



**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

**28**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Харчова**  
**ПРОМИСЛОВІСТЬ**

*Заснований у 1965 р.*

**Київ НУХТ 2020**

Results of research and development operations on technology of foodstuff, chemical, biochemical, microbiological processes, devices, the equipment, automation of food productions and economy of the food industry are provided.

The journal was designed for scientists, engineers and technical personnel of the food industry

Journal "Food Industry" is included into the list of professional editions of Ukraine of technical sciences (Decree of MES of Ukraine # 241 from March 9, 2016) and the category "Б" (Decree of MES of Ukraine # 612 from May 7, 2019, # 975 from July 11, 2019; in specialties 122, 133, 141, 144, 151, 162, 181), where the results of dissertations for scientific degrees of PhD and candidate of science can be published.

The Journal "Food Industry" is indexed by the following scientometric databases:

- Google Scholar
- Index Copernicus

Publications are represented in authoring edition.

Висвітлені результати науково-дослідних робіт з технології харчових продуктів, хімічних, біохімічних, мікробіологічних процесів, апаратів, обладнання, автоматизації харчових виробництв та економіки харчової промисловості.

Розрахований на наукових та інженерно-технічних працівників харчової промисловості.

Журнал «Харчова промисловість» включено в перелік наукових фахових видань України з технічних наук (Наказ МОН України № 241 від 09.03.2016) та категорію «Б» (Накази МОН України № 612 від 07.05.2019 р. та № 975 від 11.07.2019, за спеціальностями 122, 133, 141, 144, 151, 162, 181), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук.

Журнал «Харчова промисловість» індексується такими наукометричними базами:

- Google Scholar
- Index Copernicus

Статті друкуються в авторській редакції.

#### **Editorial office address:**

National University of  
Food Technologies  
Volodymyrska str., 68,  
01601 Kyiv, Ukraine  
(044) 287-92-45, 287-94-21  
E-mail: tmipt\_xp@ukr.net

#### **Адреса редакції:**

Національний університет  
харчових технологій  
вул. Володимирська, 68,  
м. Київ, 01601  
(044) 287-92-45, 287-94-21  
E-mail: tmipt\_xp@ukr.net

Recommended for publication by the  
Academic Council of the National University of  
Food Technologies.  
Minutes of meeting № 6 of  
December 24, 2020

Рекомендовано вченою радою  
Національного університету харчових  
технологій.  
Протокол № 6 від 24 грудня 2020 року

---

## Редакційна колегія

Склад редакційної колегії журналу «Харчова промисловість»

**Головний редактор**  
**Editor-in-Chief**

**Анатолій Соколенко**  
**Anatoliy Sokolenko**

д-р техн. наук, проф., Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Відповідальний секретар**  
**Accountable secretary**

**Сергій Токарчук**  
**Serhiy Tokarchuk**

канд. техн. наук, доц., Україна  
Ph. D. As., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

### Члени редакційної колегії:

**Станка Дамянова**  
**Stanka Damyanova**

д-р техн. наук, доц., Болгарія  
DSc, Assoc. Prof., Razgrad Branch of the University of Ruse, Bulgaria

**Стефан Стефанов**  
**Stefan Stefanov**

д-р инж., проф., Болгарія  
DSc, Prof., University of Food Technologies — Plovdiv, Bulgaria

**Іван Шило**  
**Ivan Shylo**

д-р техн. наук, проф., Білорусь  
Ph. D. Hab., Prof., Belarusian State Agrarian Technical University,  
Republic of Belarus

**Олександр Шевченко**  
**Olexander Shevchenko**

д-р техн. наук, проф., Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Лариса Арсенєва**  
**Larysa Arsenieva**

д-р техн. наук, проф., Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Олена Білик**  
**Olena Bilik**

канд. техн. наук, доц., Україна  
Ph. D., As., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Олександр Гавва**  
**Oleksandr Gavva**

д-р техн. наук, проф., Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Наталія Гусятинська**  
**Nataliia Husiatynska**

д-р техн. наук, проф., Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Віктор Ємцев**  
**Viktor Yemtsev**

д-р екон. наук, проф., Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Юлія Камбулова**  
**Yuliia Kambulova**

д-р техн. наук, Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Василь Кишенько**  
**Vasil Kyshenko**

канд. техн. наук, проф., Україна  
Ph. D., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Оксана Кочубей-Литвиненко**  
**Oksana Kochubei-Lytvynenko**

канд. техн. наук, доц., Україна  
Ph. D., As., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Олександр Кургаєв**  
**Oleksandr Kurgaev**

д-р техн. наук, проф., Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Анатолій Ладанюк**  
**Anatoly Ladanyuk**

д-р техн. наук, проф., Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Тетяна Лебеденко**  
**Tetiana Lebedenko**

д-р техн. наук, Україна  
Ph. D. Hab., Prof.,  
Odessa National Academy of Food Technologies Ukraine

**Світлана Літвінчук**  
**Svitlana Litvynchuk**

канд. техн. наук, доц., Україна  
Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Андрій Маринін**  
**Andrii Marynin**

канд. техн. наук, ст. наук. співр., Україна  
Ph. D., Senior Research Officer,  
National University of Food Technologies, Ukraine

**Тамара Носенко**  
**Tamara Nosenko**

д-р техн. наук, доц., Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

**Тетяна Пирог**  
**Tetyana Pyroh**

д-р біол. наук, проф., Україна  
Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

---

<b>Галина Поліщук</b> <b>Galina Polischuk</b>	д-р техн. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
<b>Віталій Прибильський</b> <b>Vitaliy Prybyl'skyi</b>	д-р техн. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
<b>Наталія Пушанко</b> <b>Nataliia Pushanko</b>	канд. техн. наук, доц., Україна Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
<b>Олександр Серьогін</b> <b>Oleksandr Serohin</b>	д-р техн. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
<b>Тетяна Сільчук</b> <b>Tetiana Silchuk</b>	д-р техн. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
<b>Галина Сімахіна</b> <b>Halyna Simakhina</b>	д-р техн. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
<b>Віктор Стабніков</b> <b>Viktor Stabnikov</b>	д-р техн. наук, доц., Україна Ph. D., As., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
<b>Віра Юрчак</b> <b>Vira Yurchak</b>	д-р техн. наук, Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
<b>Микола Якимчук</b> <b>Mukola Yakymchuk</b>	д-р техн. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine

## ЗМІСТ

### РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ

#### Сировина та матеріали

Самченко І. О., Олійник С. І. Визначення ефективності оброблення сортивки вуглецевим активованим і модифікованим матеріалом

Булій Ю. В., Куц А. М., Бондар М. В., Мукоїд Р. М. Підвищення якості спирту етилового ректифікованого в процесі брагоректифікації

Гетьман І. А., Михонік Л. А. Технологічні аспекти використання вівсяної закваски спонтанного бродіння в технології пшенично-житнього хліба

Гриценко А. М. Дослідження впливу різних видів гречаного борошна на якість безглютенового хліба

Андронович Г. М., Бондаренко Ю. В., Піддубний В. А., Білик О. А. Вплив насіння олійного льону на формування структурно-механічних властивостей пшеничного тіста

Лисенко О. Л. Дослідження сорбційних і десорбційних властивостей мармеладу

Городецька І. М., Камбулова Ю. В., Кохан О. О., Олексієнко Н. В. Якість здобного печива із застосуванням борошна зеленої гречки, цикорію і керобу

Пухляк А. Г., Кочубей-Литвиненко О. В., Тихончук І. С., Онофрей С. Ф. Комбінування сировини в технології сухих багатокомпонентних молочних сумішей

Леbedenko Т. С., Жигунов Д. О., Хвостенко К. В., Дубкова Т. П. Якість борошна: проблеми з огляду потужних виробництв борошняної продукції та підприємств HORECA

Дубовкіна І. О., Колесник В. В., Полупан В. В., Корецька І. Л. Оцінка якості спиртових напівфабрикатів з рослинної сировини в технології алкогольних напоїв

#### Технології: дослідження, застосування та впровадження

Гойко І. Ю., Стеценко Н. О. Розроблення напівфабрикату із солоду зернових культур для збагачення харчових продуктів

Кошак Ж. В., Кошак А. Э. Влияние технологических параметров производства на качество комбикормов для рыб

Мищенко О. С., Кизюн Г. О., Можаровська А. А., Олійник С. І. Енергоефективна технологія переробки фракції головної етилового спирту з отриманим спирту етилового ректифікованого

Вашека О. М., Петруша О. О., Арсенієва Л. Ю. Удосконалення методу визначення ефективності пастеризації молока за фосфатазою із застосуванням комп'ютерної колориметрії

### РОЗДІЛ 2. ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

#### Процеси харчових виробництв

Литвиненко О. А., Пащенко Б. С., Штефан С. В. Дослідження властивостей керамічних матеріалів для харчової промисловості

## CONTENTS

### SECTION 1. TECHNOLOGY

#### Raw Materials and Materials

7 Samchenko I., Oliyunik S. Determination of efficiency of treatment of sorting with carbon activated and modified material

17 Buliy Y., Kutz A., Bondar M., Mukoid R. Improving the quality of rectified ethyl alcohol in the process of rectification

25 Hetman I., Mykhonik L. Technological aspects of using spontaneously fermented oat culture in wheat-rye bread technology

33 Hryshchenko A. Study of the influence of different kinds of buckwheat flour on the quality of gluten-free bread

40 Andronovich G., Bondarenko Yu., Pidubnyi V., Bilyk O. Influence of flax oil seeds on formation structural and mechanical properties of wheat dough

49 Lysenko O. Study of sorption and desorption properties of marmelad

54 Horodetska I., Kambulova Yu., Kokhan O., Oleksienko N. Quality of butter cookies with the use of green buckwheat flour, chicory and ceroba

62 Pukhliak A., Kochubei-Lytvynenko O., Tykhonchuk I., Onofriy S. Combination of raw materials in technology of dry multi-component milk mixtures

74 Lebedenko L., Zhigunov D., Hvostenko K., Dubkova T. Flour quality: problems in overview of powerful flour products and HORECA enterprises

85 Dubovkina I., Kolesnyk V., Polupan V., Koretska I. Evaluation of the quality of alcoholic semi-finished products from vegetable raw materials in the technology of alcoholic beverages

#### Technologies: Researches, Application and Introduction

96 Goyko I., Stetsenko N. Development of semi-finished products from grain malt for enrichment of food products

103 Koshak Zh., Koshak A. Influence of technological production parameters on the quality of fish feeds

115 Mischenko O., Kizym G., Mozharovska A., Oliyunik S. Energy efficient technology for processing the ethyl alcohol head fraction to obtain rectified ethyl alcohol

123 Vashka O., Petrusha O., Arseniyeva L. Improvement of the method for assessment the efficiency of milk pasteurization using computer colorimetry

### SECTION 2. PROCESSES AND EQUIPMENT

#### Processes of Food Industries

132 Litvinenko O., Pashchenko B., Shtefan E. Research of properties of ceramic materials for food industry

---

**Пакування: розробка, дослідження,  
переробка**

Пасічний В. М., Маринін А. І., Желуденко Ю. В. 140  
Дослідження впливу елементів активного па-  
кування на мікробіологічну стабільність соси-  
сок варених у процесі зберігання

**Керування виробничими процесами**

Грибков С. В., Ханбабаєв Р. Р., Харкянен О. В. 149  
Аналіз маркетингових заходів торговельної  
мережі методами Text Mining

**Енергетика та виробничі процеси**

Степанець О. І., Васильківський К. В., Миро- 158  
ненко С. М., Максименко І. Ф. Енергетична  
рекуперация і регулювання ходу машин

**Packing: Development, Researches,  
Processing**

*Pasichniy V., Marynin A., Zheludenko Yu.* 140  
Investigation of active packaging influence on cooked  
sausages microbiological stability during storage

**Control of Production Processes**

*Hrybkov S., Khanbabaev R., Kharkianen O.* 149  
Analysis of trading network marketing measures by  
Text Mining methods

**Power engineering and productions**

*Stepanets O., Vasylykivsky K., Myronenko S.,* 158  
*Maksymenko I.* Energy recovery and adjustment  
of move of machines

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.

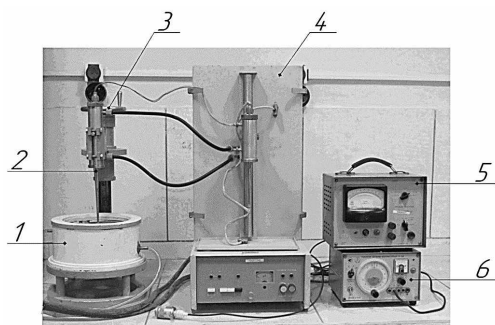
**Мета дослідження:** визначити особливості виготовлення окремих деталей технологічного обладнання з технічної кераміки; на основі математичного моделювання розподілення щільності, напружень і деформацій у матеріалі експериментально дослідити зносостійкість кераміки різних типів і запропонувати найбільш 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 «Seabag» (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.

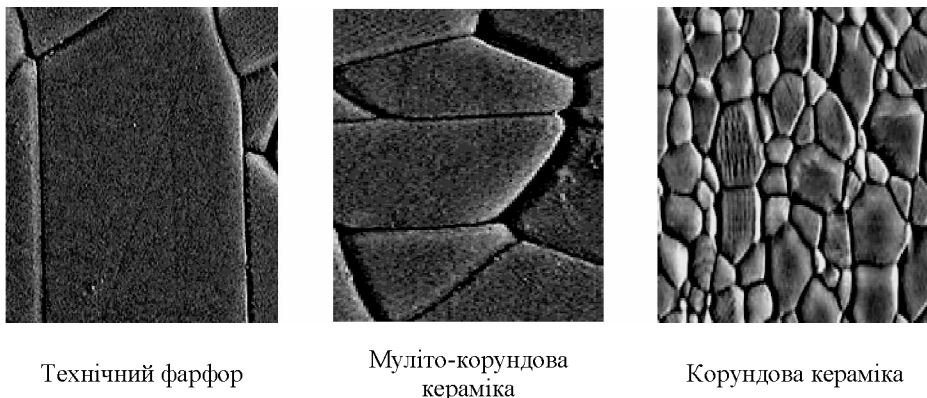


Рис. 2. Мікроструктури характерних зразків кераміки, (x100)

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.

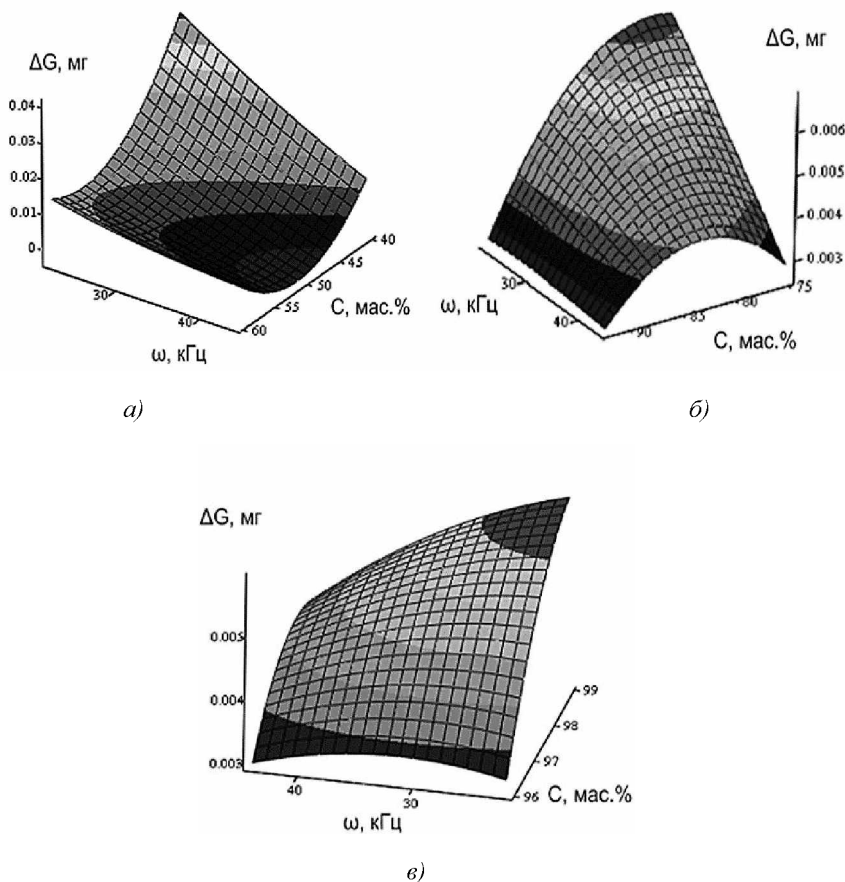
Ефективним способом прогнозування аналізу процесу руйнування керамічних матеріалів різного типу є планування експерименту. Це дає змогу використовувати

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 концентратор 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: *а*) — 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 межзасереного 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 // Ernährungsin 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 С. 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. Пашченко**

*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.

Наукове видання

# ХАРЧОВА ПРОМИСЛОВІСТЬ

Науковий журнал

№ 28

Журнал «Харчова промисловість» затверджений наказом МОН України (постанова № 241 від 09.03.2016) як наукове видання з технічних наук.

Ресестаційне свідоцтво: серія КВ № 6890 від 23.01.2003.

Засновник і видавець: Національний університет харчових технологій.

Журнал є продовженням міжвідомчого тематичного збірника «Харчова промисловість», заснованого в 1965 р. Виходить двічі на рік.

***Статті друкуються в авторській редакції.***

***Відповідальний редактор журналу: А. І. Соколенко***

***Відповідальний секретар: С. В. Токарчук***

Комп'ютерна верстка: Т. В. Соколова

Підп. до друку 21.12.2020 р. Формат 70 × 100/16.

Гарнітура TimesNewRoman. Друк цифровий.

Ум. друк. арк. 11,45. Обл.-вид. арк. 12,32.

Наклад 100 прим. Вид. № 07/16. Зам. № 23-16

НУХТ 01601 Київ-33, вул. Володимирська, 68  
Свідоцтво про реєстрацію серія ДК № 1786 від 18.05.2004