

УДК 621.597.23

## ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ПОРИСТИХ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ПРИРОДНИХ МІНЕРАЛІВ

ПОВСТЯНА Ю. С., асистент

Кафедра комп'ютерних технологій, Луцький національний технічний університет, вул. Потебні, 56, 43018, Луцьк, Україна, тел. +380505193299, e-mail : [yuliapovstyana@ukr.net](mailto:yuliapovstyana@ukr.net), ORCID ID : 0000-0001-5426-4157

**Анотація. Постановка проблеми.** Пористі керамічні матеріали мають великий термін експлуатації, стійкість до побутових впливів, високу механічну міцність, простоту в експлуатації. Міцність керамічних фільтрів, що виготовляються СВС-спіканням, істотно залежить від процесу їх формування. Тому необхідно детально вивчити вплив кількісних співвідношень матеріалів, що використовуються для виготовлення, залежність способу змішування та пресування, вплив температури у вказаних технологічних процесах на міцність неспечених заготовок. **Мета статті** – дослідження міцності тіл, отриманих на основі окалини сталі 18Х2Н4МА та природного мінералу – сапоніту – на етапі їх формування. **Аналіз публікацій.** Проведено аналіз методів дослідження міцності пористих керамічних тіл. Вибрано оптимальну модель, що враховує лінеаризовані механічні характеристики матеріалів-складників. **Виклад матеріалу.** Для математичного моделювання у роботі застосовано комбіновану модель Румпфа та Оноду, на основі якої проведено розрахунки залежності міцності тіла до термічної обробки. Враховуючи модель Рі та Еріна, досліджено вплив на межу текучості матеріалу швидкості деформації та енергії активації. На основі узагальненої моделі вивчено вплив об'ємної частки сполучної речовини, температури та швидкості деформації на міцність тіла. Встановлено, що міцність неспеченого тіла зростає зі зростанням об'ємної частки фракцій сполучної речовини і зменшується з підвищенням температури. **Висновок.** Результати, отримані на основі математичного моделювання міцності керамічних пористих тіл, узгоджуються з даними експериментальних досліджень, що підтверджує адекватність застосування даної моделі для дослідження міцності тіл у процесі СВС-спікання.

*Ключові слова:* окалина; сапоніт; пориста кераміка; міцність; сталь

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ

ПОВСТЯНАЯ Ю. С., ассистент

Кафедра компьютерных технологий, Луцкий национальный технический университет, ул. Потебни, 56, 43018, Луцк, Украина, тел. +380505193299, e-mail: [yuliapovstyana@ukr.net](mailto:yuliapovstyana@ukr.net), ORCID ID : 0000-0001-5426-4157

**Аннотация. Постановка проблемы.** Пористые керамические материалы имеют большой срок эксплуатации, устойчивость к бытовым воздействиям, высокую механическую прочность, простоту в эксплуатации. Прочность керамических фильтров, изготавливаемых СВС-спеканием, существенно зависит от процесса их формирования. Поэтому необходимо изучить влияние количественных соотношений материалов, используемых при изготовлении, зависимость способа смешивания и прессования, влияние температуры при указанных технологических процессах на прочность неспечённых заготовок. **Целью статьи** является исследование прочности тел, полученных на основе окалины стали 18Х2Н4МА и природного минерала – сапонита – на этапе их формирования. **Анализ публикаций.** Проведен анализ методов исследования прочности пористых керамических тел. Выбрана оптимальная модель, которая учитывает линейаризованные механические характеристики материалов-компонентов. **Изложение материала.** Для математического моделирования в работе применена комбинированная модель Румпфа и Оноду, на основе которой проведены расчеты зависимости прочности тела до термической обработки. Учитывая модель Рі и Эрина, исследовали влияние на предел текучести материала скорости деформации и энергии активации. На основе обобщенной модели изучено влияние объемной доли связующего вещества, температуры и скорости деформации на прочность тела. Установлено, что прочность неспечённого тела возрастает при росте объемной доли фракций связующего вещества и уменьшается с ростом температуры. **Вывод.** Результаты, полученные на основе математического моделирования прочности керамических пористых тел, согласуются с данными экспериментальных исследований, что подтверждает адекватность применения данной модели для исследования прочности тел в процессе СВС-спекания.

*Ключевые слова:* окалина; сапонит; пористая керамика; прочность; сталь

# PREDICTION OF THE POROUS CERAMIC MATERIALS STRENGTH PRODUCED FROM THE WASTE OF ENGINEERING AND NATURAL MINERALS

POVSTIANA Yu. S., Assistant

Department of Computer Technology, Lutsk National Technical University, 56, Potebni str., Lutsk, 43018, Ukraine, tel. +380505193299, e-mail: [yuliapovstiana@ukr.net](mailto:yuliapovstiana@ukr.net), ORCID ID : [0000-0001-5426-4157](https://orcid.org/0000-0001-5426-4157)

**Abstract. Formulation of the problem.** Porous ceramic materials have great lifetime, resistance to household effects, high mechanical strength and ease of use. The strength of the ceramic filters produced by thermal debinding depends essentially on the process of their moulding. It is therefore necessary to examine the impact of quantitative ratios of materials used in the manufacture dependent methods of mixing and pressing, the effect of temperature during these production processes on the strength of ceramic green bodies. **Literature review.** The article purpose is the research of ceramic green bodies strength received from scale steel 18H2N4MA and natural mineral – saponite – during their moulding. **Analysis of publications.** The paper analyzes the methods of research of the strength of porous ceramic bodies. The optimal model, which takes into account linearized mechanical properties of materials, is applied. **The presentation material.** The combined model of Rumpf and Onodu is used for the mathematical modelling. The strength of the ceramic green body are calculated depending thermal debinding. The model Ree and Eyring influence on the strength of the material strain rate and activation energy are calculated. Based on a generalized model, the influence of volume fraction of binder, temperature and strain rate at the strength of the ceramic green body are investigated. **Conclusion.** Numerical simulation results obtained strength porous ceramic bodies are consistent with those of experimental studies. This model is applicable for ceramic bodies of research of strength during the process of the thermal debinding.

*Keywords:* scale; saponite; porous ceramics; strength; steel

## Постановка проблеми

Аналіз стану сучасного розвитку економіки України, виробничих та переробних підприємств показує, що для ефективної конкуренції слід як фільтруючі матеріали використовувати такі елементи, які мають довговічність в експлуатації та низьку вартість, що, у свою чергу, дасть можливість зменшити ціну продукції.

Найбільш перспективні в цьому відношенні пористі керамічні матеріали, які мають великий термін експлуатації, стійкість до побутових впливів, високу механічну міцність, простоту в експлуатації та низьку вартість.

Досліджуючи міцність керамічних фільтрів, що виготовляються СВС-спіканням, слід велику увагу звернути на процес формування таких тіл. Тут необхідно детально вивчити вплив на міцність неспечених заготовок не тільки кількісних співвідношень матеріалів, що використовуються для їх виготовлення, а й залежність способу змішування та пресування, вплив температури у вказаних технологічних процесах. Нехтування зазначеними факторами може викликати появу таких дефектів як тріщини та викришування, що утворюватимуться у процесі СВС-нагріву.

Причини виникнення таких явищ пов'язують із тим фактом, що місцеві напруження у неспеченому тілі перевищують межу міцності, що може виникнути через порушення зчеплення у процесі нагріву.

Якщо міцність неспеченого тіла достатньо велика, щоб витримати напруження, які виникатимуть з наростанням тиску під час теплового випалювання, цикл нагріву може бути коротким. У випадку, коли міцність тіла-заготовки невелика, цикл нагріву

повинен бути довготривалим для мінімізації ефекту збільшення тиску та напружень, і це зменшуватиме ймовірність виникнення описаних вище дефектів у фільтрах.

## Аналіз публікацій

Даному напрямку дослідження присвячено невелику кількість робіт, що пов'язано зі складністю такого класу завдань.

У праці [1] запропоновано формулу, яку отримав автор на основі експериментальних досліджень, для визначення міцності кераміки у випадку двофазних матеріалів, що враховує коефіцієнт однорідності розподілу напружень у кристалах.

У праці [2] експлуатаційні характеристики досліджувалися на основі формули А. С. Бережного та М. Ю. Бальшеного, а для розрахунку міцності запропоновано емпіричне рівняння.

Основні результати, отримані у працях G.Y. Stangle, I.A. Aksay, D-S. Tsai, Z.C. Feng, B. He, S.J. Lombardo [6; 7; 10], ґрунтуються на висновках з експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків. Для дослідження розподілу напружень у неспеченому тілі в процесі пресування тут ураховували механічні властивості матеріалів-складників, використаних при цьому. Це здійснено шляхом уведення лінеаризованих пружних характеристик матеріалів до механічних моделей. У результаті використання вказаних уточнень отримано модель розподілу нормальних напружень у тілі-заготовці виявилася більш уточненою, ніж початкова модель [10].

Для пресування з відкритими порами найбільші нормальні напруження локалізуються поблизу

центру неспеченого тіла, що збігається із розташуванням зони високого тиску.

У [10] проведено теоретичне дослідження міцності керамічних пористих тіл на основі математичних моделей, що враховують силу взаємодії між частинками тіла для випадку низькотемпературних режимів спікання.

У праці [5] експериментально досліджено закономірність зміни механічних властивостей залежно від тиску пресування пористої кераміки, що отримана на основі окалини сталі 18X2H4MA та природного мінералу – сапоніту.

**Мета статті**

Актуальною постає проблема прогнозування розподілу напружень, що виникають у тілі-заготовці у процесі спресовування. Для цього проведено математичне моделювання залежності міцності тіла від температури його формування з урахуванням оптимальності кількісного співвідношення складників.

**Виклад матеріалу**

Для визначення міцності тіл застосовуємо комбіновану модель Румпфа та Оноду [8]. Вказані моделі дають можливість передбачити теоретичну міцність гранул і ущільнених частинок. У більшості з цих способів міцність гранули на розрив виражається

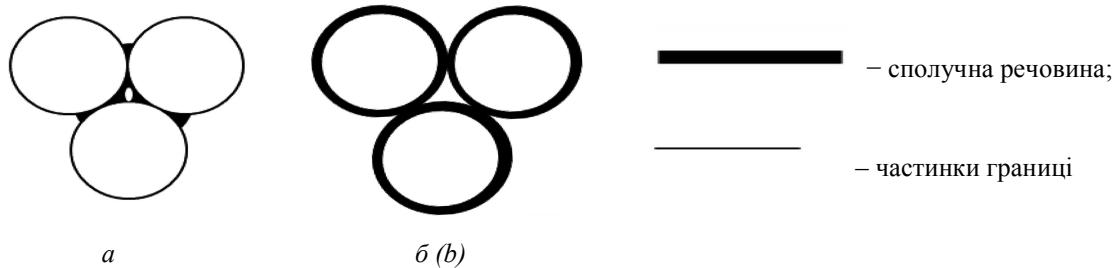


Рис. 1: Розподіл сполучної речовини між частинками речовини: а – для маятникового стану; б – для випадку оболонкового покриття / Fig. 1. Distribution of binder between ceramic particles : a – pendularstate bonds; b – coated-state bonds

Для сполучної речовини, розподіленої в маятниковому стані, межа міцності на розрив тіла-сирцю ( $\sigma$ ), може бути визначена [8; 10] так:

$$\sigma = 2,04 \frac{\epsilon_{el} + \epsilon_{cn}}{\sqrt{1 - \epsilon_{el} - \epsilon_{cn}}} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_{cn}}{\epsilon_{el}}} \cdot \sigma_{cn}, \quad (1)$$

де  $\epsilon_{cn}$  – об’ємна частка сполучної речовини,  $\epsilon_{el}$  – об’ємна частка елементів,  $\sigma_{cn}$  – міцність сполучної речовини (або адгезійна міцність). У розрахунках адгезійна міцність  $\sigma_{cn}$  вважається сталою; враховується, що вона залежить від властивостей сполучної речовини за кімнатної температури.

Результати розрахунку залежності міцності тіла від термічної обробки на основі рівняння (1)

функцією середньої сили взаємодії, віднесеної до точки контакту, розміром первинних частинок у гранулі та середнього координаційного числа. Припущення, на яких засновані ці теоретичні положення, добре виконуються для сильно подрібнених речовин, що в основному складаються з більш або менш сферичних частинок, які несильно відрізняються розміром. Більше того, сили взаємодії між частинками всі одного порядку величини, і руйнування гранул відбувається в областях кріплення між частинками.

Перша модель складається з об’ємних часток твердих речовин і пустот у «шихті», а міцність «шихти» віднесена до сил, що виникають при локалізованих точкових контактах, що забезпечується сполучною речовиною (рис. 1 а). В моделі Оноду [8] змінено цю залежність додаванням до «шихти» певної кількості сполучної речовини, що розподілена по поверхні кожної частинки у вигляді сферичної оболонки покриття або у маятниковому стані (рис. 1 б). Специфіка міцності неспеченого тіла залежить від кількості сполучної речовини і того, яким чином сполучна речовина була розподілена.

Обидві моделі мають однакові характеристики. Як для випадку маятникового, так і для сферичного покриття, міцність неспеченого тіла зменшується із зменшенням як фракції матеріалу, так і сполучної речовини в неспеченому тілі.

наведено на рисунку 2. Тут міцність матеріалу залежить від об’ємних часток сполучної речовини, а також від міцності сполучної речовини, яка, як передбачається, має сталу на розтяг межу текучості (плинності)  $\sigma_m = 4,0$  МПа [3] при 25 °С. Дослідження проводилося для трьох значень об’ємної частки матеріалу  $\epsilon_{el} = 0,3; 0,35; 0,4$ . Тут кривій 1 відповідає випадок  $\epsilon_{el} = 0,3$ ; кривій 2 – випадок  $\epsilon_{el} = 0,35$ ; кривій 3 –  $\epsilon_{el} = 0,4$ .

З рисунка 2 видно, що при різних завантаженнях твердої фази (об’ємна частка  $\epsilon_{el} = 0,3; 0,35; 0,4$ ), міцність неспеченого тіла зростає зі зростанням частки сполучної речовини. Крім того, для розглянутих випадків сполучного завантаження, міцність матеріалу до випалювання збільшується зі

зростанням об'ємної частки сполучної речовини (особливо це стає вираженим при  $\varepsilon_{cn} = 0,4..0,5$ ). Тобто міцність неспеченого матеріалу суттєво залежить від пресування та формування. Числове моделювання показало, що найбільш оптимальний варіант вибору сполучної речовини становить  $\varepsilon_{cn} = 0,4$ .

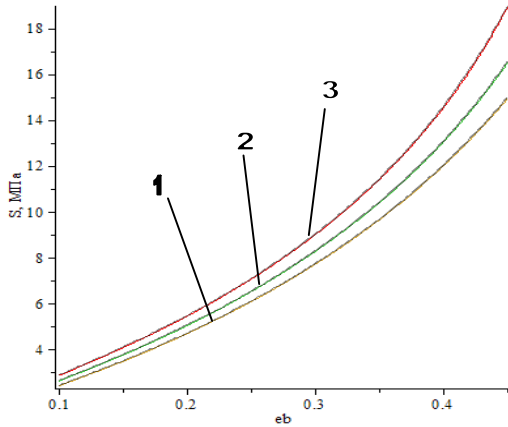


Рис. 2: Залежність міцності тіла від об'ємної частки сполучної речовини / Fig. 2. The dependence of the strength from the body volume fraction of binder

Отримання керамічних сполук пов'язане із зростанням температури. Тому доцільно вивчити вплив таких факторів як температура та швидкість деформації на механічну поведінку сполучної речовини.

Розглянемо модель Т. Пі та Г. Еріна [9], яка заснована на теорії перехідного стану. Ця модель визначає межу текучості матеріалу  $\sigma_{cn}^m$  через швидкість деформації  $\dot{\varepsilon}_y$  та енергію активації  $\Delta H$ :

$$\sigma_{cn}^m = \frac{2 \cdot T}{V^*} \cdot \left( \frac{\Delta H}{T} + 2,3R \cdot \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_y}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \quad (2)$$

Величиною  $V^*$  позначено об'єм активації,  $\dot{\varepsilon}_0$  – стала,  $R$  – газова стала. Рівняння (2) використовують для випадків, коли формування «шихти» відбувається за підвищеної температури. Враховуючи рівняння (2) та формулу (1), міцність «шихти» визначаємо за формулою:

$$\sigma \approx 2,04 \frac{\varepsilon_{el} + \varepsilon_{cn}}{\sqrt{1 - \varepsilon_{el} - \varepsilon_{cn}}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{cn}}{\varepsilon_{el}}} \cdot \frac{2 \cdot T}{V^*} \cdot \left( \frac{\Delta H}{T} + 2,3R \cdot \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_y}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \quad (3)$$

Рівняння (3), що включає в себе вплив температури та енергії активації, може бути

використане для прогнозування міцності неспеченого тіла протягом термічного циклу (СВС-нагріву).

Дослідимо вплив температури та швидкості деформації на міцність керамічного тіла у процесі його формування. Для цього розрахуємо міцність сполучної речовини за різних температур у діапазоні від 10 °С до 100 °С і швидкостях деформації  $\dot{\varepsilon}_y$  за формулою (2). Результати розрахунку показано на рисунку 3. Дослідження проведені для декількох значень швидкості деформації:

$$\dot{\varepsilon}_y = 10^2 \cdot s^{-1}; 10^3 \cdot s^{-1}; 10^4 \cdot s^{-1} \dots$$

На рисунку 2 це відповідає кривим 1, 2 та 3 відповідно. В розрахунках урахувалося, що стала  $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \times 10^6 \cdot s^{-1}$ , енергія активації  $\Delta H = 32,5$  кДж/моль, об'єм активації  $V^* = 14,59$  м<sup>3</sup>/кмоль.

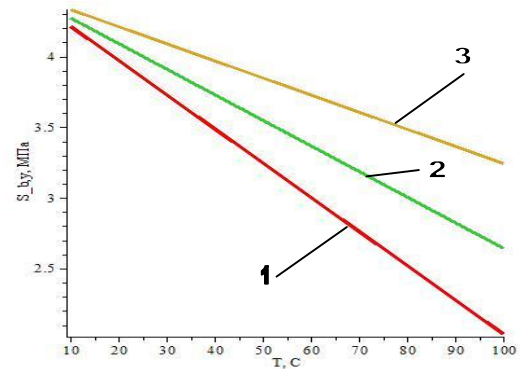


Рис. 3: Залежність межі текучості тіла від температури та швидкості деформації / Fig. 3. The dependence of the yield strength of body from the temperature and strain rate

Межа текучості лінійно зменшується з ростом температури, нахил якої залежить від швидкості деформації  $\dot{\varepsilon}_y$ . За постійної температури зменшення швидкості деформації спричинює більшу слабкість сирого тіла.

Також розрахуємо вплив залежності напружень у неспеченому тілі від температури, швидкості деформації за різних значень величин енергії активації  $\Delta H$  та активаційного об'єму  $V^*$ . Результати розрахунку для трьох випадків показано на рисунку 4. Тут крива 1 відображає випадок  $\Delta H = 42,5$  кДж/моль,  $V^* = 9,5$  м<sup>3</sup>/кмоль, крива 2 – випадок  $\Delta H = 32,5$  кДж/моль,  $V^* = 14,5$  м<sup>3</sup>/кмоль, крива 3 – випадок  $\Delta H = 22,5$  кДж/моль,  $V^* = 19,5$  м<sup>3</sup>/кмоль. У розрахунках приймалося значення швидкості деформації  $\dot{\varepsilon}_y = 2,1 \cdot 10^3 \cdot s^{-1}$ ,  $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \times 10^6 \cdot s^{-1}$ .

З рисунка 4 видно, що напруження у матеріалі зменшуються зі зростанням температури та енергії активації. Сумарний ефект залежить від впливу об'ємної частки сполучної речовини і температури.

Сумарний ефект, розрахований за формулою (3), впливу об'ємної частки сполучної речовини, фракцій і температури на міцність показано на рисунку 5 з фіксованого значення об'ємної частки керамічного завантаження  $\varepsilon_{cn} = 0,4$ .

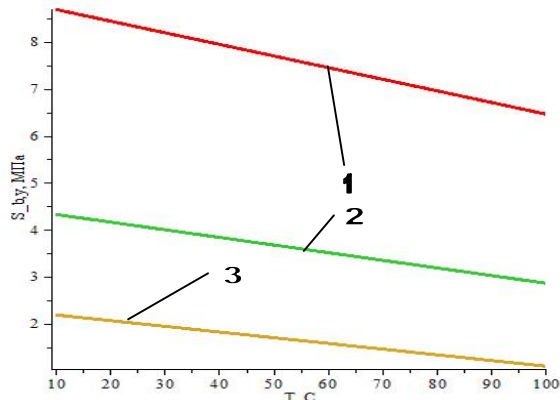


Рис. 4: Вплив температури, енергії активації та активаційного об'єму на межу текучості / Fig. 4. Effect of temperature, activation energy and activation volume on the yield strength

Розрахунки, результати яких наведені на рисунку 5, виконані при  $32,5$  кДж/моль,  $V^* = 14,5$  м<sup>3</sup>/кмоль,  $\mathcal{E} = 2,1 \cdot 10^3 \cdot s^{-1}$ ,  $\mathcal{E} = 1 \times 10^6 \cdot s^{-1}$  для випадків: крива 1 –  $T = 25$  °C, крива 2 –  $T = 125$  °C, крива 3 –  $T = 225$  °C, крива 5 –  $T = 270$  °C.

Міцність неспеченого тіла зростає з зростанням об'ємної частки фракцій сполучної речовини і зменшується зі зростанням температури. Рисунок 5 показує траєкторію міцності неспеченого тіла під час циклу нагріву від кімнатної температури  $T = 25$  °C до деякої максимальної температури  $T_{max}$ , з наступним охолодженням до кімнатної температури. Для такого циклу нагріву міцність неспеченого тіла зменшується через деградацію зв'язків із збільшенням

температури.

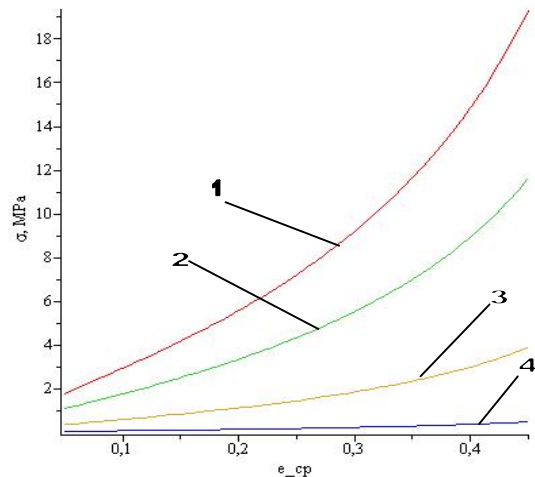


Рис. 5: Вплив об'ємної частки сполучної речовини на міцність / Fig. 5. The influence of the volume fraction of binder on strength

Сполучна речовина має повністю розкластися на нагрівальній гілці циклу, тоді міцність матеріалу монотонно зменшується зі зменшенням об'ємної частки сполучної речовини.

### Висновок

Результати, отримані шляхом числового розрахунку на основі моделей Оноду [8] та Еріна [9], добре узгоджуються з даними експериментальних досліджень, описаних у праці [5] для пористої кераміки, отриманої на основі окалини сталі 18Х2Н4МА та сапоніту. На основі цього можна ствердно робити висновки про можливість застосування даних моделей для дослідження міцності тіла у процесі спікання.

### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексюк М. М. Метод прогнозування прочності пористої кераміки / М. М. Алексюк // Проблеми прочності. – 2001. – № 2. – С. 130–136.
2. Дашкова Т. С. Залежність експлуатаційних характеристик виробів на основі неорганічних в'язучих від параметрів пресування / Т. С. Дашкова, В. В. Глуховський, І. В. Глуховський, В. А. Свідерський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – № 32. – С. 149–158.
3. Рудь В. Д. New porous penetrating material / В. Д. Рудь, Ю. С. Повстяна, Л. М. Самчук, І. В. Савюк // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Вип. № 4(68). – 2014. – С. 242–249.
4. Рудь В. Д. Перспективні можливості отримання нових пористих проникливих матеріалів з використанням природних мінералів / В. Д. Рудь, Л. М. Самчук, Ю. С. Повстяна // Галузеве машинобудування, будівництво. – Вип. 2(41). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С. 192–197.
5. Рудь В. Д. Аналіз дослідження властивостей сапонітової глини / Рудь В. Д., Самчук Л. М., Савюк І. В., Повстяна Ю. С. // Технологічний аудит та резерви виробництва. Технології харчової, легкої та хімічної промисловості. – Вип. № 1/4 (21). – Харків, 2015. – С. 54–57.
6. Lombardo S.J. Pressure Distribution during Binder Burnout in Three-Dimensional Porous Ceramic Bodies with Anisotropic Permeability / S.J. Lombardo, Z.C. Feng // J. Mat. Res. – 17. – 2002. – Pp. 1434–1440.
7. Lombardo S.J. Determination of the Minimum Time for Binder Removal and Optimum Geometry for Three-Dimensional Porous Green Bodies / S.J. Lombardo and Z.C. Feng // J. Am. Ceram. Soc. – 2003. – 6 [12]. – Pp. 2087–2092.

8. Onoda G. Theoretical Strength of Dried Green Bodies with Organic Binders / G. Onoda // J. Am. Ceram. Soc. – 59 [5]. – 1976. – Pp. 236-239.
9. Ree T. Rheology / T. Ree, H. Eyring. – Vol. II. – New York : Academic Press Publ. – 1958. – Pp. 83–144.
10. Sachanandani R. Modeling of green body strength, internal pressure, and stress in porous ceramic bodies during thermal debinding / R. Sachanandani, S. J. Lombardo // Journal of Ceramic Processing Research, 2011. – Vol. 12, no. 1. – Pp. 5-11.

#### REFERENCES

1. Aleksyuk M.M. *Metod prognozirovaniya prochnosti poristoj keramiki* [Prediction method of porous ceramics strength]. *Problemy prochnosti* [Problems of strength]. 2001, no. 2, pp. 130–136. (in Russian).
2. Dashkova T.S., Gluhovs'kij V.V., Gluhovs'kij I.V. and Swiders'kij V.A. *Zalezhnist' ekspluatacijnih harakteristik virobiv na osnovi neorganichnih v'yazhuchih vid parametriv presuvannya* [Dependence of the performance of products based on inorganic binders parameters of extrusion]. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "HPI"* [Proceedings of the National Technical University "KPI"]. Kharkov : NTU "HPI" Publ., 2012, no. 32, pp. 149–158. (in Ukrainian).
3. Rud' V.D., Povstyana Yu.S., Samchuk L.M. and Savyuk I.V. New porous penetrating material. *Visnik Nacional'nogo universitetu vodnogo gospodarstva ta prirodokoristuvannya* [Proceedings of the National University of Water and Environment]. Vol. no. 4 (68), 2014, pp. 242–249. (in English).
4. Rud' V.D., Samchuk L.M. and Povstyana Yu.S. *Perspektivni mozhlivosti otrimannya novih poristih proniklivih materialiv z vikoristannyam prirodni mineraliv* [Promising opportunities for penetrating new porous materials using natural minerals]. *Galuzeve mashinobuduvannya, budivnictvo*. [Sector engineering, construction]. Poltava : PoltNTU Publ., 2014, vol. 2 (41), pp. 192–197. (in Ukrainian).
5. Rud' V.D., Samchuk L.M., Savyuk I.V. and Povstyana Yu.S. *Analiz doslidzhennya vlastivostej saponitovoï glini* [Analysis study of the properties of saponite clay]. *Tehnologichnij audit ta rezervi virobництва. Tehnologii harchovoï, legkoï ta himichnoï promislivosti* [Technology audits and reserves production. Technology food, light and chemical industries]. Kharkov, vol. no. 1/4 (21), 2015, pp. 54–57. (in Ukrainian).
6. Lombardo S.J. and Feng Z.C. Pressure Distribution during Binder Burnout in Three-Dimensional Porous Ceramic Bodies with Anisotropic Permeability. *J. Mat. Res.*, 17, 2002, pp. 1434-1440
7. Lombardo S.J. and Feng Z.C. Determination of the Minimum Time for Binder Removal and Optimum Geometry for Three-Dimensional Porous Green Bodies, *J. Am. Ceram. Soc.*, 2003, 6 [12], pp. 2087-2092.
8. Onoda G. Theoretical Strength of Dried Green Bodies with Organic Binders. *J. Am. Ceram. Soc.*, 59 [5], 1976, pp. 236-239.
9. Ree T. and Eyring H. *Rheology*. New York : Academic Press Publ., vol. II, 1958, pp. 83–144.
10. Sachanandani R. and Lombardo S.J. Modeling of green body strength, internal pressure, and stress in porous ceramic bodies during thermal debinding. *Journal of Ceramic Processing Research*, 2011, vol. 12, no. 1, pp. 5-11.

*Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. В. М. Мельником (Україна); д-ром техн. наук, доц. І. Є. Андрущак (Україна)*

Надійшла до редколегії 22.02.2016

Прийнята до друку 02.03.2016