

УДК 662.647.4

## RESEARCH OF PROPERTIES OF CERAMIC MATERIALS FOR FOOD INDUSTRY

**O. Litvinenko, B. Pashchenko***National University of Food Technologies***E. Shtefan***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***Key words:**

equipment,  
wear resistance,  
technical ceramics,  
aluminum oxide,  
ultrasonic cavitation

**Article history:**

Received 08.10.2020

Received in revised form  
15.11.2020

Accepted 10.12.2020

**Corresponding author:**

hojke@gmail.com

**ABSTRACT**

The results of the technical ceramics wear resistance for parts and units of food industry equipment are presented in article. Preliminary research shows that ceramic materials are not inferior to metals in terms of wear resistance. The material mathematical model is based on the two-phase disperse system consideration with a gas dispersive medium. This would suggest that there is no phase relative movement. So, the phase separation is neglected and dispersed medium characteristics averaging may be proposed. Such method led to substantial simplification of mathematical design procedure. The different types of technical ceramics comparative wear resistance researching were carried out with the simulation results accounting. It is shown that the ceramic materials wear is a complex process of their individual components destruction with the subsequent mass loss. The dependence of the specimen weight losses rate upon the forced vibrations frequency and the base component content is estimated by the method of experiment mathematical planning with subsequent experimental verification. In this case, a cyclical nature of destruction is observed. It includes the accumulation of defects, the development of cracks and the wearing products formation. This is preceded by the microcracks accumulation, which is determined by the material grain size. Most obviously is implemented grain boundary fracture mechanism in small dispersed single-phase oxide ceramics and in more coarsely dispersed macrocracks pass through the grain body.

Determined that the predominant direction of the ceramic materials wear resistance increasing is the aluminum oxide content increasing. The most wear resistant and durable is corundum ceramics with an aluminum oxide content of more than 90%. At the same time, the action of mechanical intensity on wearing does not significantly affect. Shown, that the research with numerical methods using are in satisfactory agreement with the results of physical experiments.

DOI: 10.24263/2225-2916-2020-28-17

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

О. А. Литвиненко, д-р техн. наук

Б. С. Пащенко

Національний університет харчових технологій

Є. В. Штефан, д-р техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

У статті наведено результати досліджень зносостійкості технічної кераміки для деталей і вузлів обладнання харчової промисловості. На основі математичного моделювання деформації керамічних матеріалів показано, що на їх зносостійкість впливає схема деформації, мікроструктура, пластичність та ударна в'язкість. Це дає змогу отримувати практично непористий матеріал з раціональною орієнтацією зерен і текстурою деформацій. З урахуванням результатів моделювання проведені дослідження порівняльної зносостійкості технічної кераміки різних типів.

Показано, що зношування керамічних матеріалів є складним процесом руйнування їх окремих складових з подальшою втратою маси. Встановлено, що найбільш ефективним напрямком підвищення зносостійкості керамічних матеріалів є збільшення вмісту оксиду алюмінію. Дослідження з використанням чисельних методів задовільно узгоджуються з результатами фізичних експериментів. **Ключові слова:** обладнання, зносостійкість, технічна кераміка, оксид алюмінію, ультразвукова кавітація.

**Постановка проблеми.** До конструкційних матеріалів в обладнанні харчової промисловості висуваються особливі вимоги. Вони мають бути корозійно- і зносостійкими, технологічними при обробці, надійними при використанні. При цьому необхідно враховувати специфічний фактор експлуатації обладнання — очищення від продуктів переробки та дезінфекцію. Як відомо, мийні композиції досить агресивні, через що відомі конструкційні матеріали не завжди надійні та довговічні.

Це змушує використовувати для виготовлення деталей і вузлів устаткування не лише традиційні, але й перспективні конструкційні матеріали, зокрема технічну кераміку на основі оксиду алюмінію, яка відрізняється високою корозійною стійкістю в різних технологічних середовищах. Однак її певні властивості, наприклад, зносостійкість, досліджені недостатньо або вимагають уточнення.

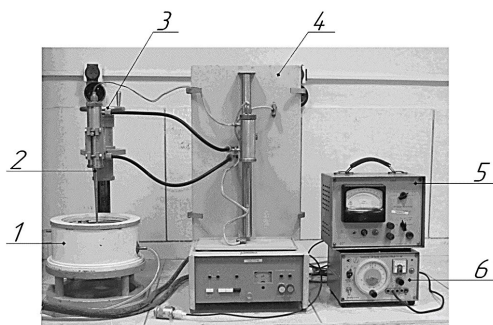
**Мета дослідження:** визначити особливості виготовлення окремих деталей технологічного обладнання з технічної кераміки; на основі математичного моделювання розподілення щільності, напружень і деформацій у матеріалі експериментально дослідити зносостійкість кераміки різних типів і запропонувати найбільш раціональну кераміку для виготовлення деталей обладнання харчової промисловості.

**Аналіз останніх досліджень і результатів.** При обробленні рідких середовищ конструкційні матеріали технологічного обладнання в багатьох випадках зазнають механічного зношування, яке посилюється корозійними процесами. Для харчової промисловості фірма «CeraBag» (Німеччина) виробляє деталі різноманітного технологічного призначення з  $Al_2O_3$ . Її використання забезпечує високі технологічні та експлуатаційні показники [1].

У [2] запропоновано вибирати кераміку для клапанів гомогенізаторів. Наприклад, керамічний клапан мав незначні пошкодження після 1000 год експлуатації.

Встановлено, що в керамічних матеріалах, як і в металах, унаслідок ударно-хвильової дії кавітаційних бульбашок виникають пружні деформації, які спричиняють виникнення поверхневих тріщин та поступове руйнування [3]. Експериментальні дослідження кавітаційного зносу зразків з керамічних матеріалів унаслідок їх руйнування під дією ультразвукової кавітації показують, що за зносостійкістю вони не поступаються традиційним конструкційним матеріалам [4].

**Матеріали і методи.** Для експериментальних досліджень зносостійкості технічної кераміки різних типів використовували установку УЗДН-2Т з магнітострикційним вібратором (рис. 1).



**Рис. 1.** Установка для дослідження зносостійкості зразків: 1 — ємкість з водяною сорочкою для розміщення зразків; 2 — магнітострикційний вібратор (МСВ); 3 — пристрій для вертикального переміщення МСВ; 4 — установка УЗДН-2Т; 5 — мілівольтметр; 6 — підсилювач

Дослідження проводили при частотах вимушених коливань 22 і 44 кГц, амплітуді коливань концентратора МСВ 20 мкм. Зразки розміщували під концентратором на відстані 0,5 мм. Як робоче середовище використовували відстояну водопровідну воду, температуру якої  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Інтенсивність зношування зразків визначали ваговим методом за втратою маси з точністю до  $10^{-4}$  г через фіксовані проміжки часу на лабораторних електронних вагах Radwag 210. Для оцінки структури керамічних матеріалів використовували мікроскоп МІМ-7.

Циліндричні зразки для досліджень діаметром 10 мм і довжиною 18 мм отримували з технічного глинозему — суміші оксиду алюмінію  $\alpha$ -,  $\beta$ - і  $\gamma$ - модифікацій. Вихідний матеріал подрібнювали, просіювали, змішували з 2% пластифікатора та піддавали пресуванню під тиском  $3 \text{ т/см}^3$ . В подальшому зразки піддавали спіканню при  $1500^\circ\text{C}$ .

**Результати дослідження.** Залежно від змісту  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в керамічній композиції і співвідношення фазових складових розрізняють мулітову, муліто-корундову та корундову, що визначає їх різні фізико-механічні властивості.

Керамічні зразки можуть витримувати різні види напружень, що дає змогу обробляти їх за складними схемами деформації. Використання таких схем обробки реалізує максимальні зсувні деформації, які забезпечують отримання практично непористого матеріалу з високими експлуатаційними властивостями [5].

Інші кінцеві параметри матеріалу виробів також залежать від схеми деформації, мікроструктури, пластичності й ударної в'язкості. Наявність зсувних деформацій

призводить до поліпшення властивостей матеріалу. Це пов'язано з мінімальною пористістю, сприятливою орієнтацією зерен, включень і пор, проявленням текстури.

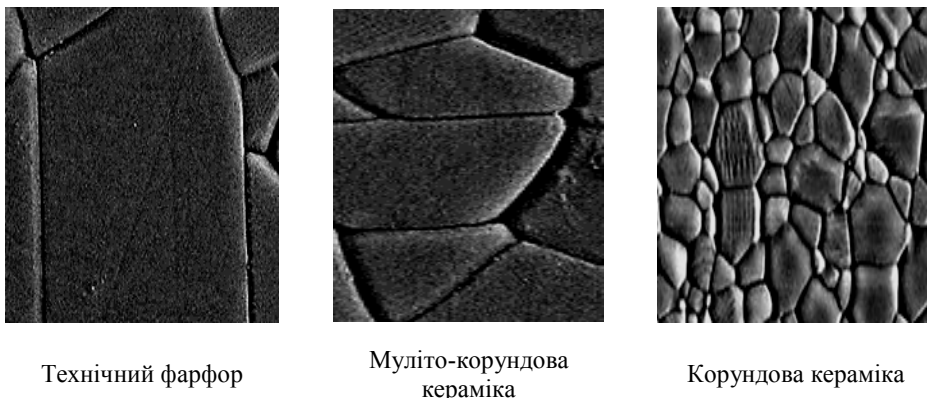


Рис. 2. Мікроструктури характерних зразків кераміки, (x100)

На основі попереднього комп'ютерного моделювання можливе створення ефективних схем деформацій і визначення раціональних гранулометричних параметрів порошку.

При цьому пористий матеріал розглядається як двофазна дисперсна система з газодисперсним середовищем. Це дає змогу припустити відсутність відносного руху цих фаз. Для таких середовищ доцільно використовувати припущення про те, що поділом між фазами нехтують шляхом усереднення характеристик дисперсного середовища (щільності, швидкості пресування, напружень) [5]. Формулюючи ці припущення, визначають співвідношення, які зв'язують напруження на матеріал і параметри деформації при цьому. Передбачається, що швидкість деформації подається у вигляді:

$$\varepsilon_{ik} = \varepsilon_{ik}^e + \varepsilon_{ik}^i, \quad (1)$$

де, відповідно,  $\varepsilon_{ik}^e$  пружна і  $\varepsilon_{ik}^i$  непружна складові тензора швидкості деформації.

Пружна складова в рівнянні представлена у вигляді закону Гука:

$$\varepsilon_{ik}^e = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{ik}^e + \frac{\nu}{1+\nu} \sigma_{ik} \delta_{ik}), \quad (2)$$

де  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коефіцієнт Пуассона;  $\delta_{ik}$  — дельта Кронекера.

Непружний компонент представлений як [8]:

$$\varepsilon_{ik}^i = \mu(\Phi) \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ik}}. \quad (3)$$

Ізотропний дисперсний матеріал переходу деформованих мас з оборотного в необоротний стан можна представити потенціалом  $F$  [6]:

$$F = \frac{(p - p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\phi} - \tau_s^2 = 0, \quad (4)$$

де  $p_0$  — сферична складова тензора напружень, при якій об'єм не змінюється.

Значення матеріальних функцій  $\phi$ ,  $\psi$  та  $p_0$  визначаються за [6; 7]:

$$\phi = \frac{1}{(1+m)^2} \cdot (1-\theta)^3 \cdot (1-|2 \cdot a - 1|)^2; \quad (5)$$

$$\psi_1 = \frac{8}{3} \cdot \frac{(1-\theta)^4}{\theta} \cdot \frac{(1-a)^2}{(1+m)^2}; \quad (6)$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \tau_s \cdot \frac{(1-\theta)^2}{\sqrt{\theta}} \cdot \left( \frac{1-m-2 \cdot a}{1+m} \right); \quad (7)$$

$$\psi_2 = \frac{8}{3} \cdot \frac{(1-\theta)^4}{\theta} \cdot \frac{a^2}{(1+m)^2}; \quad (8)$$

де, крім того, поруватість  $\theta$  і границя текучості твердої фази матеріалу  $\tau_s$ ,  $0 \leq a \leq 1$ ,  $0 \leq m \leq 1$ . Параметр  $a$  характеризує крихкість частинок пористого матеріалу,  $m$  — щільність контактів між окремими частинками.

Комп'ютерне моделювання дає змогу також визначити зміну форми виробів і розподіл щільності, напружень і деформацій.

Досліджувані зразки, крім базового компонента  $Al_2O_3$ , містять включення, які впливають на їх фізико-механічні властивості та процес руйнування під дією зовнішніх силових впливів 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, велика частина дефектів переважно у вигляді мікротріщин виникає саме під час спікання і подальшого охолодження зразків. Ці мікротріщини будуть збільшуватися навіть при незначних навантаженнях і, відповідно до теорії А. Гриффітса, їх наявність як на зовнішній поверхні, так і всередині зразка, сприяє накопиченню концентрацій напружень [8], що призводить до збільшення розмірів тріщин і подальшого руйнування.

Експериментально встановлено, що в руйнуванні досліджених матеріалів за різних умов зовнішнього навантаження можна виділити три характерні стадії: 1 — накопичення дефектів і пошкоджень; 2 — розвиток тріщин; 3 — утворення продуктів зносу в межах певної глибини поверхневого шару. Саме умови навантаження і жорсткість навантаженого стану обумовлюють конфігурацію і масштабний фактор тріщиноутворення й руйнування матеріалу зразка. Тому в керамічних матеріалах спостерігається стрибкоподібний розвиток мікротріщин в умовах локальної деформації, коли етапи їх повільного зростання чергуються з періодами їх швидкого розвитку з подальшим відокремленням мікроб'єму матеріалу [8; 9].

Використання різних частот вимушених коливань концентратора МСВ надає можливість моделювати різну інтенсивність механічної дії на зразки. Так, при частоті коливань 22 кГц циклічний характер руйнування більш «жорсткий». Очевидно, що за таких умов кавітаційна бульбашка, що виникає в рідині під концентратором, досягає розміру, при якому її лопання має найбільш руйнівний характер. При частоті коливань 44 кГц бульбашка не досягає кінцевих розмірів, тому її колапс менш інтенсивно впливає на інтенсивність зношування зразків. Причому загальний характер руйнувань зразків при досліджуваних частотах коливань МСВ аналогічний для всіх зразків. Оскільки їх випробування проводили в однаковому середовищі, запропонований підхід дає змогу порівняти вплив механічної дії технологічного середовища на зносостійкість керамічних матеріалів різних типів.

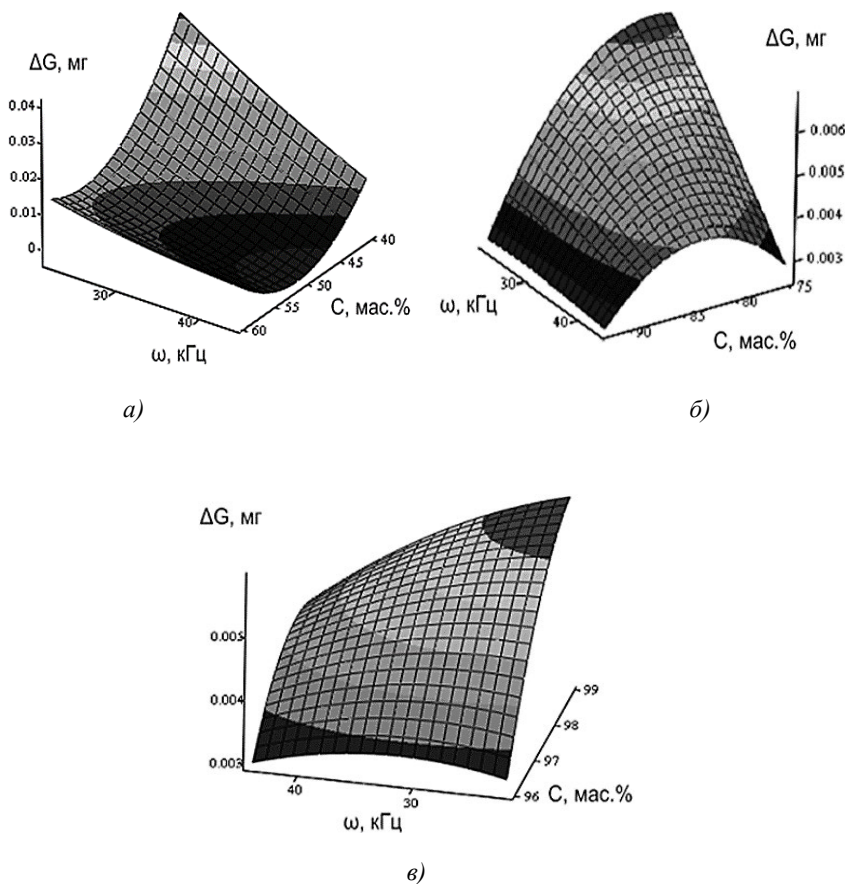
Ефективним способом прогнозування аналізу процесу руйнування керамічних матеріалів різного типу є планування експерименту. Це дає змогу використовувати

для оцінки інтенсивності зносу відомі методи математичної статистики і замінити фізичні експерименти (або їх частину) на чисельні.

Для аналізу впливу вмісту  $Al_2O_3$  в зразках на їх зносостійкість при різних частотах коливань концентратора МСВ, що моделює різну інтенсивність механічної дії, використано стандартну матрицю планування для встановлення необхідної кількості експериментів. Вхідними параметрами (факторами) процесу є вміст оксиду алюмінію  $C$  (%) і частота коливань  $\omega$  концентратора МСВ (кГц). Вихідним чинником є швидкість втрати маси зразків  $\Delta G$  (мг). У загальному вигляді швидкість втрати маси зразків визначається залежністю  $\Delta G = f(C, \omega)$ .

На підставі проведених розрахунків з використанням програмного продукту MathCad 15 побудовані поверхні відгуків (поверхні рівнянь регресії) досліджуваних зразків (рис. 3).

Аналіз одержаних результатів показує, що переважним напрямком підвищення зносостійкості керамічних матеріалів є збільшення в їх складі вмісту оксиду алюмінію. При цьому інтенсивність механічної дії на них істотного значення не має. Крім того, дослідження з використанням чисельних методів задовільно узгоджуються з результатами фізичного експерименту.



**Рис. 3.** Залежність (поверхня відгуку) впливу вмісту оксиду алюмінію ( $C$ ) і частоти мікроударного навантаження ( $\omega$ ) на швидкість зношування ( $\Delta G$ ) зразків: *a*) — з технічного фарфору; *б*) — з муліто-корундової кераміки; *в*) — з корундової кераміки

**Висновки.** Показано, що зношування конструкційних керамічних матеріалів є складним процесом руйнування їх окремих структурних фрагментів і починається з мікро- і закінчується макротріщинами з подальшою втратою маси. 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. В однофазній оксидній кераміці з оптимальним дисперсним складом найбільш очевидно реалізується механізм межзачерненого руйнування, а в більш грубодисперсній макротріщині поширюється через тіло зерна, що ускладнює її використання для виготовлення деталей, які при експлуатації піддаються інтенсивному зношуванню. Як показали результати фізичного та чисельного експериментів, найбільш зносостійкою є дрібнодисперсна корундова кераміка з вмістом базового компонента понад 90%.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Hees M. Verwirbelungen halten Keramik Sauber / Martin Hees // *Ernahrungsin dustrie* — 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, 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. Погодаев Л. И. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин. — С.-Пб.: Академия транспорта РФ, 2006. — 608 с.
4. 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.
5. Михайлов А. О. Застосування комп'ютерного моделювання при розробці технологічних процесів отримання деталей машин і апаратів харчової промисловості / Михайлов А. О., Штефан Є. В., Михайлов О. В. // *Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві*, Київ: ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України. — 2017. — №19. — С. 105—110.
6. Shtern M. Modified models of deformation of powder materials which based on plastic and harddeformable powders / M. Shtern, O. Mikhailov // *Kyiv: KPI, 2011. — Vol. 62, P. 13—19. — (Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. Series “Machine Building”)*.
7. Моделирование процесса упрочнения пористых втулок методом многократного протягивания / О. А. Розенберг, О. В. Михайлов, М. Б. Штерн // *Наукові нотатки*. — 2011. — Вип. 31. — С. 306—313.
8. Litvinenko A. Effect of Phase Composition on Cavitation Resistance of Ceramics / A. Litvinenko, Yu. Boyko, B. Pashchenko, Yu. Sukhenko // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing: Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2018. — Springer International Publishing AG. Part of Springer Nature. — Issue 1. — P. 299—305.*
9. Litvinenko A. Cavitation Wearing of Modified Ceramics / A. Litvinenko, Yu. Boyko, B. Pashchenko, Yu. Sukhenko, E. Shtefan // *Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2020. — Springer International Publishing AG. Part of Springer Nature. — Issue 3. — Vol. 2. — P. 24—31.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**А. А. Литвиненко, Б. С. Пащенко**

*Национальный университет пищевых технологий*

**Е. В. Штефан**

*Национальный технический университет Украины «КПИ» им. Игоря Сикорского*

*В статье представлены результаты исследования износостойкости технической керамики для деталей и узлов оборудования пищевой промышленности. На*

основе математического моделирования деформации керамических материалов показано, что на их износостойкость влияет схема деформации, микроструктура, пластичность и ударная вязкость. Это позволяет получать практически непористый материал с рациональной ориентацией зёрен и текстурой деформаций. С учётом результатов моделирования проведены исследования сравнительной износостойкости технической керамики разных типов.

Показано, что износ керамических материалов является сложным процессом разрушения их отдельных составляющих с последующей потерей массы. Установлено, что преимущественным направлением повышения износостойкости керамических материалов является увеличение содержания оксида алюминия. Исследования с использованием численных методов удовлетворительно согласуются с результатами физических экспериментов.

**Ключевые слова:** оборудование, износостойкость, техническая керамика, оксид алюминия, ультразвуковая кавитация.