робочі поверхні зразків, відібраних для досліджень, шліфували.

Основні фізико – механічні характеристики досліджуваних зразків наведено в таблиці.

Таблиця

**Фізико – механічні характеристики досліджуваних зразків**

| Властивості                      | Одиниця вимірювання | Номер зразка |     |
|----------------------------------|---------------------|--------------|-----|
|                                  |                     | 1            | 2   |
| Вміст $\text{Al}_2\text{O}_3$    | мас %               | 99           | 96  |
| Густина                          | г/дм <sup>3</sup>   | 3,7          | 3,5 |
| Модуль пружності, $E \cdot 10^2$ | ГПа                 | 3,0          | 2,4 |
| Границя міцності на розтяг       | МПа                 | 300          | 280 |
| Ударна в'язкість                 | кДж/м <sup>2</sup>  | 4,0          | 4,0 |

Швидкість втрати маси зразків за час досліджень наведена на рис. 1, 2.

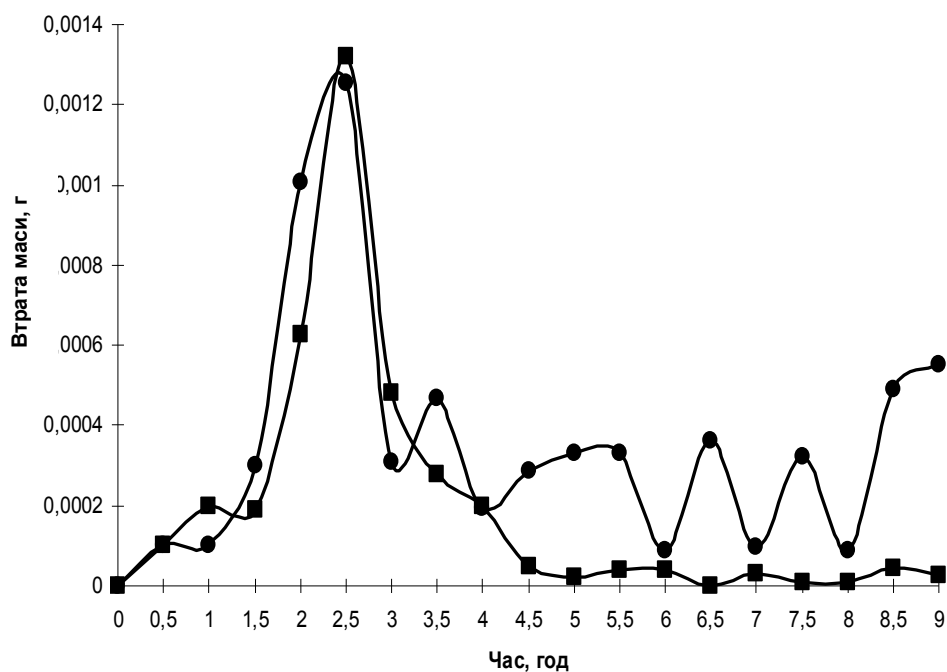


Рис. 1. Швидкість втрати маси зразків при частоті коливань МСВ 22 кГц:  
—●— зразок 1; —■— зразок 2

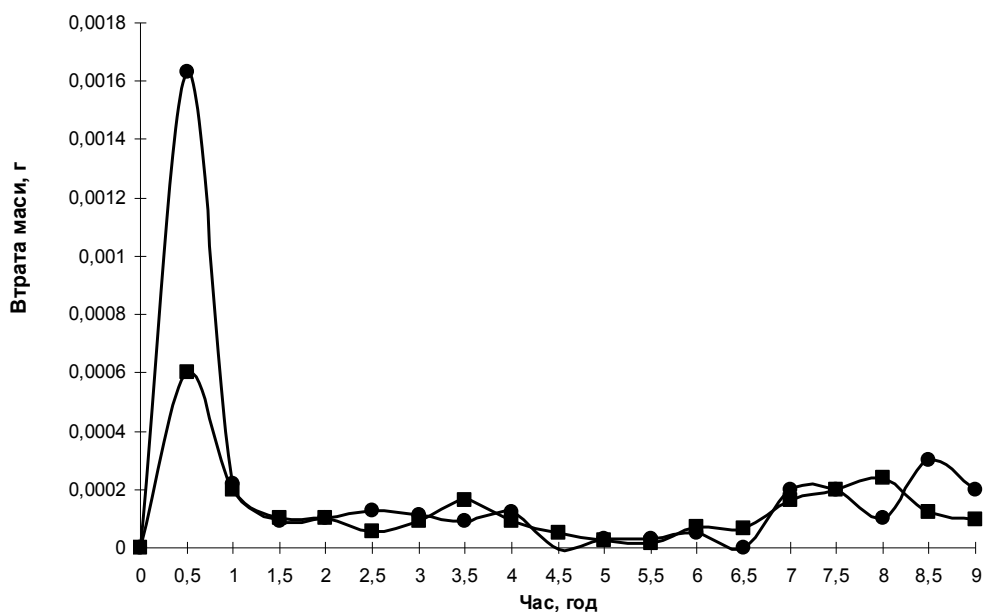


Рис. 2. Швидкість втрати маси зразків при частоті коливань МСВ 44 кГц:  
—●— зразок 1; —■— зразок 2

Треба відзначити, що при частоті коливань в 22 кГц за 9 год досліджень сумарна втрата маси зразком № 1 більша в 1,6 рази, ніж при частоті 44 кГц, а для зразка № 2 — відповідно в 1,5 рази. Це можна пояснити підвищеним вмістом оксиду алюмінію в досліджуваних зразках і однаковим показником ударної в'язкості, що можна вважати аналогом в'язкості руйнування. Варто зауважити,

що в умовах циклічного навантаження зовнішнє середовище іноді не впливає на швидкість росту втомлювальних тріщин [8]. Мікроскопічний аналіз показав, що руйнування зразків здійснюється переважно по склоподібній фазі, яка, як включення, міститься по границям зерен оксиду алюмінію. Досліджувані зразки, крім базового компоненту –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , містять включення, які впливають на їх фізико-механічні властивості та процес руйнування під дією колапсуючих кавітаційних бульбашок. Крім того, в керамічних матеріалах виникають дефекти структури – пори, тріщини, що визначається складом і технологією їх виготовлення. Включення в зразках впливають на їх експлуатаційні властивості, а дефекти структури (тріщини, пори) обумовлюються складом і технологією отримання зразків. Зокрема, при дослідженні впливу розміру зерен  $\text{Al}_2\text{O}_3$  встановлено, що оптимальними є розміри 30...200 мкм, які визначають тріщиностійкість (опір матеріалу поширенню тріщин) технічної кераміки. Водночас, якщо розмір зерна менший за оптимальний, певна кількість мікротріщин, що виникає при виготовленні, позитивно впливає на тріщиностійкість виробів, що загалом і визначає немонотонну залежність енергії руйнування від розміру зерна [10]. Зокрема, більша частина дефектів, переважно у вигляді мікротріщин виникає саме під час спікання та подальшого охолодження зразків. Ці мікротріщини будуть збільшуватись навіть при незначних навантаженнях і, відповідно до теорії А. Гриффітса, їх наявність як на зовнішній поверхні, так і в середині зразка, сприяє накопиченню концентрацій напружень [9], що приводить до збільшення розмірів тріщин і подальшого руйнування зразка. Згідно структурно-енергетичної теорії зношування [11], інтенсивність зношування матеріалів при динамічному навантаженні визначається відношенням щільності потоку енергії деформації (навантаження), яка вноситься в матеріал мікроударами кумулятивних мікрострумків чи абразивних часток до критичної щільності потужності деформації (руйнування)  $W_{кр}$ . Однак, як показали дослідження авторів для керамічних матеріалів потужність деформації визначається не лише складом і властивостями, а й структурою матеріалу і коефіцієнтом інтенсивності напружень  $K_{lc}$ .

Для корундової кераміки спостерігається циклічний характер зміни швидкості зношування протягом всієї тривалості випробувань, що засвідчує про циклічність розвитку актів поверхневого руйнування. Подібний характер зміни властивостей поверхневих шарів встановлено Л. І. Погодаєвим і при гідроабразивному зношуванні [11]. Висока ерозійна активність кумулятивних мікрострумків узгоджується з релаксаційною гіпотезою, відповідно до якої початкові ерозійні ушкодження виникають внаслідок ударно-хвильовій дії колапсуючих кавітаційних бульбашок, тривалість якої співставна з часом зсувної релаксації сил об'ємної в'язкості рідини  $(1...2) \cdot 10^{-7}$  сек. При цьому масу рідини, що взаємодіє з поверхнею, можна вважати твердим тілом [12, 13].

Ефективним способом аналізу процесу руйнування керамічних матеріалів різного типу є математичний аналіз і планування експерименту. Це дозволяє використовувати для оцінки зношування відомі методи математичної статистики і замінити фізичні експерименти (або їх частину) на чисельні. На підставі проведених розрахунків на рис. 3 наведена поверхня відгуку (поверхня рівняння регресії) зразків.

Аналіз характеру поверхні відгуку показує, що напрямом підвищення зносостійкості керамічних матеріалів є збільшення в їх складі вмісту оксиду алюмінію. При цьому інтенсивність ударно-хвильової дії на них суттєвого

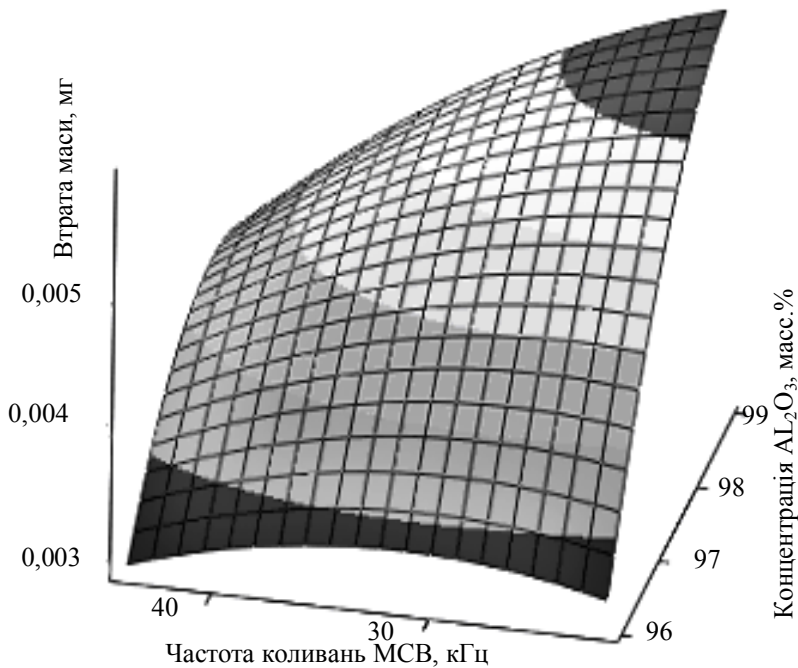


Рис. 3. Поверхня відгуку (поверхня рівняння регресії) зразків

значення не мають. Крім того, дослідження з використанням числових методів задовільно підтверджують результати фізичного моделювання.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень і аналізу одержаних результатів можна зробити висновки, що фізико-механічні, фізико-хімічні та експлуатаційні властивості корундової кераміки для виготовлення робочих органів ГКА визначаються вмістом  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та співвідношенням фазових складових, домішок та зв'язувальних компонентів, співвідношенням визначальних кристалічних фаз, розміром, формою та характером розподілу фазових складових, структурою та пористістю зразка (зі збільшенням пористості характеристики міцності зменшуються), величиною та щільністю розподілу пор, їх формою та розміщенням.

#### Список літератури

1. Hees, M. Verwirbelungen halten Keramik Sauber / Martin Hees // Ernährungsindustrie. – 2001. – № 6. Р. 64-65.
2. Lukasik K. Comparision of a selected materials for homogenizing valves / K. Lukasik // Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості : матер. VI Міжнар. наук. – техн. конф. 19-21 жовтня 1999 р. – К. : УДУХТ, 2000. – Ч. III. – С. 94.
3. Мельцер, А. М. Новый регулирующий клапан для гидроабразивных сред / А. М. Мельцер, В. А. Ананьевский, И. В. Кириченко // Арматуростроение. – 2006. – № 3(42). – С. 26-28.
4. Миличенко, С. Л. Особенности разрушения пластичных и хрупких материалов при кавитации / С. А. Миличенко, А. Г. Александров, И. В. Пиньковский // Пробл. прочности. – 1971. – № 2. – С. 117-119.
5. Пилиповский Ю. А. Композиционные материалы в машиностроении / Ю. А. Пилиповский, Т. В. Грудина, А. Б. Сапожников. – К. : Тэхника, 1990. – 141 с.

6. Коваленко, В. И. Разрушение керамики при воздействии кавитации / Коваленко В. И., Маринин В. Г. – Харьков, ХФТИ АН УССР, 1988. – 7 с. (Препр. ХФТИ АН УССР, № 88 – 65).
7. Балкевич В. Л. Техническая керамика / В. Л. Балкевич. – М. : Стройиздат, 1984. – 256 с.
8. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М. : Наука, 1974. – 640 с.
9. Кингери У. Введение в керамику / Уильям Кингери, пер. с англ. А. И. Рябухина, под ред. П. П. Будникова, Д. Н. Полубояринова. – М. : Стройиздат, 1964. – 534 с.
10. Rise R. W. The fracture toughness of ceramics / R. W. Rise, S. W. Freiman, P. E. Becher // J. Am. Ceram. Soc. – 1971. – Vol. 64. - № 6. – P. 345-354.
11. Погодаев Л. И. Структурно-энергетические модели надёжности материалов и деталей машин / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин. – С.-Пб. : Академия транспорта РФ, 2006. – 608 с.
12. Шальнев, К. К. Релаксационная гипотеза кавитационной эрозии / К. К. Шальнев, С. П. Козырев // Докл. АН СССР, ОТФ. – 1972. – Т. 202. - № 5. – С. 1057-1060.
13. Козырев, С. П. Генезис кавитационного изнашивания / С. П. Козырев // Трение и износ. – 1980. – Т. I. - № 5. – С. 793-808.

Стаття надійшла до редакції 25.06.2014

*O. I. NEKOZ, O. A. LYTVYENKO, D. V. RYNDIUK, V. P. KAVUN*

#### **WEAR RESISTANCE CORUNDUM CERAMICS WORKING OF VEHICLES CAVITATION**

This paper presents the results of experimental studies of cavitation wear resistance corundum ceramics. It was established that the rate of wear determined by the content of aluminum oxide and intensity microshock load. Operational properties of ceramics are determined mainly by the content of  $Al_2O_3$ , the ratio of phase components. It is established that cavitation wear such waterjet. Alumina ceramics can be used for the manufacture of hydrodynamic cavitation devices (HCD).

**Keywords:** hydrodynamic cavitation devices, alumina ceramics, alumina, cavitation, wear.

**Некоз Олександр Іванович** – д-р. техн. наук, професор, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна.

**Литвиненко Олександр Анатолійович** – канд. техн. наук, доцент, докторант, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, тел.: +38 097 190 82 89, E-mail: litvinen@nuft.edu.ua.

**Риндюк Дмитро Вікторович** – канд. техн. наук, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна.

**Кавун Віталій Петрович** – Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, E-mail: kavun22@ukr.net.