

Литвиненко О. А.

Кавун В. П.

Некоз О. І.

Риндюк Д. В.

**Національний
університет харчових
технологій**

Litvinenko O. A.

Kavun V. P.

Nekoz O. I.

Rindjuk D. V.

**National University of
Food Technologies**

УДК 620.193

**КАВІТАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ
МОДИФІКОВАНОЇ КЕРАМІКИ**

Анотація. Гідродинамічні кавітаційні апарати – це обладнання нового покоління. Для виготовлення їх робочих органів постійно використовувати кавітаційно-стійкі матеріали. Перспективним конструкційним матеріалом є кераміка на основі оксиду алюмінію. Покращити її властивості можна модифікацією різними добавками. Дослідження проводили на ультразвуковій кавітаційній установці. Стійкість матеріалів визначали за втратою маси зразків. Встановлено що модифікована кераміка за кавітаційною стійкістю не поступається зносостійким сталям. Через це кераміку можна рекомендувати як перспективний конструкційний матеріал для виготовлення кавітаційних апаратів.

Ключові слова: гідродинамічні кавітаційні апарати, кераміка, оксид алюмінію, ультразвук, модифікована кераміка.

Вступ. В харчовій, переробній та інших галузях аграрно-промислового комплексу завжди актуальною проблемою є інтенсифікація процесів оброблення сировини для одержання кінцевих продуктів високої якості при підвищенні глибини перероблення та зниженні питомих енерговитрат. Одними із напрямків вирішення цієї проблеми є вдосконалення традиційних виробничих та технологічних процесів шляхом розроблення нових, в т.ч. екологічно безпечних технологій та обладнання для їх реалізації, широке використання сучасних досягнень науки і техніки при заощадженні сировинних та паливно-енергетичних ресурсів. Такими технологіями та обладнанням є кавітаційні, які використовують ударно-хвильові ефекти, що супроводжують гідродинамічну кавітацію.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Для виготовлення робочих органів гідродинамічних кавітаційних апаратів (ГКА) важливим є оптимальний вибір конструкційних матеріалів, які працюють в умовах кавітаційно-ерозійного зношування. Металеві, полімерні і композитні матеріали характеризуються недостатньою зносостійкістю і мають обмежений ресурс роботи. У зв'язку з цим

заслугує на увагу використання керамічних матеріалів, в т.ч. на основі оксидів алюмінію (Al_2O_3). Вони відзначаються високою твердістю і корозійною стійкістю в різноманітних технологічних середовищах.

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 безрозмірній мийці [1]. Завдяки своїм фізико-механічним властивостям кераміка є перспективним конструкційним матеріалом для виготовлення робочих органів технологічного обладнання, які працюють в досить «жорстких» умовах.

Встановлено [2], що найбільш придатним матеріалом для клапанів гомогенізаторів є кераміка різних типів. Наприклад, зразок із спеченої кераміки на основі Al_2O_3 мав незначні пошкодження після 1000 годин експлуатації. Корундова кераміка на основі оксиду алюмінію стійка в умовах гідроабразивного зношування, перевищуючи за показниками довговічності корозійностійкі нержавіючі сталі 08X18H10T,

06X16H28МДТ, використана для виготовлення регульовальних клапанів арматури в трубопроводах для транспортування корозійно-активних середовищ з вмістом твердої фази до 20 % [3]. Спечена модифікована кераміка на основі Al_2O_3 з добавкою діоксиду цирконію має міцність на згин 150...300 МПа і може бути використана для виготовлення навантажених малогабаритних виробів [4]. В літературі є окремі дані про їх властивості за певних умов експлуатації [5,6]. Так, встановлено, що в керамічних матеріалах, як і в металах, внаслідок ударно-хвильової дії кавітаційних бульбашок виникають пружні деформації, які спричиняють виникнення поверхневих тріщин на поверхні 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 [7]. Найбільшу зносостійкість мають керамічні матеріали на основі карбїду бора, дещо меншу – на основі оксиду алюмінію Al_2O_3 [8]. Однак, зважаючи на технічно-економічні показники, використання матеріалів на основі Al_2O_3 більш раціональне, зокрема при виготовленні робочих органів ГКА.

Поліпшити характеристики фізико-механічні властивості кераміки можна їх модифікацією домішками MgO або ZrO_2 . Так, відомо [9], що введення ZrO_2 , який має високу хімічну інертність, пригальмовує ріст кристалів корунду, наприклад 0,5...1,0 % оксиду цирконію сприяє утворення кристалів не більше 15 мкм. На границях зерен корунду утворюються субмікронні прошарки сполук ZrO_2 та Al_2O_3 , причому, самі кристали набувають меншої форми та стають ізометрично досконаліми.

Мета досліджень. У крихких матеріалів, до яких відноситься технічна кераміка, повністю відсутня пластична деформація і крихкий характер її руйнування є найбільш типовим. Причому, для більшості керамічних матеріалів є справедливим закон Гука, їх оцінюють за величиною границі міцності на згинання та розтягування, модулями пружності, зсуву та окремими іншими показниками, характерними для досліджень металевих матеріалів. Таким чином можна припустити, що поведінка керамічних матеріалів при кавітаційному зношуванні аналогічна металевим конструкційним матеріалам і для них можуть бути використані відомі залежності. Однак така гіпотеза потребує експериментального підтвердження.

Через це важливе практичне значення мають дослідження їх кавітаційно-ерозійної стійкості та закономірностей зношування.

Експериментальні дослідження.

Зразки у вигляді циліндрів діаметром 10 мм і довжиною 18 мм для досліджень одержували з попередньо подрібненого до 15...30 мкм, який просіювали, змішували з близько 2% пластифікатора ПВС (полівініловий спирт) та піддавали пресуванню на гідравлічному пресі під тиском 3 т/см³. Після пресування зразки піддавали спіканню при температурі до 1500 °С.

Дослідження проводили на установці УЗДН-2Т при частоті 22 і 44 кГц, амплітуді коливань концентратора магнітострикційного вібратора 20 мкм. Зразки розміщували під концентратором на відстані 0,5 мм, яку контролювали за допомогою щупа. Як робоче середовище використовували попередньо відстояну водопровідну воду, температуру якої підтримували 20 ± 1 °С і контролювали лабораторним ртутним термометром ТЛ-2.

Інтенсивне зношування визначили ваговим методом за об'ємною втратою маси через фіксовані проміжки часу за допомогою лабораторних електронних вагів Radwag 210, з точністю до 0,0001г. 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 ексікаторі.

Введення до складу кераміки модифікуючих добавок змінює не лише її експлуатаційні властивості, але і фізико-механічні характеристики, що може вплинути на її кавітаційну стійкість. З цієї метою були проведені дослідження зносостійкості зразків кераміки з різними модифікуючими добавками. Їх основні фізико-механічні характеристики наведено в таблиці.

Фізико-механічні характеристики зразків

Властивості	Номер зразка		
	6	7	8
Вміст компонентів, мас %	$Al_2O_3 - 95$ $SiO_2 - 3$ $ZrO_2 - 2$	$Al_2O_3 - 98$ $ZrO_2 - 2$	$ZrO_2 - 85$ $Y_2O_3 - 15$
Густина, г/дм ³	3,9	4,1	5,9
Модуль пружності, $E \cdot 10^2$, ГПа	3,0...4,2	3,4...3,6	2,1
Міцність на згин, МПа	280...400	340...650	950

Аналіз одержаних результатів. На рисунку наведено графіки швидкості втрати маси зразками. Втрати маси зразками мають різне співвідношення між зносостійкістю при частотах коливань МСВ 22 і 44 кГц. Так, для зразка №6 воно має 3,2 рази, у зразка №7 – 4,4

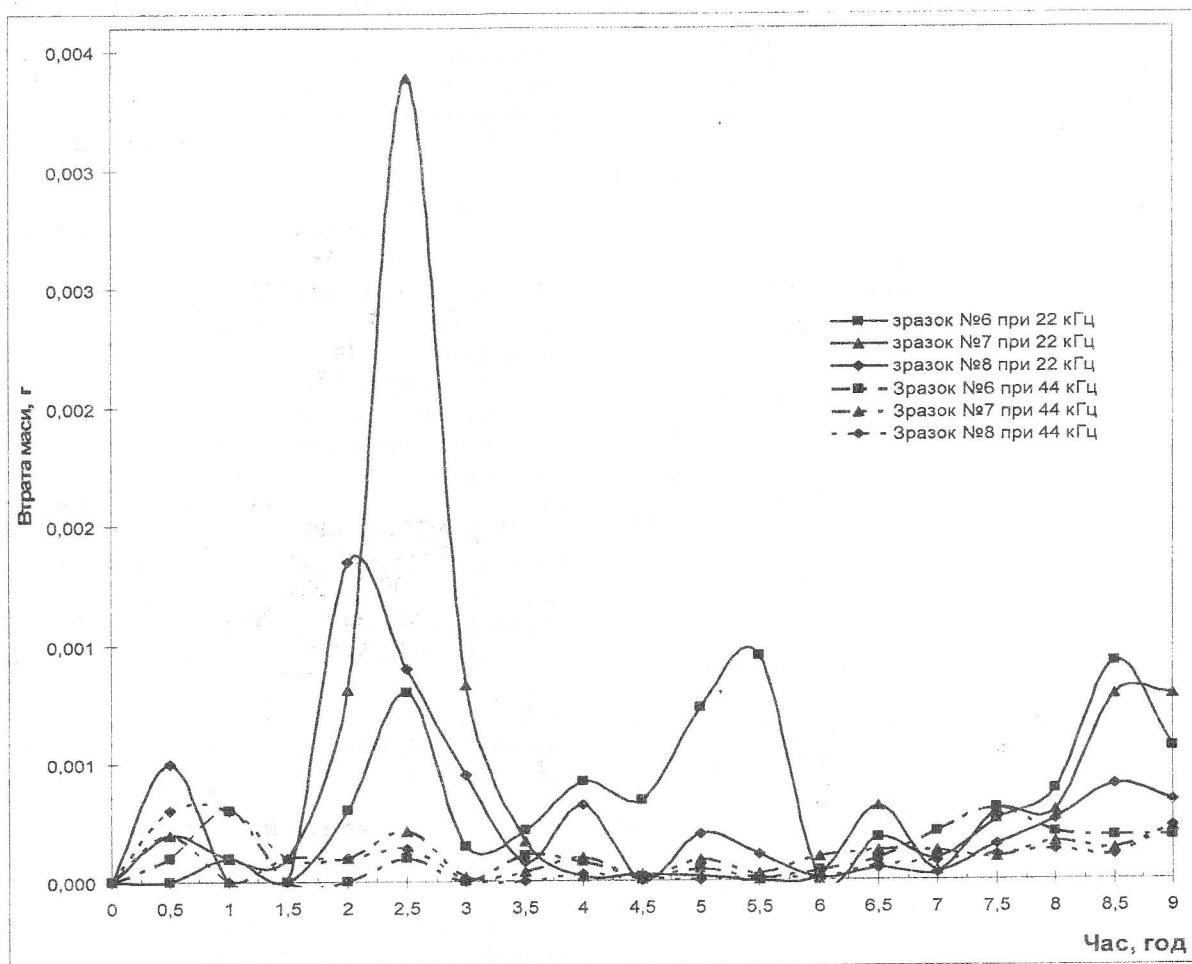
рази, а для зразка №8 – 3,0 рази. Підвищена зносостійкість зразка №7 пояснюється, вірогідно, підвищеним вмістом корундової складової.

Введення дрібнодисперсних включень діоксиду цирконію ZrO_2 в керамічну матрицю на основі Al_2O_3 дозволяє підвищити в'язкість та міцність кераміки [10].

Відомо, що при захопуванні кавітаційних бульбашок виникає значна асиметричність, пов'язана з конструкцією ГКА, тисками, турбулентністю потоку та іншими особливостями. Якщо діапазон швидкостей деформації класифікувати як статичну ($0...0,003\text{ с}^{-1}$), проміжну ($0,03...10^{-2}\text{ с}^{-1}$) та область високошвидкісного деформування, механізм кавітаційного руйнування відноситься

до двох останніх, внаслідок чого в матеріалі відбувається поширення як пружних, так і пластичних хвиль [11], що задовільно узгоджується з механізмом лінійної механіки руйнування твердих тіл.

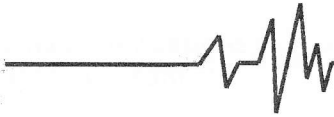
Досліджувані зразки, крім базового компоненту – Al_2O_3 містять включення, які впливають на їх фізико-механічні властивості та процес руйнування під дією колапсуючих кавітаційних бульбашок, яка має циклічний характер. Крім того, в керамічних матеріалах виникають дефекти структури – пори, тріщини, що визначається складом і технологією їх виготовлення. Зокрема, більша частина дефектів, переважно у вигляді мікротріщин виникає саме під час спікання та подальшого охолодження зразків.



Втрати маси зразками №6, 7 та 8 при частоті коливань МСВ 22 кГц та 44 кГц

Ці мікротріщини будуть збільшуватись навіть при незначних навантаженнях і, відповідно до теорії Гриффітса, їх наявність як на зовнішній поверхні, так і в середині зразка, сприяє накопиченню концентрацій напружень

[12], що призводить до збільшення розмірів тріщин і подальшого руйнування зразка. В досліджуваних матеріалах спостерігається стрибкоподібний розвиток мікротріщин в умовах локальної деформації, коли етапи їх повільного



росту передуються з періодами їх швидкого розвитку.

Аналіз експериментальних результатів та мікрофотографій зруйнованих зразків свідчить про переважно сколювальний характер їх руйнування, ініційований циклічними імпульсами мікроударного навантаження. Такі умови руйнування керамічних матеріалів також задовільно узгоджуються зі схемою квазістатичного руйнування, що включає виникнення мікродфектів, які є центрами руйнування, збільшення їх розмірів під дією розтягувально-стискаючих напружень, об'єднання сусідніх мікродфектів, відшарування матеріалу зразка.

Висока ерозійна активність кумулятивних мікрострумків узгоджується з релаксаційною гіпотезою Шальнева – 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)·10⁻⁷ сек [13].

Висновки. На основі аналізу експериментальних результатів встановлено, що найбільш достовірними критеріями зносостійкості конструкційних матеріалів в лабораторних і виробничих умовах є критична щільність потужності деформації $W_{кр}^*$, при досягненні якої утворюється продукти ерозії, та акумулятивний період циклічного накопичення ушкоджень, по закінченні якого інтенсивність руйнування стрибкоподібно збільшується.

Кавітаційна стійкість досліджених зразків співставна зі стійкістю високолегованих сталей, що дозволяє рекомендувати керамічні матеріали для виготовлення робочих органів ГА.

Список використаних джерел

1. Hees M. Verwirbelungen halten Keramik Sauber / Martin Hees // Ernährungsindustrie. – 2001. – №6. – P.64–65.
2. Lukasik K. Comparison of a selected materials for homogenizing valves / K. Lukasik // Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо – та енергоощадних технологій в галузях харчової і переробної промисловості: матеріали 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. Grimm A. Keramik Leichtbauteile / A. Grimm, S. Bast, R. Tillmanns, M. Schumacher // Keram. Z. – 2006. – Vol.58. - №1, P.8-10,11.
5. Мильченко С.Л. Особенности разрушения пластичных и хрупких материалов при кавитации / С.Л. Мильченко, А.Г. Александров, И.В. Пиньковский // Проблемы прочности. – 1971. – №2. – С. 117-119.
6. Пилиповский Ю.А. Композиционные материалы в машиностроении / Ю.А. Пилиповский, Т.В. Грудина, А.Б. Сапожников [и др.]. – К. : Техника, 1990. – 141 с.
7. Коваленко В.И. Разрушение керамики при воздействии кавитации ; препринт ХФТИ 88-65 / В.И. Коваленко, В.Г. Маринин. – Харьков : ХФТИ АН УССР. – 1988. – 7с.
8. Опанащук Н.Ф. Кавитационная стойкость порошковых материалов на основе тугоплавких соединений / Н.Ф. Опанащук, А.И. Некоз, А.Б. Жидков [и др.] // Проблемы трения и изнашивания : респ. научн. – техн. сб. – 1983. – Вып. 24. – С. 70-74.
9. Балкевич В.Л. Техническая керамика / В.Л. Балкевич. – М. : Стройиздат, 1984. – 256 с.
10. Калинович Д.Ф. Диоксид циркония : свойства и применение / Д.Ф. Калинович, Л.И. Кузнецова, Э.Т. Денисенко // Порошковая металлургия. – 1987. – №11. – С.98-103.
11. Погодаев Л.И. О механизме кавитационного изнашивания / Л.И. Погодаев, А.И. Некоз // Проблемы трения и изнашивания : респ. научн. – техн. сб. – 1975. – Вып. 7.– С. 70-74.
12. Кингери У. Введение в керамику /Уильям Кингери ; пер. с англ. А.И. Рябухина ; ред. П.П. Будников, Д.Н. Полубояринов. – М. : Стройиздат, 1964. – 534 с.
13. 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.

Список джерел в транслітерації

1. Hees M. Verwirbelungen halten Keramik Sauber / Martin Hees // Ernährungsindustrie. – 2001. – №6. – P. 64–65.
2. Lukasik K. Comparison of a selected materials for homogenizing valves / K. Lukasik // Problemy ta perspektyvy Stvorennya i Vprovadzhennya novikh resurso - ta enerhooshchadnykh tekhnolohiy v Haluzii kharchovoi y pererobnoi promislovosti: materialy

VI Mizhnar. nauk. – Tekhn. konf.: 19-21 zhovtnya 1999 r. – K.: UDUKHT, 2000. – CH.III. – S.94.

3. Meltser A.M. Novyy reguliruyushchii klapán dlya gidroabrazivnykh sred / A.M. Meltser, A. Ananyevskiy, I.V. Kirichenko // armaturostroyeniya. – 2006. – № 3 (42). – S. 26-28.

4. Grimm A. Keramik Leichtbauteile / A. Grimm, S. Bast, R. Tillmanns, M. Schumacher // Keram. Z. – 2006. – Vol.58. – № 1, P.8 – 10, 11.

5. Milchenko S.L. Osobennosti razrusheniya plastichnykh i khrupkikh materialov pri kavitatsii / S.L. Milchenko, A.G. Aleksandrov, I.V. Pinkovskiy // Problemy prochnosti. – 1971. – № 2. – S. 117-119.

6. Pilipovskiy YU.A. Kompozitsionnyye materialy v mashinostreniy / YU.A. Pilipovskiy, T.V. Grudina, A.B. Sapozhnikov [i dr.]. – M.: Tekhnika, 1990. – 141 s.

7. Kovalenko V.I. Razrusheniye keramiki pri vozdeystvii kavitatsii: preprint KHFTI 88-65 / V.I. Kovalenko, V.G. Marinin. – M.: KHFTI AN USSR. – 1988. – 7s.

8. Opanashchuk N.F. Kavitatsionnaya stoykost' poroshkovykh materialov na osnove tugoplavkikh soyedineniy / N.F. Opanashchuk, A.I. Nekoz, A.B. Zhidkov [i dr.] // Problemy treniya i iznashivaniya: resp. nauchn. – Tekhn. sb. – 1983. – Vyp. 24. – S. 70-74.

9. Balkevich V.L. Tekhnicheskaya keramika / V.L. Balkevich. – M.: Stroyizdat, 1984. – 256 s.

10. Kalinovich D.F. Dioksid tsirkoniya: svoystva i primeneniye / D.F. Kalinovich, L.I. Kuznetsova, E.T. Denisenko // Poroshkovaya metallurgiya. – 1987. – № 11. – S. 98-103.

11. Pogodayev L.I. O mekhanizme kavitatsionnogo iznashivaniya / L.I. Pogodayev, A.I. Nekoz // Problemy treniya i iznashivaniya: resp. nauchn. – Tekhn. sb. – 1975. – Vyp. 7. – S. 70-74.

12. Kingery V. Vvedeniye v keramiku / Uilyam Kingery; per. s angl. A.I. Ryabukhina; red. P.P. Budnikov, D.N. Poluboyarinov. – M.: Stroyizdat, 1964. – 534 s.

13. Shalnev K.K. Parametry vliyaniya na opyty s kavitatsionnoy eroziyey v svete relaksatsionnoy gipotezy / K.K. Shalnev, S.P. Kozyrev, I.I. Varga, D. Shebeshtyen // Doklady AN SSSR, OTT. – 1974. – T.219. – № 6. – S. 1348-1351.

КАВИТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ

Аннотация. Гидродинамические кавитационные аппараты – это эффективное оборудование нового поколения. Для изготовления их рабочих органов необходимы кавитационно-стойкие материалы. Перспективным материалом является керамика на основе оксида алюминия. Улучшить ее свойства можно модификацией различными добавками. Исследования проводили на ультразвуковой кавитационной установке. Стойкость материалов определяли по потере массы образцов. Установлено, что модифицированная керамика по кавитационной стойкости не уступает износостойкости стали. Поэтому керамику можно рекомендовать как перспективный материал для изготовления кавитационных аппаратов.

Ключевые слова: гидродинамические кавитационные аппараты, керамика, оксид алюминия, ультразвук, модифицированная керамика.

CAVITATION RESISTANCE OF THE MODIFIED CERAMICS

Annotation. Hydrodynamic cavitation devices - is an effective new-generation equipment. For the manufacture of their working groups are needed cavitation-resistant materials. Promising material is ceramic based on aluminum oxide. To improve their properties can be based the modification of various additives. The studies were conducted by the use of the ultrasonic cavitation setup. Resistance of the materials to the cavitation was determined by the weight loss of the samples. There was established that the modified ceramics by the cavitation resistance is not inferior to the wear resistance of steel. Therefore, ceramics can be recommended as a promising material for the production of cavitation devices.

Key words: hydrodynamic cavitation devices, ceramic, aluminum oxide, ultrasonic cavitation, modified ceramics.