

Л. П. ЩУКИНА, Я. О. ГАЛУШКА, Л. О. ЯЩЕНКО, С. Л. ЛИГЕЗИН

ПРОГНОЗНА ОЦІНКА ТЕПЛОЗАХИСНИХ І МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙНО–ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Пропонується комплексний підхід до визначення раціональної конструкції виробів стінової кераміки на основі моделювання їх поведінки в умовах експлуатації, який використано при розробці технології поризованої конструкційно–теплоізоляційної будівельної кераміки для енергозберігаючого будівництва. Для двох моделей пористо–пустотелих керамічних виробів з поризованим каркасом (40 % пустот) і щільним каркасом (60 % пустот) проведена прогнозна оцінка їх теплозахисних і механічних властивостей. Розрахунками еквівалентного коефіцієнту теплопровідності моделей на основі закону Фур'є встановлено, що при зменшенні пустотності виробів з поризованою стінкою коефіцієнт їх теплопровідності знижується на 12 %, що покращує теплозахисні властивості. За результатами комп'ютерно–імітаційного 3D–моделювання поведінки моделей під дією статичних силових навантажень визначено, що поризація керамічного каркасу виробів за їх меншої пустотності приводить до деградації механічної міцності майже пропорційно зниженню пустотності. Проаналізовано напружено–деформований стан 3D–моделей керамічних структур з різною геометрією пор (сферичні, глобулярні, еліпсоїдні) і показано, що напрути концентруються в контактних зонах керамічної матриці з порами, а найбільш міцною є структурна модель зі сферичними порами. Показана доцільність організації такої структури, необхідність зміцнення керамічної матриці матеріалів та локальних зон, оточуючих пори як найбільш уразливих структурних ділянок. Результати прогнозних розрахунків експериментально підтверджені при розробці технології конструкційно–теплоізоляційних керамічних матеріалів композиційного типу на основі легкоплавкого суглинку та зольних мікросфер, які забезпечували задану структурну картину керамічного матеріалу.

Ключові слова: конструкційно–теплоізоляційна будівельна кераміка; пустотність; теплопровідність; механічна міцність; пориста структура; геометрія пор; комп'ютерно–імітаційне моделювання

Л. П. ЩУКИНА, Я. О. ГАЛУШКА, Л. А. ЯЩЕНКО, С. Л. ЛИГЕЗИН

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННО–ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Предлагается комплексный подход к определению рациональной конструкции изделий стеновой керамики на основе моделирования их поведения в условиях эксплуатации, который использован при разработке технологии конструкционно–теплоизоляционной строительной керамики для энергосберегающего строительства. Для двух моделей пористо–пустотелых керамических изделий с поризованным каркасом (40 % пустот) и плотным каркасом (60 % пустот) проведена прогнозная оценка их теплозащитных и механических свойств. Расчетами эквивалентного коэффициента теплопроводности моделей на основе закона Фурье установлено, что при уменьшении пустотности изделий с поризованной стенкой коэффициент их теплопроводности снижается на 12 %, что улучшает теплозащитные свойства. На основе результатов компьютерно–имитационного моделирования поведения моделей под действием статических силовых нагрузок определено, что поризация керамического каркаса изделий приводит к деградации механической прочности почти пропорционально снижению пустотности. Проанализировано напряженно–деформационное состояние 3D–моделей керамических структур с разной геометрией пор (сферические, глобулярные, эллипсоидные) и показано, что напряжения концентрируются в контактных зонах керамической матрицы с порами, а наиболее прочной является структурная модель со сферическими порами. Показана целесообразность организации такой структуры, необходимость упрочнения керамической матрицы материалов и зон, окружающих поры, как наиболее уязвимых структурных участков. Результаты прогнозных расчетов экспериментально подтверждены при разработке технологии конструкционно–теплоизоляционных керамических материалов композиционного типа на основе легкоплавкого суглинка и зольных микросфер, которые обеспечивают заданную структурную картину керамического материала.

Ключевые слова: конструкционно–теплоизоляционная строительная керамика; пустотность; теплопроводность; механическая прочность; пористая структура; геометрия пор; компьютерно–имитационное моделирование

L. P. SHCHUKINA, YA. O. HALUSHKA, L. O. YASHCHENKO, S. L. LIHEZIN

FORECAST EVALUATION OF HEAT PROTECTION AND MECHANICAL PROPERTIES OF INSULATING CONSTRUCTION CERAMIC MATERIALS

An integrated approach to determine the rational design of wall ceramic products based on modeling their behavior under operating conditions is proposed. This approach was used in the development of technology for heat–efficient insulating construction ceramic materials for energy–saving construction. For two models of porous–hollow ceramic products with a porous frame (40 % of voids) and a dense frame (60 % of voids), a predictive assessment of their heat–shielding and mechanical properties was carried out. Calculations of the equivalent coefficient of thermal conductivity of models based on Fourier's law established that with a decrease in the voidness of products with a porous wall, the coefficient of their thermal

© Л. П. Щукіна, Я. О. Галушка, Л. О. Ященко, С. Л. Лігезін, 2021

conductivity decreases by 12 %, which improves the heat-shielding properties. Based on the results of computer simulation of the behavior of models under the influence of static power loads, it was determined that porosity of the ceramic framework of products leads to degradation of mechanical strength almost proportionally to a decrease in voidness. The stress-strain state of 3D models of ceramic structures with different pore geometry (spherical, globular, ellipsoidal) is analyzed and it is shown that stresses are concentrated in the contact zones of a ceramic matrix with pores. It is shown that the most durable is the structural model with spherical pores. The expediency of organizing such a structure, the need to strengthen the ceramic matrix of materials and zones surrounding the pores, as the most vulnerable structural sites, is shown. The results of predictive calculations have been experimentally confirmed in the development of technology for structural and heat-insulating composite-type ceramic materials based on low-melting loam and ash microspheres, which provide a given structural picture of the ceramic material.

Keywords: heat-efficient insulating construction ceramics; voids; thermal conductivity; mechanical strength; porous structure; pore geometry; computer simulation

Вступ. В Україні діє Державна цільова економічна програма енергоефективності, яка передбачає заходи по скороченню енергоспоживання і доведення їх до рівня європейських стандартів у різних сферах, у тому числі будівництві. У зв'язку з цим актуальним є виробництво теплоефективної стінової кераміки як для малоповерхового, так і багатоповерхового каркасного будівництва. Такі вироби у вигляді пустотілих керамічних каменів виконують функцію конструкційно-теплоізоляційного стінового матеріалу і можуть використовуватися у комбінованих стінових системах та у зовнішніх стінах без утеплення при зведенні енергозберігаючих, енергоефективних та енергопасивних будинків [1].

На сьогодні простежується тенденція до виробництва керамічних каменів з тонкими внутрішніми перегородками і складною картиною пустотності, що пояснюється прагненням до покращення тепло- і звукоізоляції стін. Виробники ставлять в залежність звукоізоляцію виробів від геометрії пустот, а їх теплопровідність – від пустотності виробів. В той же час дослідженнями авторів [2] при випробуваннях пустотілої кераміки у фрагменті стіни було визначено, що теплопровідність не знаходиться в прямій залежності від пустотності. Це пояснюється частковим заповненням пустот виробу будівельним розчином при кладці з відповідним підвищенням коефіцієнту теплопровідності (λ). До того ж висока пустотність виробів суттєво ускладнює технологію кладки та знижує її міцність [3], а також висуває жорсткі вимоги до пластичності керамічних мас, яка має бути більше 15. Варто також зазначити, що процес формування виробів складного профілю потребує застосування потужних пресів з екструзійними системами складної конструкції з рамами та кернами з коштовних легованих сталей, твердих сплавів, зносостійкої кераміки тощо, що підвищує вартість робочих органів пресу і самого пресу. Крім цього, екструзія виробів відбувається з більшим пресовим зусиллям для виробів більшої пустотності, що збільшує питомі витрати енергії на формування, а неминуче зменшення частоти обертання шнека знижує продуктивність пресу [4].

Все вищезначене приводить до висновку, що зниження теплопровідності виробів тільки за рахунок пустотності не є виправданим з інженерно-будівельної точки зору та не вигідно з позиції використовуюваного пресового обладнання, яке потребує великих капіталовкладень. В умовах вітчизняного сировинного і ресурсного потенціалу зниження теплопровідності виробів доцільно досягати комбінованим способом шляхом зменшення пустотності та організації заданої пористої структури керамічного каркасу виробу.

Мета роботи. При розробленні технології поризованих конструкційно-теплоізоляційних керамічних виробів зменшеної пустотності важливим є прогнозування їх теплозахисних і механічних властивостей, а також тенденцій їх зміни залежно від конструкції виробу і пористості керамічної стінки, що й було метою даного дослідження.

Основна частина. Для досягнення поставленої мети авторами роботи були проаналізовані дві різні моделі керамічних виробів з однаковими розмірами: модель 1 з пустотністю 60 % та непоризованою стінкою і модель 2 з пустотністю 40 % і пористою стінкою (50 %). Загальний вигляд моделей показаний на рис. 1).

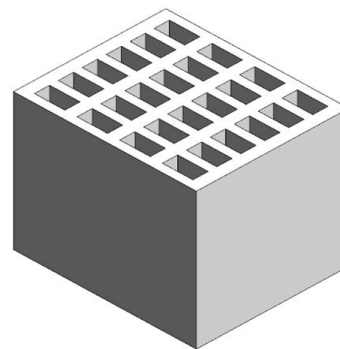


Рисунок 1 – Загальний вигляд моделі керамічного виробу
($l \times b \times h = 300 \times 250 \times 238$ мм)

Для порівняльного аналізу теплозахисних властивостей моделей був розрахований їх еквівалентний коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{екв}}$ з

такими допущеннями: λ щільного керамічного матеріалу становив 0,70 Вт/(м·К) (типовий для повнотілої цегли), λ поризованого матеріалу – 0,35 Вт/(м·К), λ повітря – 0,0257 Вт/(м·К). Розрахунок проводився з використанням закону теплопровідності Фур'є в інтегральній формі [5]:

$$P = \frac{\lambda_{\text{екв}} \cdot S}{\delta} \cdot \Delta T,$$

де P – тепловий потік, що проходить крізь бокову стінку моделі, Вт;

$\lambda_{\text{екв}}$ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності моделі в напрямку теплового потоку, Вт/(м·К);

S – площа бокової стінки моделі, крізь яку проходить тепловий потік, м²;

δ – відстань між боковими стінками моделі, м;

ΔT – різниця температур бокових стінок моделі, крізь які проходить тепловий потік, К.

Розрахунки показали, що зменшення пустотності модельних виробів на 20 % за умови пористої керамічної стінки не тільки не погіршує, але й покращує теплозахисні властивості моделі, зменшуючи коефіцієнт теплопровідності на 12 %. За умови меншої

теплопровідності поризованого матеріалу ця різниця є більш суттєвою. Це означає, що з точки зору теплопровідності за однакової геометрії пустот оптимальною конструкцією виробу є модель з поризованим керамічним каркасом і меншою пустотністю.

Менша пустотність зазвичай позитивно впливає на міцність виробів, проте в разі пористого керамічного каркасу може бути й навпаки. Тому на наступному етапі дослідження в програмному комплексі Ansys Workbench було проведено комп'ютерно-імітаційне 3D-моделювання поведінки обох моделей під дією статичних силових навантажень. Основною задачею такого моделювання було порівняння деформативно-міцнісних якостей моделей на основі аналізу їх напружено-деформованого стану під різним навантаженням. Для цього до них вертикально основі прикладали тиск, що варіювався від 3,5 МПа до значення, за якого виникали незворотні деформації, що свідчили про початок руйнування (див. рис. 2).

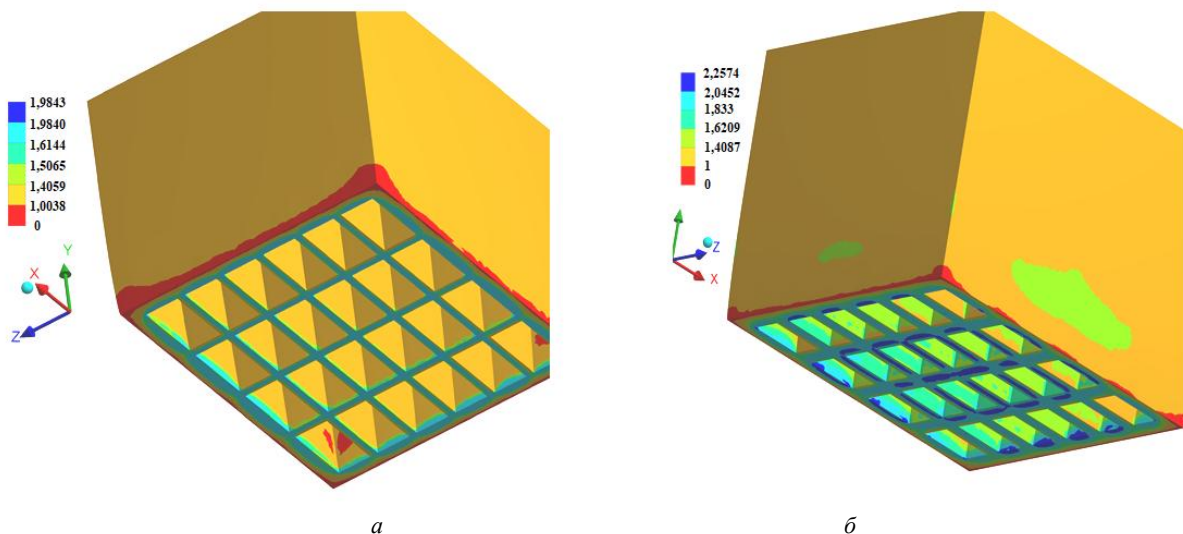


Рисунок 2 – 3D моделі виробів, які знаходяться під дією руйнівного механічного навантаження:

a – модель 1 під дією руйнівного навантаження 7 МПа; *б* – модель 2 під дією руйнівного навантаження 5,8 МПа

Як вихідні дані для розрахунку напружено-деформованого стану моделей використовували відомості про модулі пружності кераміки і середню густину моделей. За оціночний критерій міцності моделей був прийнятий їх коефіцієнт запасу міцності (1,4) по аналогії з його стандартним значенням, що використовується при проектуванні деталей машин та елементів споруд [6].

Рис. 2 ілюструє, що при переході від першої моделі до другої моделі критичне навантаження

зменшується на 18 %, що свідчить про певну деградацію механічної міцності. Найбільш уразливими ділянками виробів є їх кути, які завжди концентрують напруги, а тому були виключені з розгляду. Аналіз напружено-деформованого стану моделей в динаміці показав відмінний характер руйнування моделі 1 порівняно з моделлю 2. Так, за відносно невеликого тиску (4 МПа) модель 2 є міцнішою, про що свідчать більші площі зон з високим коефіцієнтом запасу міцності 1,87–2,3, в той

час як для моделі 1 приблизно 60 % площі стінок відповідає коефіцієнту запасу міцності 1,4–1,9. За тиску 5 МПа зовнішня поверхня стінок обох моделей характеризується коефіцієнтом запасу міцності 1,4–1,7, але їх внутрішня поверхня має більше ніж подвійний запас міцності теж у моделі 2. Подальше навантаження на модель 2 спричиняє суттєве збільшення площі деформаційних зон з коефіцієнтом запасу міцності менше 1,4, а її критичний стан спостерігається за тиску 5,8 МПа (рис. 2, б). Таку різницю в динаміці руйнування моделей можна пояснити, базуючись на результатах дослідження [7] тим, що пористі матеріали руйнуються подібно до пластичних з поступовим накопиченням дефектів. При навантаженні виробу з пористою стінкою в ньому утворюються й накопичуються множинні осередки напруг, викликані наявністю чисельних границь розподілу фаз «пора–кераміка». При цьому руйнівне навантаження для щільних матеріалів більше ніж для пористих: критичне навантаження для моделі 1 з щільною керамічною стінкою складо 7 МПа, а для моделі 2 з пористою стінкою – 5,8 МПа. Формування зон найбільш вірогідного руйнування моделей з неприйнятним коефіцієнтом запасу міцності (менше 1,4) відбувається в площині, перпендикулярній вісі прикладення навантаження, що

характерно для матеріалів з відносно невеликою міцністю [8]. Отримані результати приводять до висновку, що пустотілі керамічні вироби з пористою стінкою, незважаючи на поступовий характер руйнування, мають меншу механічну міцність і для покращення їх деформаційно–міцнісних якостей необхідно зміцнювати власне керамічний матеріал і зони керамічної матриці, оточуючі пори.

Якщо міцність керамічного матеріалу знаходиться в прямій залежності від температури випалу і виду використаної глинистої сировини, то локальна міцність зон, що межують з порами, – в першу чергу від форми пор. Тому наступний етап теоретичних досліджень був присвячений вивченню впливу геометрії пор на характеристики міцності керамічних структур. Для вирішення цієї задачі було використано систему автоматизованого проектування та інженерного аналізу SolidWorks Simulation, яка реалізує метод кінцевих елементів, що дозволяє створити імітаційні комп'ютерні моделі матеріалів, побудувати поля напружень в матеріалах при заданому рівні механічного навантаження на них, що є неможливим при прямому експериментальному аналізі. Було створено моделі пористих керамічних структур, які містять умовно ізотропний керамічний матеріал і пори різної форми (рис. 3).

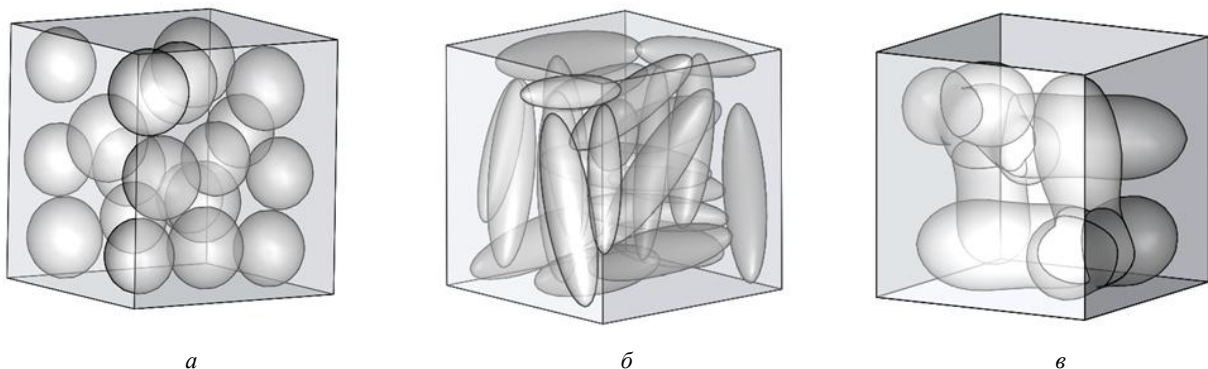


Рисунок 3 – Досліджувані моделі пористих керамічних структур:

a – модель зі сферичними порами; *б* – модель з еліпсоїдними порами; *в* – модель з глобулярними порами

При розрахунках в програмі SolidWorks Simulation закладалися такі основні параметри моделей: загальна пористість 40 % (помірно пориста структура), хаотичне розташування пор, приблизно однаковий їх розмір. Для сферичних пор діаметр (d) становив 0,07–0,1 мм, для еліпсоїдних і глобулярних – $d_1 = 0,07–0,1$ мм, $d_2 = 0,3–0,4$ мм. Навантаження моделей відповідали реальному тиску декількох рядів виробів на один нижній ряд кладки за рівномірно розподіленого тиску і становили 10 МПа і 12,5 МПа.

При розрахунках використовувався критерій руйнування матеріалів Писаренка–Лебедева, що є коректним для оцінки міцності крихких структурно неоднорідних матеріалів, до яких відноситься пориста кераміка. Даний критерій характеризує тиск, віднесений до об'єму зразка, та являє собою критичне навантаження, що викликає руйнування структури [9, 10]. Для прикладу результати моделювання керамічної структури зі сферичними порами у вигляді 3D моделі з епюрами розподілу напруг під дією

механічного навантаження 10 МПа наведені на рис. 4.

На рис. 4 кольором у червоно–помаранчевій частині спектру виділені структурні зони, в яких напруги перевищують критичну міцність 10 МПа. Там же наведений об'єм структури, який буде руйнуватися при перевищенні критичної міцності. Результати моделювання поведінки пористих керамічних структур під дією механічного навантаження показали, що зі зростанням навантаження на моделі (з 10 МПа до 12,5 МПа) в них виникає набагато більше напруг, які відповідають рівню критичної міцності 10 МПа, і моделі суттєво втрачають свою міцність. Для усіх трьох моделей об'єм «зруйнованих» структурних елементів при зміні

тиску з 10 МПа до 12,5 МПа збільшується майже в чотири рази. Але за різного навантаження мінімальний об'єм елементів структури, в яких напруги перевищили критичну міцність, характерний для моделі зі сферичними порами (у 1,25 рази менше, ніж у моделей з іншим типом пор). Важливо також звернути увагу, що критичні напруги виникають в контактній зоні керамічної матриці з порами, які є найбільш уразливими структурними ділянками. З цього можна зробити висновок, що для збільшення механічної міцності поризованих керамічних матеріалів слід створювати в ньому сферичні пори та зміцнювати локальні зони, що оточують пори.

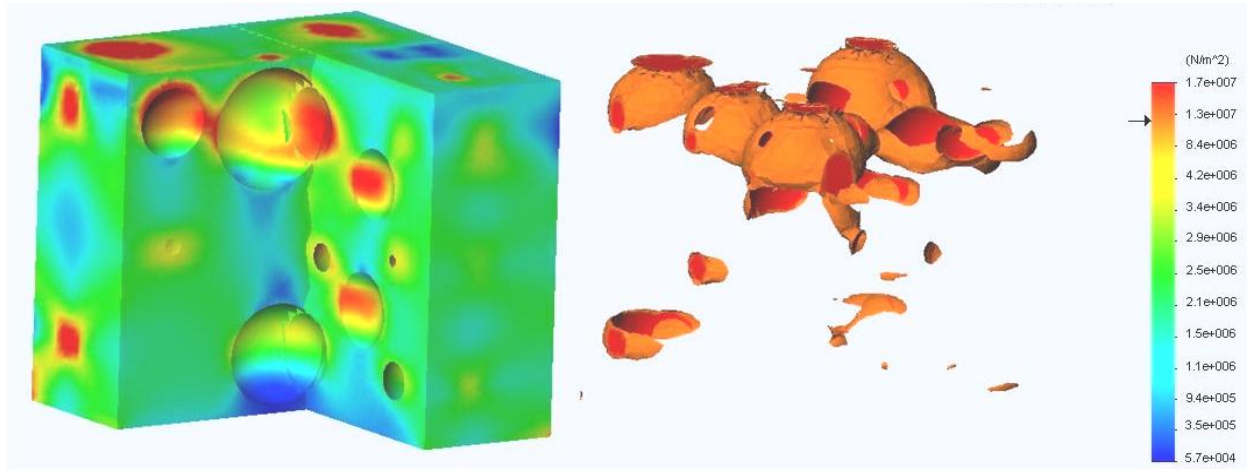


Рисунок 4 – 3D–модель керамічного матеріалу зі сферичними порами в напружено–деформованому стані

Базуючись на результатах проведених прогностичних розрахунків, авторами були розроблені керамічні матеріали з організованою пористою структурою з використанням легкотопкого суглинку та різних пороутворюючих агентів, в тому числі продуктів переробки зол уносу, які містили мікросфери, що забезпечували задану сферичну форму пор. Закономірності зміни властивостей розроблених керамічних матеріалів підтвердили результати теоретичних розрахунків та експериментально довели необхідність організації структур зі сферичними порами та зміцнення контактної зони «керамічна матриця–зольна мікросфера» для покращення механічної міцності поризованої стінової кераміки [11, 12].

Висновки. Аналіз напрямків вдосконалення сучасної конструкційно–теплоізоляційної будівельної кераміки і вивчення взаємозв'язку «пустотність–теплопровідність» показав, що в умовах вітчизняного сировинно–ресурсного потенціалу зниження теплопровідності доцільно досягати шляхом організації пористої структури керамічного каркасу

виробів при їх зменшеній пустотності. Розрахунки коефіцієнтів теплопровідності моделей виробів з пустотністю 40 % і 60 %, які мають поризовану і щільну стінку, продемонстрували, що зменшення пустотності за умови пористої керамічної стінки покращує теплозахисні властивості виробів і знижує коефіцієнт теплопровідності на 12 %.

Проведена теоретична оцінка деформативно–міцнісних якостей моделей з різною пустотністю та геометрією пор на основі аналізу їх напружено–деформованого стану під різним навантаженням з використанням комп'ютерно–імітаційного 3D моделювання. Визначені технологічні принципи отримання поризованої конструкційно–теплоізоляційної будівельної кераміки, які в основному полягають в наступному:

– для організації найбільш сприятливої структурної картини поризованого керамічного матеріалу і збільшення його механічної міцності слід створювати в ньому максимальну кількість пор сферичної форми за підпорядкованої кількості глобулярних і мінімізувати можливість утворення пор

еліпсоїдного типу;

– для покращення деформативно–міцнісних якостей виробів з пористою керамічною стінкою необхідно зміцнювати як власне керамічний матеріал (міжпорові ділянки), так і локальні зони керамічної матриці, що оточують пори, як найбільш уразливі ділянки структури поризованої кераміки.

Використання даних рекомендацій в технології конструкційно–теплоізоляційної будівельної кераміки дозволить отримувати сучасну стінову кераміку збільшеної теплоефективності та сприятиме економії енергоносіїв при використанні таких виробів у будівництві.

Список літератури

1. Опекунов В. В. От энергосберегающих к комфортным энергопассивным домам. Керамика: наука і життя. 2016. № 1(30). С. 20–33.
2. Besedin P. V., Ivleva I. A., Mos'pan V. I. Heat-Efficient Composite Wall Material. Glass and Ceramics. 2005. Vol. 62. Iss. 3–4. P. 87–88.
3. Котляр В. Д., Устинов А. В., Ковалев В. Ю., Терехина Ю. В., Котляр А. В. Керамические камни компрессионного формования на основе опок и отходов углеобогащения. Строительные материалы. 2013. № 4. С. 44–46.
4. Кондратенко В. А. Керамические стеновые материалы: оптимизация их физико–технических свойств и технологических параметров производства. Москва: Композит, 2005. 512 с.
5. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Москва: Энергия, 1975. 448 с.
6. Чабан В. В., Жданова О. А., Піпа Б. Ф. Прикладна механіка. Ч. 1. Опір матеріалів. Київ: КНУТД, 2008. 152 с.
7. Савченко Н. Л., Сабліна Т. Ю., Севостьянова И. Н., Буякова С. П., Кульков С. Н. Деформация и разрушение пористых хрупких материалов при различных схемах нагружения. Известия высших учебных заведений. 2015. Т. 58. № 11. С. 56–60.
8. Эшби М., Джонс Д. Конструкционные материалы: полный курс. Долгопрудный: Интеллект, 2010. 672 с.
9. Semenov A. A. Analysis of the strength of shell structures, made from modern materials, according to various strength criteria. Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2018. No. 1. P.16–33.
10. Fedorenko O. Yu., Bohdanova K. B., Fedorenko D. O., Lesnych N. F., Reheda N. M. Low-Melting Glass-Ceramic Bond Based on Oxide Compositions for Diamond-Abrasive Tools. Питання хімії та хімічної технології. 2019. № 3. P. 158–165.
11. Щукіна Л. П., Цовма В. В., Галушка Я. О., Міхєєнко Л. О.

Технологічні способи регулювання пористої структури і властивостей конструкційно–теплоізоляційних керамічних матеріалів. Технологический аудит и резервы производства. 2015. № 6/4 (26). С. 51–55.

12. Щукіна Л. П., Галушка Я. О., Савєнков А. С., Хлопицький О. О. Перспективи використання золотеріалів у виробництві конструкційно–теплоізоляційної кераміки. Питання хімії та хімічної технології. 2020. № 3(130). С. 215–224.

References (transliterated)

1. Opekunov V. V. Ot energosberegayuschih k komfortnyim energopassivnyim domam. Keramika: nauka i zhittya. 2016. № 1(30). S. 20–33.
2. Besedin P. V., Ivleva I. A., Mos'pan V. I. Heat-Efficient Composite Wall Material. Glass and Ceramics. 2005. Vol. 62. Iss. 3–4. – P. 87–88.
3. Kotlyar V. D., Ustinov A. V., Kovalev V. Yu., Terехina Yu. V., Kotlyar A. V. Keramicheskie kamni kompressionnogo formovaniya na osnove opok i othodov ugleobogasheniya. Stroitelnyie materialyi. 2013. № 4. S. 44–46.
4. Kondratenko V. A. Keramicheskie stenovyie materialyi: optimizatsiya ih fiziko–tehnikeskikh svoystv i tehnologicheskikh parametrov proizvodstva. Moskva: Kompozit, 2005. 512 s.
5. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Teploperedacha. Moskva: Energiya, 1975. 448 s.
6. Chaban V. V., Zhdanova O. A., Pipa B. F. Prikladna mehanika. Ch. 1. Opir materialiv. Kiyiv: KNUVD, 2008. 152 s.
7. Savchenko N. L., Sablina T. Yu., Sevostyanova I. N., Buyakova S. P., Kulkov S. N. Deformatsiya i razrushenie poristyyih hrupkih materialov pri razlichnyih shemah nagruzheniya. Izvestiya vysshih uchebnyih zavedeniy. 2015. T. 58. № 11. S. 56–60.
8. Eshbi M., Dzhons D. Konstruktsionnyie materialyi: polnyiy kurs. Dolgoprudnyiy: Intellect, 2010. 672 s.
9. Semenov A. A. Analysis of the strength of shell structures, made from modern materials, according to various strength criteria. Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2018. No. 1. P.16–33.
10. Fedorenko O. Yu., Bohdanova K. B., Fedorenko D. O., Lesnych N. F., Reheda N. M. Low-Melting Glass-Ceramic Bond Based on Oxide Compositions for Diamond-Abrasive Tools. Pitannya himiyi ta himichnoyi tehnologiyi. 2019. № 3. R. 158–165.
11. Schukina L. P., Tsovma V. V., Galushka Ya. O., Miheenko L. O. Tehnologichni sposobi reguluvannya poristoyi strukturi i vlastivostey konstruktsiyno–teploizolyatsiyinih keramichnih materialiv. Tehnologicheskii audit i rezervyi proizvodstva. 2015. № 6/4 (26). С. 51–55.
12. Schukina L. P., Galushka Ya. O., Savenkov A. S., Hlopitskiy O. O. Perspektivi vikoristannya zolomaterialiv u virobnitstvi konstruktsiyno–teploizolyatsiynoyi keramiki. Pitannya himiyi ta himichnoyi tehnologiyi. 2020. № 3(130). S. 215–224.

Надійшла (received) 18.03.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Щукіна Людмила Павлівна (Щукина Людмила Павловна, Shchukina Liudmyla Pavlivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; тел.: +38(057) 707–64–82; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5817-4279>; e-mail: shchlp2016@gmail.com

Галушка Ярослав Олегович (Галушка Ярослав Олегович, Halushka Yaroslav Olegovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; тел.: +38(057) 707–64–82; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1696-6769>; e-mail: yaroslavgalushka@gmail.com

Яценко Лариса Олександрівна (Яценко Лариса Александровна, Yashchenko Larisa Oleksandrivna) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри безпеки праці та навколишнього середовища; м. Харків, Україна; тел.: +38(057) 707–64–65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4939-1244>; e-mail: mla72@ukr.net

Лігезін Станіслав Леонідович (Лигезин Станислав Леонидович, Lihezin Stanislav Leonidovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; тел.: +38(057) 707–64–82; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1097-1594>; e-mail: akademikligezin@gmail.com.