

УДК620.193.16

О.А. Литвиненко, Б.С. Пащенко*Національний університет харчових технологій***ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КЕРАМІКИ ДЛЯ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ МЕМБРАН**

Наведено результати досліджень кераміки для фільтраційних мембран. Вивчали стійкість кераміки з вмістом 75 мас. % Al_2O_3 під дією ультразвукової кавітації при частоті 44 кГц. Встановлено поверхневий характер зносу внаслідок утворення мікротріщин. Втрата маси зразків має циклічний характер. Зношування зразків відбувається при накопиченні поверхневої енергії, а також її миттєвого вивільнення. Технічна кераміка на основі Al_2O_3 є зносостійким матеріалом. Встановлено, що характер зносостійкості кераміки подібний металам.

Ключові слова: зносостійкість кераміки, фільтрувальні мембрани, ультразвукова кавітація.

А.А. Литвиненко, Б.С.Пащенко*Национальный университет пищевых технологий***ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КЕРАМИКИ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН**

Приведены результаты исследований керамики для фильтрационных мембран. Изучали стойкость керамики с содержанием 75 мас. % Al_2O_3 под действием ультразвуковой кавитации при частоте 44 кГц. Установлен поверхностный характер износа вследствие образования микротрещин. Потеря массы образцов имеет циклический характер. Изнашивание образцов происходит при накоплении поверхностной энергии, а также её мгновенного высвобождения. Техническая керамика на основе Al_2O_3 является износостойким материалом. Установлено, что характер износостойкости керамики подобен металлам.

Ключевые слова: износостойкость керамики, фильтрующие мембраны, ультразвуковая кавитация.

A. Litvinenko, B. Pachshenko*National University of Food Technologies***CERAMIC RESISTANCE OF THE FILTERING MEMBRANES**

The article presents the results of experimental research of ceramics for filtration membranes. The cavitation-erosion resistance of ceramics with a content of 75 mass. % Al_2O_3 was researched. The experiments were performed under the influence of ultrasonic cavitation at a frequency of 44 kHz. The surface character of the wear of the specimens due to the formation of microcracks is established. It is shown that the mass loss of samples is of a cyclic nature. This confirms that the wear of the samples occurs with the accumulation of surface energy, as well as its instantaneous release. The results obtained are consistent with the model of brittle fracture A. Griffiths-J. Irvin, and L. Pogodaev structural-energy theory. It is shown that technical ceramics based on Al_2O_3 is a wear-resistant structural material. The nature of the wear resistance of ceramics is similar to metals was established.

Keywords : ceramic resistance, filtering membranes, ultrasonic cavitation.

Постановка проблеми. При обробленні рідкофазних продуктів різного призначення важливе місце посідає раціональний вибір конструкційних матеріалів технологічного обладнання. Однак, в окремих галузях промисловості до матеріалів висувають певні вимоги. Зокрема, в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості їх спектр обмежується жорсткими санітарно-гігієнічними вимогами. Це спонукає використовувати для виготовлення деталей або вузлів відповідного обладнання не тільки традиційні, але і перспективні конструкційні матеріали, зокрема, технічну кераміку на основі оксиду алюмінію. Водночас, її окремі фізико-механічні властивості (наприклад, кавітаційно-ерозійна стійкість) досліджені недостатньо, а дані літературних джерел обмежені або суперечливі.

Аналіз останніх результатів. Для виготовлення деталей устаткування важливим є вибір зносостійких конструкційних матеріалів. Металеві, полімерні і композитні матеріали характеризуються недостатньою зносостійкістю і мають обмежений ресурс роботи. У зв'язку з цим заслуговує на увагу використання кераміки, в т. ч. на основі оксидів алюмінію (Al_2O_3). Вони відзначаються високою твердістю і корозійною стійкістю в різноманітних технологічних середовищах. Наприклад, для харчової промисловості фірма «Cerabar» (Німеччина) виготовляє деталі різноманітного технологічного 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, в т. ч. при його безрозбірному митті [1]. Завдяки своїм фізико-механічним властивостям кераміка є перспективним конструкційним матеріалом для виготовлення робочих органів технологічного обладнання, які працюють в несприятливих умовах.

Наприклад, зразок із кераміки на основі Al_2O_3 мав незначні пошкодження після 1000 год експлуатації. Корундова кераміка на основі оксиду алюмінію, використана для виготовлення

регулювальних клапанів арматури в технологічних трубопроводах для транспортування корозійно-активних середовищ з вмістом твердої фази до 20 % в умовах гідроабразивного зношування, перевищує за показниками довговічності корозійностійкі нержавіючі сталі [2].

Таким чином, важливе практичне значення мають дослідження кавітаційно-ерозійної стійкості кераміки та закономірності її зношування.

Відомо, що в керамічних матеріалах внаслідок ударно-хвильової дії кавітаційних бульбашок виникають пружні деформації, які спричиняють виникнення поверхневих тріщин та їх поступове руйнування [3].

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 [4-7]. Зважаючи на технічно-економічні показники використання матеріалів на основі Al_2O_3 більш раціональне.

Постановка завдань. Авторами досліджувалась кавітаційно-ерозійна стійкість технічної кераміки з вмістом базового компоненту Al_2O_3 – 75 мас. % для виготовлення фільтраційних мембран, які використовуються при розділенні рідких продуктів в молокопереробній галузі. При певних швидкостях і тисках оброблюваного технологічного потоку можуть виникнути умови для утворення мікробульбашок. Їх захопування з утворенням кумулятивного мікрострумка обумовлює механічне руйнування поверхні мембран. Отже, дослідження кавітаційно-ерозійної стійкості керамічних матеріалів для їх виготовлення є актуальним.

Викладення основного матеріалу. Для експериментальних досліджень кавітаційно-ерозійної стійкості зразків кераміки для фільтраційних мембран авторами використовувалась установка УЗДН-2Т з магнітострикційним вібратором (рис. 1).

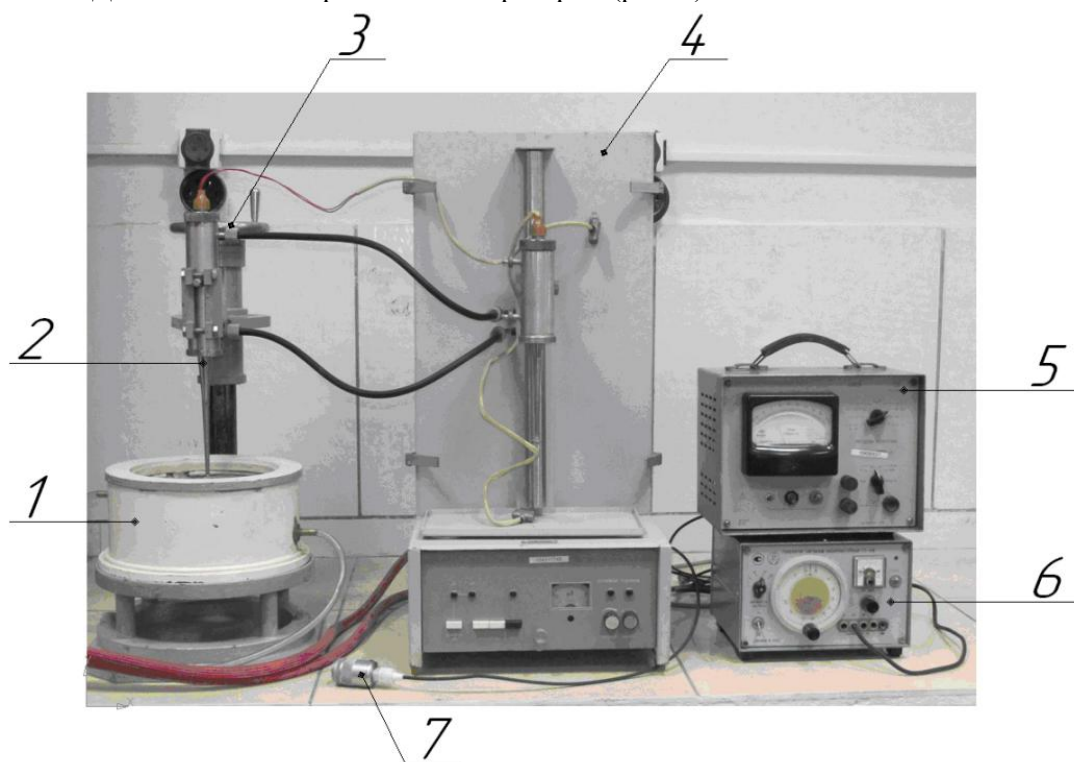


Рис. 1. Дослідна установка для вивчення зносостійкості зразків: 1 – смікоть з водяною сорочкою для розміщення дослідних зразків; 2 – магнітострикційний вібратор (МСВ); 3 – пристрій для переміщення МСВ; 4 – установка УЗДН-2Т; 5 – мілівольтметр; 6 – підсилювач; 7 – гідрофон

Дослідження проводили при частоті коливань 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 попередньо відстояну воду, температуру якої підтримували 20 ± 1 °С і контролювали лабораторним термометром ТЛ-2.

Інтенсивність зношування зразків визначили ваговим методом за втратою маси через фіксовані проміжки часу за допомогою лабораторних електронних вагів Radwag 210. Перед

зважуванням зразки попередньо промивали у дистильованій воді та спирті, просушували при температурі 70...80 °С протягом 5 хв в термостаті ТС-80М2, охолоджували та зберігали в екзикаторі. Для оцінювання структури керамічних матеріалів використовували мікроскоп РЕМ-200.

Одержані результати наведено на рис. 2.

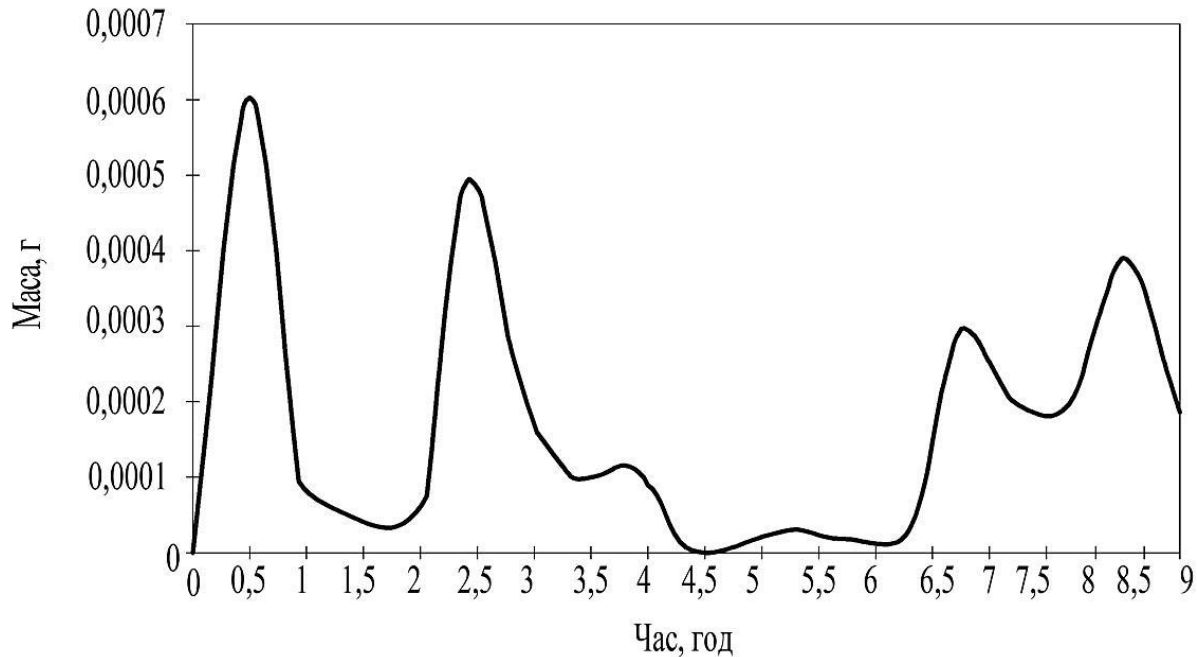


Рис. 2. Залежність швидкості втрати маси зразків з технічної кераміки при частоті коливань МСВ 44 кГц від часу досліджень

Аналіз одержаних результатів показує, що швидкість втрати маси зразків має стрибкоподібний характер, що свідчить про циклічність процесу руйнування від накопичування втомлювальних деформацій у поверхневих шарах до миттєвого руйнування їх мікрооб'єктів.

Зношування конструкційних матеріалів є складним процесом руйнування їх окремих структурних фрагментів і починається з мікро- та закінчується макротріщинами та подальшою втратою маси зразка. Цьому передують накопичення дефектів (мікротріщин), що визначається розмірами структурних складових матеріалу. Включення, наявні практично в усіх керамічних матеріалах, впливають на їх експлуатаційні властивості, а дефекти структури (тріщини, пори) обумовлюються складом і технологією отримання зразків. Зокрема, при дослідженні розміру зерен Al_2O_3 встановлено, що оптимальними їх розмірами є 30...200 мкм, які визначають тріщиностійкість (опір матеріалу поширенню тріщин) технічної кераміки. В однофазній оксидній кераміці з оптимальним дисперсним складом найбільш очевидно реалізується механізм міжзеренного руйнування, а в більш грубодисперсній кераміці макротріщина поширюється через тіло зерна, що ускладнює її використання для виготовлення деталей, які при експлуатації зазнають кавітаційного зношування [5].

Відповідно до теорії А. Гриффітса, тріщина в крихкому матеріалі починає збільшуватись, якщо швидкість вивільнення енергії пружних деформацій при її поширенні перевищує приріст поверхневої енергії матеріалу. Внаслідок цього навантаження P , зокрема від циклічної дії кумулятивних мікрострумків для зразка матеріалу може виявитись граничним P^* , причому, $P=P^*$, тобто зразок з тріщиною буде знаходитись в гранично-врівноваженому стані за умови:

$$d[U(\gamma, l) - W(P, l)]/dl \quad (1)$$

де $U(\gamma, l)$ – поверхнева енергія тріщини, залежна від щільності потоку енергії γ для утворення одиниці нової поверхні тіла в умовах проміжного стану, $W(P, l)$ – енергія пружних деформацій, обумовлена поширенням тріщини довжиною l при дії на матеріал зовнішніх імпульсів

навантажень P , зокрема внаслідок захоплення на поверхні зразків кавітаційних бульбашок з утворенням кумулятивних мікрострумків.

Висока ерозійна активність кумулятивних мікрострумків добре пояснюється релаксаційною гіпотезою К. Шальнева-С. Козирева, відповідно до якої початкові ерозійні ушкодження виникають при ударно-хвильовій дії колапсуючих кавітаційних бульбашок, тривалість якої співставна з часом зсувної релаксації сил об'ємної в'язкості рідини $(1...2) \cdot 10^{-7}$ с [6]. За таких умов масу рідини, що взаємодіє з поверхнею, можна вважати твердим тілом [7].

Авторами для визначення величини сили тиску P з використанням теореми імпульсів одержана залежність:

$$P(t) = \frac{kmv_1^3}{2} \quad (2)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, m – маса рідини, v_1 – початкова швидкість кумулятивного мікрострумка.

Враховуючи положення кумулятивно-релаксаційної гіпотези та відносну кількість бульбашок K , що захоплюються з утворенням кумулятивного мікрострумка, сила тиску P знаходиться за формулою:

$$P(t) = K \frac{k\rho V m v_1^3}{2g} \quad (3)$$

де V – об'єм рідини, діючої на поверхню, ρ – його густина.

Дж. Ірвіном в розвиток теорії А. Гриффітса запропонований критерій визначення початку поширення тріщини в деформованому твердому тілі K_I^* , за яким коефіцієнт інтенсивності напружень K_I в певній точці контуру тріщини в момент локального руйнування дорівнює постійній характеристиці тріщиностійкості матеріалу K_{IC} , тобто в'язкості його руйнування. Таким чином, критерій граничної рівноваги тіла з тріщиною можна записати у вигляді [8]:

$$K_I^* = K_I(P^*, l) = K_{IC} \quad (4)$$

де P^* – гранична величина зовнішнього навантаження P , при досягненні та перевищенні якого відбувається поширення тріщини.

Дж. Ірвіном була доведена еквівалентність критеріїв (1) і (4) в умовах крихкого руйнування.

Розрахункова модель Гриффітса-Ірвіна покладена в основу механіки руйнування твердих тіл [8]. В цьому випадку передбачається, що розміри ділянки проміжного стану в кінці утвореної тріщини є значно меншими, ніж її характерний розмір та досліджуваний зразок. Напружено-деформований стан визначають за допомогою методів і рішень лінійної теорії пружності та розраховують коефіцієнти інтенсивності напружень, а тріщиностійкість оцінюють експериментально за коефіцієнтом K_{IC} .

При цьому величина K_{IC} апроксимується складним поліномом третього ступеня від температури [9]. Також в конструкційних матеріалах поширення тріщин супроводжується виникненням локальних пластичних деформацій, внаслідок чого кожний критерій крихкого руйнування вважається критерієм ідеального крихкого руйнування, коли поверхнева енергія зразка визначається як щільність енергії руйнування в його поверхневому шарі [8].

Причому, щільність енергії руйнування в поверхневому шарі зразка співставна з критичною щільністю потужності деформацій відповідно до структурно-енергетичної теорії Л. Погодаєва, запропонованої для оцінювання зносостійкості металевих матеріалів [10].

Аналіз експериментальних результатів та мікрофотографій зруйнованих зразків свідчить про переважно сколювальний характер їх руйнування, ініційований циклічними імпульсами мікроударного навантаження. Очевидно, що при наявності початкових дефектів поверхневого шару керамічного матеріалу та ерозійних ушкоджень при його мікроударному навантаженні від мікрострумків колапсуючих кавітаційних бульбашок, по границям зерен корунду проходять втомлювальні тріщини, внаслідок яких і відбувається сколювання мікрооб'ємів поверхні.

Такий механізм зношування керамічних матеріалів задовільно узгоджується зі схемою квазістатичного руйнування, що включає виникнення мікроефектів, які є центрами руйнування, збільшення їх розмірів під дією розтягувально-стискних напружень, об'єднання сусідніх мікроефектів, відшарування матеріалу зразка. Сколювальне руйнування керамічних матеріалів

задовільно описується моделями на основі енергетичної теорії А. Грифітса або силової теорії Д. Ірвіна. Причому, критерієм інтенсивності руйнування є приблизна співставність енергії, накопиченої ударною хвилею внаслідок дії кумулятивного мікрострумка і питомої роботи відриву мікрооб'єму матеріалу з одиниці поверхні зразка.

Висновки. Результати проведених досліджень показують, що технічна кераміка на основі оксиду алюмінію є надійним конструкційним матеріалом для виготовлення фільтраційних мембран і проявляє високу кавітаційно-ерозійну стійкість, про що свідчать незначні втрати маси зразків за відносно тривалий період досліджень при інтенсивній ударно-ерозійній дії середовища на їх поверхню.

Як показали дослідження авторів, для керамічних матеріалів потужність деформації визначається не лише складом і властивостями, а й структурою, енергією активації окремих його складових стрибкоподібного розвитку дислокаційних мікротріщин та коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{IC} .

Характер швидкості втрати маси керамічних зразків подібний до гідроабразивного зношування зразків металевих матеріалів, що дозволяє припустити приблизно однотипний вид їх зношування і використовувати для опису руйнування технічної кераміки ті ж залежності, що і для металевих матеріалів.

Список використаних джерел:

1. Hees M. Verwirbelungen halten Keramik Sauber / Martin Hees // *Ernahrungsin dustrie/* - 2001. – № 6. – Р. 64-65.
2. 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.
3. Миличенко С. Л. Особенности разрушения пластичных и хрупких материалов при кавитации / С. А. Миличенко, А. Г. Александров, И. В. Пиньковский // *Проблемы прочности*. – 1971. – № 2. – С. 117-119.
4. Пащенко Б. С. Перспективні матеріали для фільтраційних мембран харчової промисловості / Б. С. Пащенко, Є. В. Штефан, О. А. Литвиненко. – К.: НУХТ, 2016. – В. 20. – 123-129 с. – (Харчова промисловість).
5. Коваленко В. И. Разрушение керамики при воздействии кавитации / Коваленко В. И., Маринин В. Г. – Харьков, ХФТИ АН УССР, 1988. – 7 с. (Препринт ХФТИ АН УССР, № 88-65).
6. Литвиненко О. А. Кавітаційна стійкість керамічних конструкційних матеріалів / О. А. Литвиненко, О. І. Некоз, В. М. Кавун // *Зб. наук. пр. ВАТ «УкрНДІ вогнетривів ім. А. С. Бережного»*. – 2010. – № 110. – С. 115–118.
7. Балкевич В. Л. Техническая керамика / В. Л. Балкевич. – М. : Стройиздат, 1984. – 256 с.
8. Шальнев К. К. Релаксационная гипотеза кавитационной эрозии / К. К. Шальнев, С. П. Козырев // *Доклады АН СССР, ОТФ*. – 1972. – Т. 202. – № 5. – С. 1057-1060.
9. Шальнев К. К. Параметры влияния на опыты с кавитационной эрозией в свете релаксационной гипотезы / К. К. Шальнев, С. П. Козырев, И. И. Варга, Д. Шебештьен // *Доклады АН СССР, ОТТ*. – 1974. – Т. 219. – № 6. – С. 1348-1351.
10. Панасюк В. В. О современных проблемах механики разрушения / В. В. Панасюк // *Физ. – хим. Механика материалов*. – 1982. – Т. 18. – № 2. – С. 7-27.
11. Андрейкив А. Е. Разрушение квазихрупких тел с трещинами при сложном напряженном состоянии / А. Е. Андрейкив. – К. : Наук. думка, 1979. – 139 с.
12. 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.

Рецензент:

Бовсуновський Анатолій Петрович, д.т.н., професор кафедри машинобудування, стандартизації та сертифікації обладнання Національного університету харчових технологій.

Стаття надійшла до редакції 23.03.2018