

*Т. Е. РИМАР, О. В. СУВОРИН*

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ КОМПОЗИЦІЙНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ РІДКОГО СКЛА, ОТРИМАНИХ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНО–БЕЗПЕЧНИХ НВЧ ТЕХНОЛОГІЙ**

Підвищення ефективності використання енергоресурсів є одним з головних завдань в хімічній промисловості не лише в Україні, але і у всьому світі, що пов'язано з неухильним зростанням цін на енергоносії. У зв'язку з цим, ефективним способом економії енергоресурсів є термомодернізація споруд, промислового устаткування і комунікацій за допомогою теплоізоляційних матеріалів. Слід зазначити, що частка вітчизняних матеріалів на українському ринку становить не більше 30 %. Тому створення нових видів теплоізоляційних матеріалів є достатньо актуальним завданням. Таким матеріалом є теплоізоляційний матеріал на основі рідкого скла, створений із залученням мікрохвильового випромінювання в якості альтернативи традиційному конвективному тепловому нагріву. Технологія виробництва теплоізоляційних матеріалів на основі рідкого скла шляхом гарячого спіновання передбачає отримання матеріалу у формі гранул, а не плит, через труднощі рівномірного прогрівання внутрішніх шарів великорозмірних зразків. Проблема крупномасштабного виробництва якісних теплоізоляційних матеріалів на основі рідкого скла в плитній формі не розв'язана внаслідок поганого прогрівання внутрішніх шарів плити через низьку теплопровідність зовнішніх шарів, що спучилися. Саме тому виготовлення композиційних теплоізоляційних матеріалів на основі гранульованого наповнювача і рідкоскляного зв'язуючого пропонується проводити під дією НВЧ випромінювання. Теплоізоляційні властивості спучених матеріалів безпосередньо визначаються їх макроструктурою. Тому метою даного дослідження є визначення змін в структурі матеріалу від типу і кількості застосовуваних інгредієнтів рідкоскляної композиції. На підставі проведених досліджень показано, що найбільш впорядковану структуру мають матеріали з використанням, як наповнювача оксиду цинку і як газоутворювача пероксиду водню. Встановлено, що застосування їх у кількості по 9–10 мас.ч забезпечує таку швидкість виділення газу й росту центрів пір, яка порівнянна із процесом отвердження композиції, що дозволяє отримати матеріали з однорідною, дрібно– та закритопористою структурою, яка забезпечує високі теплоізоляційні властивості виробів з коефіцієнтом теплопровідності 0,05–0,055 Вт/м·К, що задовольняє вимогам до теплоізоляційних матеріалів.

**Ключові слова:** композиційні теплоізоляційні матеріали, рідке скло, структура, поперечний діаметр пір, коефіцієнт форми пір, ступінь неоднорідності структури, загальна пористість, доля закритих пір.

*Т. Э. РЫМАР, А. В. СУВОРИН*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СТЕКЛА, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЕКОЛОГИЧНО–БЕЗОПАСНЫХ СВЧ ТЕХНОЛОГИЙ**

Повышение эффективности использования энергоресурсов является одной из главных задач в химической промышленности не только в Украине, но и во всем мире, что связано с неуклонным ростом цен на энергоносители. В связи с этим, эффективным способом экономии энергоресурсов является термомодернизация сооружений, промышленного оборудования и коммуникаций с помощью теплоизоляционных материалов. Следует отметить, что доля отечественных материалов на украинском рынке составляет не более 30 %. Поэтому создание новых видов теплоизоляционных материалов является достаточно актуальной задачей. Таким материалом является теплоизоляционный материал на основе жидкого стекла, созданный с использованием микроволнового излучения, в качестве альтернативы традиционному конвективному тепловому нагреву. Технология производства теплоизоляционных материалов на основе жидкого стекла путем горячего вспенивания предусматривает получение материала в форме гранул, а не плит, из-за трудностей равномерного прогревания внутренних слоев крупноразмерных образцов. Проблема крупномасштабного производства качественных теплоизоляционных материалов на основе жидкого стекла в плитной форме не решена вследствие плохого прогрева внутренних слоев плиты из-за низкой теплопроводности вспученных внешних слоев. Именно поэтому изготовление композиционных теплоизоляционных материалов на основе гранулированного наполнителя и жидкостекляного связующего предлагается проводить под действием СВЧ излучения. Теплоизоляционные свойства вспученных материалов непосредственно определяются их макроструктурой. Поэтому целью данного исследования является определение изменений в структуре материала от типа и количества используемых ингредиентов жидкостекляной композиции. На основе проведенных исследований показано, что наиболее упорядоченную структуру имеют материалы с использованием, в качестве наполнителя оксида цинка и газообразователя пероксида водорода. Установлено, что применение их в количестве по 9–10 мас.ч обеспечивает такую скорость выделения газа и роста центров пор, которая сравнима с процессом отверждения композиции, что позволяет получить материалы с однородной, мелко– и закрытопористой структурой, обеспечивая высокие теплоизоляционные свойства изделий с коэффициентом теплопроводности 0,05–0,055 Вт / м · К, что удовлетворяет требованиям к теплоизоляционным материалам.

**Ключевые слова:** композиционные теплоизоляционные материалы, жидкое стекло, структура, поперечный диаметр пор, коэффициент формы пор, степень неоднородности структуры, общая пористость, доля закрытых пор.

© Т. Е. Римар, О. В. Суворин, 2021

T. RYMAR, O. SUVORIN

## RESEARCH OF PROCESSES OF FORMATION OF STRUCTURE OF COMPOSITE THERMAL INSULATION MATERIALS ON THE BASIS OF LIQUID GLASS BTAINED WITH THE USE OF ENVIRONMENTALLY SAFE MICROWAVE TECHNOLOGIES

Improving the efficiency of energy use is one of the main tasks in the chemical industry not only in Ukraine but also around the world, which is due to the steady rise in energy prices. In this regard, an effective way to save energy is the thermal modernization of buildings, industrial equipment and communications with thermal insulation materials. It should be noted that the share of domestic materials in the Ukrainian market is not more than 30 %. Therefore, the creation of new types of insulation materials is a very important task. This material is a heat-insulating material based on liquid glass, created with the involvement of microwave radiation as an alternative to traditional convective thermal heating. The technology of production of heat-insulating materials on the basis of liquid glass by hot foaming involves obtaining the material in the form of granules, not plates, due to the difficulty of uniform heating of the inner layers of large samples. The problem of large-scale production of high-quality thermal insulation materials based on liquid glass in plate form is not solved due to poor heating of the inner layers of the plate due to the low thermal conductivity of the swollen outer layers. That is why the production of composite thermal insulation materials based on granular filler and liquid glass binder is proposed to be carried out under the action of microwave radiation. Thermal insulation properties of expanded materials are directly determined by their macrostructure. Therefore, the purpose of this study is to determine changes in the structure of the material from the type and amount of ingredients used in the liquid glass composition. On the basis of the conducted researches it is shown that the materials with use as a filler of zinc oxide and as a gas-forming agent of hydrogen peroxide have the most ordered structure. It is established that their use in the amount of 9–10 wt.h. provides a rate of gas evolution and growth of pore centers, which is comparable to the process of curing composition, which allows to obtain materials with a homogeneous, fine and closed-porous structure, which provides high insulating properties with a thermal conductivity coefficient of 0.05–0.055 W / m · K, which meets the requirements for thermal insulation materials.

**Keywords:** composite thermal insulation materials, liquid glass, structure, transverse pore diameter, pore shape coefficient, degree of structure heterogeneity, total porosity, proportion of closed pores.

**Вступ.** Підвищення ефективності використання енергоресурсів є одним з головних завдань в хімічній промисловості не лише в Україні, але і у всьому світі, що пов'язано з неухильним зростанням цін на енергоносії. У зв'язку з цим, ефективним способом економії енергоресурсів є термомодернізація споруд, промислового устаткування і комунікацій за допомогою теплоізоляційних матеріалів.

Теплоізоляційними називають матеріали, які застосовують у будівництві житлових і промислових будівель, теплових агрегатів і трубопроводів з метою зменшити теплові втрати в доквілля. Теплоізоляційні матеріали характеризуються пористою будовою і, як наслідок цього, малою щільністю (не більше 600 кг/м<sup>3</sup>) і низькою теплопровідністю (не більше 0,18 Вт/(м·°C) [1].

Від якості теплоізоляції будівлі залежить кількість енергії, необхідної для його обігріву в холодну пору року. Раніше роль теплоізоляційних матеріалів виконували будівельні матеріали, які є одночасно несучими конструкціями будівлі – дерево, цегла, бетон. При зростанні вартості енергоносіїв роль теплоізоляції стала зростати, так як поступово стало очевидно, що неможливо збільшувати теплоізоляцію будівлі виключно за рахунок збільшення товщини будматеріалів.

Теплоізоляція дозволяє знизити витрати на опалення і захистити навколишнє середовище. Використання теплоізоляційних матеріалів дозволяє зменшити товщину і масу стін та інших огорожу-

вальних конструкцій, знизити витрату основних конструкційних матеріалів, зменшити транспортні витрати і відповідно знизити вартість будівництва. Поряд з цим при скороченні втрат тепла опалювальними будівлями зменшується витрата палива [2].

Останніми роками спостерігається інтенсивне зростання обсягів виробництва і споживання теплоізоляційних матеріалів. Теплоізоляційні матеріали займають значну частину ринку будівельних матеріалів, які використовуються для внутрішнього і зовнішнього утеплення будівель [3].

Номенклатура цієї продукції складається з наступних груп: мінеральна вата і вироби з неї (мати і плити мінераловатні, різного виду утеплювачі); теплоізоляційні матеріали із скловолокна; будівельні теплоізоляційні пінопласти; теплоізоляційні пінобетони; полімерна крихта й інша теплоізоляція [4].

Слід зазначити, що частка вітчизняних матеріалів на українському ринку становить не більше 30 %. При цьому українські виробники сильні позиції займають тільки у випуску пінополістиролу та інших пінопластів [5]. Тому створення нових видів теплоізоляційних матеріалів є достатньо актуальним завданням. Таким матеріалом є теплоізоляційний матеріал на основі рідкоскляного грануляту і зв'язуючого також на основі рідкого скла, створений із залученням мікрохвильового випромінювання в якості альтернативи традиційному конвективному тепловому нагріву.

В останні роки велика увага приділяється спученим теплоізоляційним матеріалам на основі

неорганічних полімерів, зокрема, рідкого скла, так як ці матеріали, на відміну від традиційної органічної полімерної теплоізоляції володіють високою термостійкістю. Розрізняють спучені рідкоскляні матеріали, що представляють собою продукти спучування гідратованих розчинних стекл, і композиційні матеріали, що включають гранульоване спучене рідке скло [6–7] і зв'язуюче [8].

Технологія виготовлення композиційних матеріалів у вигляді виробів на основі гранульованих продуктів полягає у підготовці зв'язуючого (наприклад рідкого скла), приготуванні формувальної маси з гранул і зв'язуючого, формуванні виробу і створенні умов для швидкого отвердження зв'язуючого [9]. Однак внаслідок того, що омонолічування зв'язуючим відбувається за температури навколишнього середовища, такі матеріали мають невисоку міцність і водостійкість.

Технологія виробництва теплоізоляційних матеріалів на основі рідкого скла шляхом гарячого спінювання передбачає отримання матеріалу у формі гранул, а не плит, через труднощі рівномірного прогрівання внутрішніх шарів великорозмірних зразків [10]. Тому невирішеною частиною наукової проблеми є те, що нині не розв'язана проблема крупномасштабного виробництва якісних теплоізоляційних матеріалів на основі рідкого скла в плитній формі внаслідок поганого прогрівання внутрішніх шарів плити через низьку теплопровідність зовнішніх шарів, що спучилися. Саме тому виготовлення композиційних теплоізоляційних матеріалів на основі гранульованого наповнювача і рідкоскляного зв'язуючого пропонується проводити під дією НВЧ випромінювання.

До переваг мікрохвильового нагріву можна віднести його об'ємність і безінерційність, тобто нагрів матеріалу здійснюється відразу за усім об'ємом, що забезпечує відсутність або виникнення незначних температурних градієнтів у шарі матеріалу; високий коефіцієнт перетворення мікрохвильової енергії в тепло; вибірковість нагріву, тобто здатність поглинати і конвертувати мікрохвильову енергію в тепло [11].

Мікрохвильові технології, обладнання, а також отриманий з їх застосуванням продукт є екологічно чистими, тому що майже відсутні викиди в атмосферу шкідливих речовин. Мікрохвильова установка створює комфортні умови для обслуговуючого персоналу та не шкодить навколишньому середовищу.

**Мета роботи.** Теплоізоляційні властивості

спучених матеріалів безпосередньо визначаються їх макроструктурою. Тому метою проведення даного дослідження є визначення змін в структурі матеріалу від типу і кількості застосовуваних інгредієнтів рідкоскляної композиції.

**Викладення основного матеріалу.** При проведенні даного дослідження визначались середні розміри осередків матеріалу та його пористість відповідно до технічних умов СТБ 1338, 2002 – «Пенопласты жесткие полиуретановые и полиизоциануратные». Метод полягає в підрахунку кількості пір на певній геометричній площі зрізу пінопласту. Шляхом подальшого розрахунку середньої площі, займаною однією порою, визначаються її лінійні розміри.

Поперечний діаметр пір є розрахунковою величиною, що характеризує поперечний розмір усереднених пір еліпсоїдної або круглої форми, ідеально однорідного за структурою ячеїстого матеріалу, що найбільш близько відповідає реальному пінопласту по структурі і щільності.

Коефіцієнт форми пір – параметр, що відбиває ступінь витягнутості пір і визначається як відношення граничного розміру усередненої пори до її поперечного розміру.

При проведенні вимірів використовуюється масштабна сітка і мікроскоп Bresser LSD 50x–2000x.

Випробування може здійснюватися на зразку будь-якої форми і розмірів, що має зрізану плоску поверхню. Для визначення поперечного діаметру осередків зріз робиться в напрямі, перпендикулярному напрямку спінювання. При оцінці витягнутості осередків робиться додатковий зріз в напрямі, паралельному спінюванню. Поперечний діаметр пір розраховується за формулою:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{n \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{\rho_k}{\rho_m}\right)}, \quad (1)$$

де:  $D$  – поперечний діаметр пір, мм;

$S$  – площа зрізу на якій проводиться підрахунок пір,  $\text{см}^2$ ;

$n$  – число пір на площі  $S$ ;

$\rho_m$  – щільність полімерного матеріалу – основи пінопласту,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho_k$  – уявна щільність пінопласту,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

За остаточний результат  $D_{\text{ср}}$  приймається середнє арифметичне значень діаметру пір  $D$ , отриманих в різних місцях блоку.

Коефіцієнт форми пір  $\alpha$  після додаткового підрахунку кількості пір на деякій площі зрізу, паралельній площі спінювання, обчислюють за формулою:

$$\alpha = \frac{S_1 \cdot n}{n_1 \cdot S}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт форми пір;

$S_1$  – площа зрізу, паралельного спінюванню, на якій проводиться підрахунок пір,  $\text{см}^2$ ;

$n_1$  – кількість пір на площі  $S_1$ ;

$S$  і  $n$  – відповідно площа і кількість пір для зрізу, перпендикулярного спінюванню.

Оцінка ступеня неоднорідності структури пінопласту робиться по відносній зміні діаметру пір в різних місцях блоку і може бути виражена як:

$$K = \frac{\Delta D_{\text{ср}}}{D_i} \cdot 100, \quad (3)$$

$$\Delta D_i = D_i - D_{\text{ср}},$$

де  $\Delta D_{\text{ср}}$  – усереднене значення  $\Delta D_i$ ;

$D_i$  – індивідуальне значення  $D$  в різних місцях блоку.

Пористість ТІМ визначається за відсотковим вмістом закритих пір. Зразки для випробувань повинні мати форму куба з розмірами ребра  $50 \pm 0,5$  мм та рівну поверхню без видимих дефектів комірчастої структури і слідів механічної обробки. Перед випробуваннями зразки кондиціонують впродовж 24 год. при температурі  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Розрахунок відсоткового вмісту об'єму закритих пір визначають за формулою:

$$P_3 = P_{\text{П}} - P_{\text{В}}, \quad (4)$$

де  $P_{\text{В}}$  – загальний об'єм відкритих пір в зразку, %, приймається рівним об'єму водопоглинання, %;

$P_{\text{П}}$  – повний об'єм пір в зразку, %, обчислюють за формулою:

$$P_n = \left( 1 - \frac{\rho_{\text{к}}}{\rho_{\text{м}}} \right) \cdot 100. \quad (5)$$

**Обговорення результатів.** Одержання композиційних теплоізоляційних матеріалів (ТІМ) проводилось шляхом об'ємного омонолічування, тобто одночасним спученням гранульованого наповнювача і рідкоскляного зв'язуючого під дією НВЧ випромінювання, що дозволяє запобігти усадкових явищ, утворення тріщин, осідання піни і утворення великих пір, завдяки щільній упаковці гранул, які спікаються між собою і рівномірному розподілу спученого зв'язуючого, що заповнює міжгранульний простір [12]. При приготуванні зв'язуючого як наповнювачі були використані цемент та оксид цинку, як газоутворювачі – пероксид водню та гідрокарбонат

натрію. Для отримання однорідної і відтворюваної структури до складу рідкоскляної композиції (РСК) вводили поверхнево-активну речовину (ПАР) ОП-10, що забезпечує рівномірний розподіл газоутворюючого агента і наповнювача та підвищує стійкість піни.

Основні показники макроструктури композиційних ТІМ представлені в табл. 1.

З даних таблиці 1 і рис. 1 видно, що при вмісті в РСК цементу у кількості 10 мас.ч в'язкість композиції не є достатньою, щоб надати міцність міжпоровим стінкам спученого матеріалу, тому вони руйнуються, що призводить до об'єднання пір між собою і збільшення кількості порожнеч в матеріалі. Загальна пористість таких зразків 84–85 % з них 51–52 % приходить на долю закритих пір. Поперечний діаметр пір і ступінь неоднорідності структури в цьому випадку дорівнюють 0,7–0,8 мм і 13–14 % відповідно. Найбільш рівномірна структура, як видно з рисунка, спостерігається при вмісті цементу 20 мас.ч, показники поперечного діаметру пір і ступеня неоднорідності структури мають найменші значення і складають відповідно до 0,6–0,7 мм і 12–13 %, такі зразки мають також і найбільш закритопористу структуру (54–56 %). Надлишковий вміст цементу у зв'язуючому призводить до підвищення швидкості затвердіння зв'язуючого і тиску пари виявилось недостатньо, щоб здолати затверділий каркас за усім об'ємом матеріалу, тому отримали неоднорідно спучений зразок (ступінь неоднорідності структури 12,5–13 %) з меншою пористістю (76–78 %), однак доля закритих пір в них достатньо висока 53–54 %.

У матеріалі з вмістом  $\text{ZnO}$  5 і 7,5 мас.ч спостерігається велика кількість крупних незамкнутих пір в структурі матеріалу (загальна пористість зразків 80–83 % і лише 40–50 % складає доля закритих пір), що призводить до зниження водо- і паростійкості матеріалу, а отже, і падіння його теплофізичних властивостей. При вмісті  $\text{ZnO}$  15 мас.ч в зразку спостерігається зниження кількості пір (загальна пористість складає 79–80 %), оскільки швидкість гелеутворення РСК перевищує швидкість пороутворення, тому вони переважно замкнуті (доля закритих пір 51–52 %). Найбільш рівномірно пори розподілені в зразку, в якому вміст  $\text{ZnO}$  становить 10 мас.ч. Це підтверджують і дані табл. 1, з яких видно, що найменші показники поперечного діаметру пір і ступеня неоднорідності структури має матеріал з використанням 10 мас.ч  $\text{ZnO}$  і складають вони відповідно 0,5–0,6 мм і 8–9 %. В таких зразках переважає закритопориста структура, їх загальна пористість 83–84 % з них 53–54 % приходить на долю закритих пір.

Таблиця 1 – Основні показники макроструктури композиційного ТІМ (усереднені значення)

Компонент		Кількість пір на 1 см <sup>2</sup> в перпендикулярному зрізі	Кількість пір на 1 см <sup>2</sup> в паралельному зрізі	Діаметр пір в перпендикулярному зрізі, мм	Діаметр пір в паралельному зрізі, мм	Коефіцієнт форми пір	Ступінь неоднорідності структури, %	Загальна пористість, %	Доля закритих пір, %
Цемент	10 мас.ч	46	58	0,76	0,68	0,79	13,3	84,29	51,79
	15 мас.ч	52	65	0,72	0,64	0,8	12,9	84,29	56,69
	20 мас.ч	57	70	0,67	0,61	0,81	12,4	81,43	55,83
	25 мас.ч	60	73	0,64	0,58	0,82	12,8	77,86	53,46
Оксид цинку	5 мас.ч	48	58	0,73	0,67	0,83	11,9	80,71	41,71
	7,5 мас.ч	53	64	0,7	0,64	0,83	10,2	82,43	48,93
	10 мас.ч	88	97	0,55	0,52	0,91	8,5	83,57	53,37
	15 мас.ч	65	76	0,63	0,58	0,86	10,3	79,86	51,36
Пероксид водню	5 мас.ч	94	111	0,52	0,48	0,85	7,9	80,57	52,97
	7,5 мас.ч	90	107	0,54	0,49	0,84	8,1	81,43	52,33
	10 мас.ч	88	97	0,55	0,52	0,91	8,5	83,57	53,37
	15 мас.ч	42	51	0,75	0,68	0,82	14,4	74,29	41,79
Гідрокарбонат натрію	0,5 мас.ч	98	116	0,46	0,42	0,84	7,8	65,71	36,01
	1 мас.ч	75	87	0,55	0,51	0,86	11,5	71	45,8
	3 мас.ч	56	72	0,63	0,56	0,78	13,3	70,07	52,67
	6 мас.ч	35	49	0,75	0,64	0,71	15,7	62,14	46,94
ОП-10	0 мас.ч	27	42	0,99	0,79	0,64	21,8	82,29	62,29
	0,5 мас.ч	34	52	0,88	0,71	0,65	18,4	81,79	53,49
	1 мас.ч	56	78	0,7	0,59	0,72	11,8	85,71	55,91
	2 мас.ч	88	97	0,55	0,52	0,91	8,5	83,57	53,37

Фотографії пористої структури ТІМ наведені на рис.1–5.

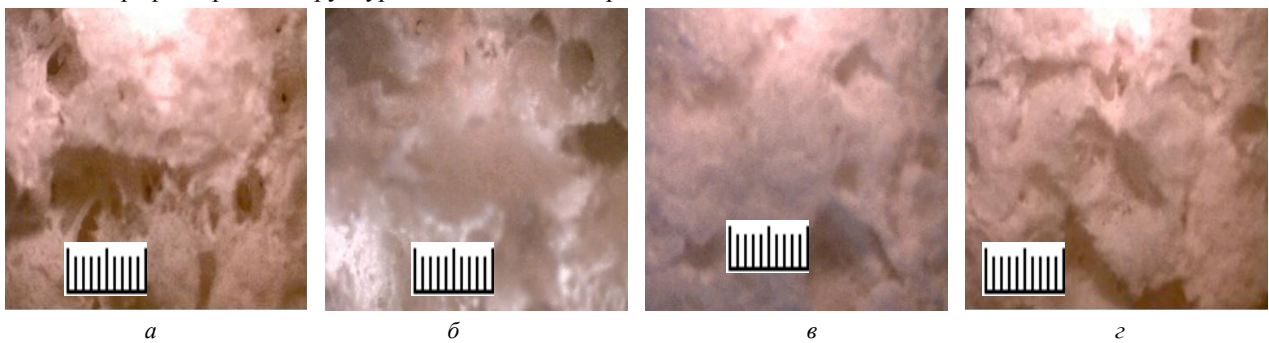


Рисунок 1 – Пориста структура ТІМ з різною кількістю цементу:

а – 10 мас.ч; б – 15 мас.ч; в – 20 мас.ч; з – 25 мас.ч

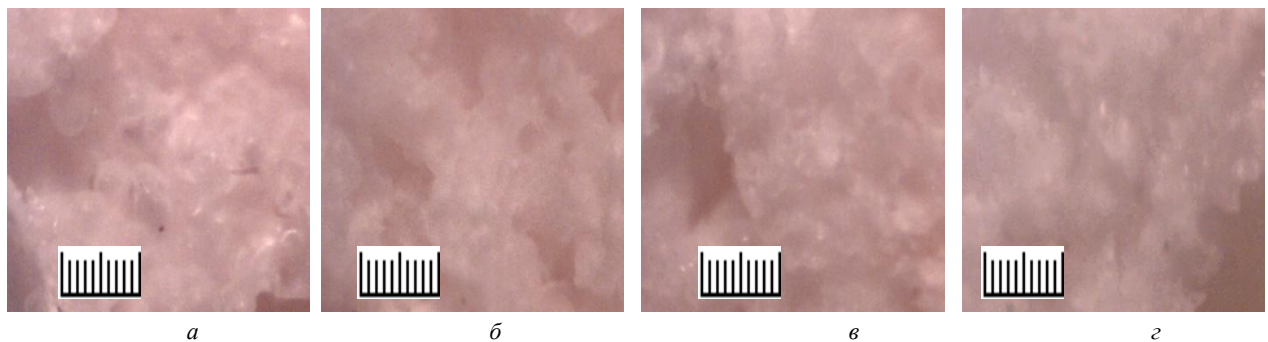


Рисунок 2 – Пориста структура ТІМ з різною кількістю оксиду цинку:

а – 5 мас.ч; б – 7,5 мас.ч; в – 10 мас.ч; з – 15 мас.ч

Більша кількість ZnO (~15 мас.ч) призводить до збільшення величини і поперечного діаметру пір, і ступеня неоднорідності структури, які складають 0,6–0,7 мм і 10–11 % відповідно. При кількості ZnO 5–7,5 мас.ч значення поперечного діаметру пір і ступню неоднорідності структури не значно відрізняються від зразків з 10 мас.ч наповнювача і складають відповідно 0,5–0,55 мм і 8–8,5 %, але щільність таких зразків вища (240–250 кг/м<sup>3</sup>). Це говорить про критичний вміст ZnO у зв'язуючому (9–10 мас.ч), завдяки якому система набуває в'язкість достатню для її стабілізації до початку процесу отвердження, завдяки желуючим властивостям цього наповнювача. Такий матеріал має найбільш рівномірну дрібнопористу і впорядковану структуру наряду з низькою щільністю. Усі значення коефіцієнту форми осередків менше одиниці, отже, пори в ТІМ витягнуті в напрямі, паралельному спінюванню. Причому, чим більше він наближений до одиниці тим більш круглу форму мають осередки, стінки яких відрізняються більшою міцністю. Так пори найбільш наближені до круглої форми мають зразки з 9–10 мас.ч ZnO ( $K=0,9-0,92$ ). В інших випадках пори мають, переважно, форму еліпса.

При дослідженні пористої структури ТІМ залежно від вмісту газоутворювача виявлено, що при спінюванні РСК газоутворювач необхідно підібрати так, щоб швидкість виділення газу й росту центрів пір була дещо нижче за швидкість процесу отвердження РС. Швидке розкладання газоутворювача в малов'язкій композиції призводить до руйнування центрів зародження пір і зникнення з них газу або до отримання матеріалу із крупнопористою структурою. Виділення газу після моменту утворення гелю уже не може привести до спінювання, тому що така РСК не має плинності й не здатна до деформацій.

Як видно з наведених в табл. 1 даних і рис. 3, при кількості H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> до 10 мас.ч матеріал характеризується більш низькою пористістю (80–82 %) і високою щільністю. Найменший діаметр пір спостерігається при використанні 5 мас. ч H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> і складає 0,5–0,55 мм, а ступінь неоднорідності структури – 7,5–8 %, структура таких зразків переважно закритопориста (доля закритих пір 52–54 %). Однак зв'язуюче в цьому випадку нерівномірно розподіляється у міжгранульному просторі та його недостатньо щоб покрити всі гранули, через невелику кратність спучування. Надлишковий вміст H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (понад 15 мас.ч) також не сприяє утворенню рівномірнопористої структури, та призводить до утворення пір великого діаметру, доля закритих пір лише 41–42 %. Це пояснюється тим, що відбувається розрив великого

числа пір і їх об'єднання між собою. В даному випадку спостерігаються найбільший діаметр пір (0,7–0,8 мм) і найбільший ступінь неоднорідності структури (14–15 %). Оптимальним вмістом H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> є 9–10 мас.ч, який дозволяє отримати матеріал в якому зв'язуюче рівномірно розподіляється у міжгранульному просторі (ступінь неоднорідності структури – 8–9 %) та має невеликий розмір пір, який дорівнює 0,5–0,6 мм. Загальна пористість таких зразків достатньо висока – 83–84 %, і переважна більшість пір замкнуті (доля закритих пір – 53–54 %).

У випадку використання як газоутворювача NaHCO<sub>3</sub> видно, що його кількості 0,5 мас.ч недостатньо, щоб ініціювати утворення пір, і їх число в матеріалі занадто мало (загальна пористість всього 65–67 %), щоб надати ТІМ низькі показники щільності і теплопровідності. При вмісті 3–6 мас.ч NaHCO<sub>3</sub> в матеріалі є присутніми нерівномірно розподілені великі пори. Поперечний діаметр пір дорівнює відповідно 0,6–0,8 мм, а ступінь неоднорідності структури 13–16 %. Такі зразки мають невелику загальну пористість 63–70 %, через переважання швидкості гелеутворення, якому сприяє підвищений вміст NaHCO<sub>3</sub>, над швидкістю пороутворення, та як наслідок велику долю замкнутих пір (46–53 %). Матеріал з вмістом 1 мас.ч NaHCO<sub>3</sub> характеризується найбільш рівномірною структурою (ступінь неоднорідності структури – 11–12 %), в якій переважає велика кількість дрібних замкнутих пір (діаметр пір – 0,55–0,6 мм, доля закритих пір – 45–47 %). Чисельне значення коефіцієнту форми осередків свідчить про переважну їх витягнутість в напрямі, паралельному спінюванню. Причому у разі H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> форма осередків наближається до круглої ( $K=0,8-0,9$ ), а у разі NaHCO<sub>3</sub> – до овальної ( $K=0,7-0,85$ ), стінки таких осередків мають меншу міцність.

Вивчалась також структура матеріалів з різною кількістю ПАР. Найбільший діаметр пір спостерігається у матеріалі без використання ПАР і складає ~1 мм. Такий матеріал характеризується неоднорідною структурою (ступінь неоднорідності – 21–23 %). Загальна пористість таких зразків складає 72–74 %, причому вони мають велику кількість наскрізних порожнеч, через нестабільність спученої системи, внаслідок якої спінена композиція осідає і матеріал має високу щільність ~ 380 кг/м<sup>3</sup>.

Введення ПАР ОП–10 дозволяє стабілізувати спучену композицію, пористість зразків підвищується до 80–87 %, а поперечний діаметр пір і ступінь неоднорідності структури зменшуються. Однак кількості ОП–10 0,5–1 мас.ч недостатньо для утворення однорідної дрібнопористої структури.

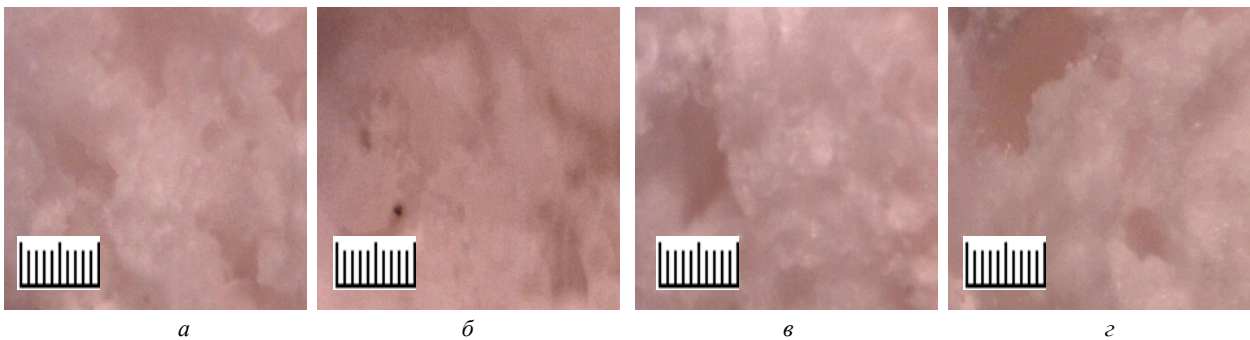


Рисунок 3 – Пориста структура ТІМ з різною кількістю перек-сиду водню: а – 5 мас.ч; б – 7,5 мас.ч; в – 10 мас.ч; г – 15 мас.ч

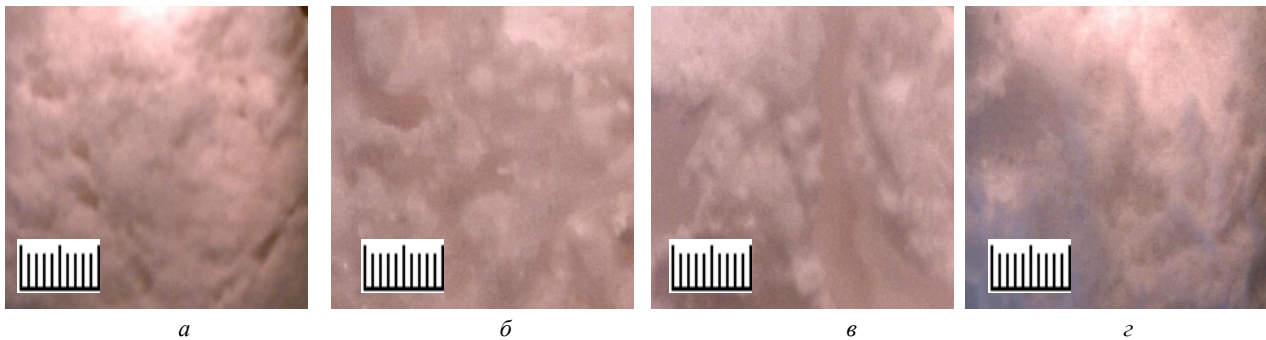


Рисунок 4 – Пориста структура ТІМ з різною кількістю гідрокарбонату натрію:  
а – 0,5 мас.ч; б – 1 мас.ч; в – 3 мас.ч; г – 6 мас.ч

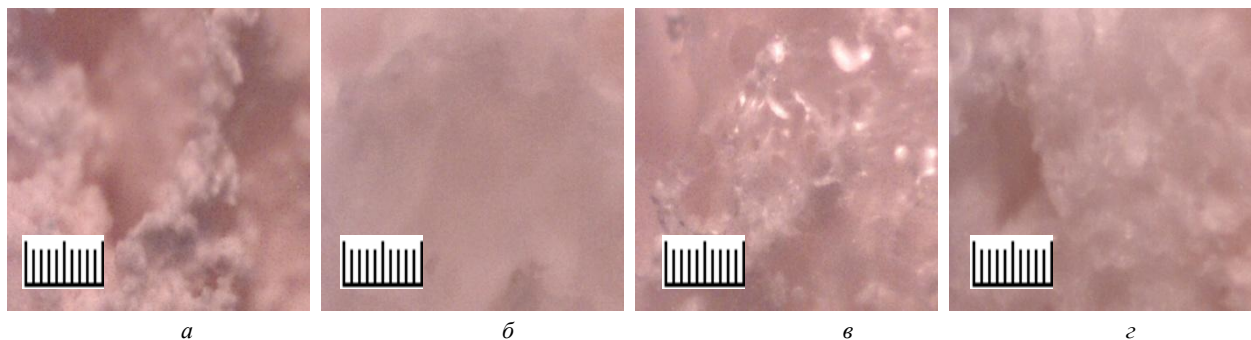


Рисунок 5 – Пориста структура ТІМ з різною кількістю ОП-10: а – без ПАР; б – 0,5 мас.ч; в – 1 мас.ч; г – 2 мас.ч

Оптимальною кількістю ОП-10 є 1,8–2 мас.ч, такий композиційний матеріал має більш рівномірну дрібнопористу структуру, за рахунок рівномірного росту пір, поперечний діаметр пір і ступінь неоднорідності структури складають в даному випадку 0,5–0,6 мм і 8–9 % відповідно. Якщо порівнювати зразки, зображені на рис. 5, при спучуванні яких використовували ОП-10, то очевидно, що більш рівномірною структурою володіє матеріал з вмістом 2 мас.ч даної ПАР. При кількості ОП-10 1 мас.ч енергія міжпорового бар'єру недостатньо висока, щоб створити міцний каркас, і відбувається дифузія парів і газів крізь міжпорові стінки, при цьому піна руйнується. Вміст ПАР у кількості ~2 мас.ч сприяє утворенню міцних адсорбційних шарів з мінімальною кількістю

наскрізних порожнеч. Відсоток закритих пір у таких зразках складає 53–54 %, при загальній їх пористості 83–84 %. До того ж тільки при використанні 1,8–2 мас.ч ОП-10 коефіцієнт форми пір має високе значення ~0,9, в інших випадках  $K=0,6-0,7$ , тобто переважають осередки овальної і поліедричної форми, які найменш міцні.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень показано, що найбільш впорядковану структуру мають матеріали з використанням, як наповнювача оксиду цинку і як газоутворювача пероксиду водню. Встановлено, що застосування їх у кількості по 9–10 мас.ч при виробництві композиційних ТІМ забезпечує таку швидкість виділення газу й росту центрів пір, яка порівнянна із процесом отвердження РСК, що дозволяє отримати матеріали з високопоризованою (загальна пористість 83–84 %), дрібнопористою

(поперечний діаметр пір 0,5–0,6 мм), достатньо закритопористою (доля закритих пір 53–54 %) та однорідною (ступінь неоднорідності 8–9 %) структурою. Використання ПАР ОП–10, у кількості 1,8–2 мас.ч, дозволяє стабілізувати спучену систему до моменту її отвердження. Структура ТІМ, яка утворюється при даному складі РСК забезпечує високі теплоізоляційні властивості виробів з коефіцієнтом тепловідності 0,05–0,055 Вт/м·К, що задовольняє вимогам до теплоізоляційних матеріалів.

#### Список літератури

1. Теплоизоляционные материалы. URL: <http://www.zhastar.net/content/view/28060/15/>.
2. Теплоизоляционные материалы. Виды и свойства теплоизоляционных материалов. URL: <http://www.ref.by/refs/1/35861/1.html>.
3. Украинский рынок теплоизоляционных материалов. URL: [http://aspp.com.ua/ru/press\\_centр/publikacii/ukrainskij\\_rinok\\_teploizoljacionnih\\_materialov.html](http://aspp.com.ua/ru/press_centр/publikacii/ukrainskij_rinok_teploizoljacionnih_materialov.html)
4. Производство строительных материалов. URL: <http://invest.gov.kz/ru/pages/proizvodstvo-stroitelnyh-materialov>
5. Теплоизоляция на основе полистирола: тенденции развития рынка. URL: <http://www.krovlirossia.ru/rubriki/materialy-i-tekhnologii/teploizoljacionnye-materialy/teploizoljaciya-na-osnove-polistirola-tendencii-razvitiya-rynka>
6. Горлов Ю.П. Технологии теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. М.: Высшая школа, 1989. 384 с.
7. Сидоров В.И. Использование модифицированного жидкого стекла для получения водостойких утеплителей методом холодного вспенивания. Известия вузов. Строительство, 2002. № 8. С. 27–32.
8. Зарубина Л.П. Теплоизоляция зданий и сооружений. Петербург: Материалы и технологии, 2012. 416 с.
9. Морозов А.П. Пенобетоны и другие теплоизоляционные материалы. Магнитогорск, 2008. 103 с.
10. Малявский Н.И. Щелочно – силикатный утеплитель. Свойства и химические основы производства. Российский химический журнал, 2003. Т.–4. С. 39–45.
11. Мамонтов А.В., Нефедов В.Н., Назаров И.В. и др. Микроволновые технологии: Монография. М.: ГНУ НИИ ПМТ, 2008. 308 с.
12. Rymar T., Suvorin O. The choice of the grouting method for liquid glass granulate while obtaining composite thermal insulation materials. Functional materials. Kharkov. 2020. Vol 27. № 3. P. 611 – 621. doi:<https://doi.org/10.15407/fm27.03.611>.

#### References (transliterated)

1. Teploizoljatsionnye materyali [Thermal insulation materials]. URL: <http://www.zhastar.net/content/view/28060/15/>.
2. Teploizoljatsionnye materyali. Vydy y svoystva teploizoljatsionnykh materyalov [Thermal insulation materials. Types and properties of thermal insulation materials]. URL: <http://www.ref.by/refs/1/35861/1.html>.
3. Ukrainskyi rinok teploizoljatsionnykh materyalov [Ukrainian market of thermal insulation materials]. URL: [http://aspp.com.ua/ru/press\\_centр/publikacii/ukrainskij\\_rinok\\_teploizoljacionnih\\_materialov.html](http://aspp.com.ua/ru/press_centр/publikacii/ukrainskij_rinok_teploizoljacionnih_materialov.html)
4. Proizvodstvo stroitelnykh materyalov [Manufacture of building materials]. URL: <http://invest.gov.kz/ru/pages/proizvodstvo-stroitelnyh-materialov>
5. Teploizoljatsiya na osnove polystyrola: tendentsyy razvityia rinka [Polystyrene-based thermal insulation: market trends]. URL: <http://www.krovlirossia.ru/rubriki/materialy-i-tekhnologii/teploizoljacionnye-materialy/teploizoljaciya-na-osnove-polistirola-tendencii-razvitiya-rynka>
6. Horlov Yu.P. Tekhnolohyy teploizoljatsionnykh y akustycheskykh materyalov y yzdelyi [Technologies of insulating and acoustic materials and products]. Moskva: Vysshiaia shkola, 1989. 384 s.
7. Sydorov V.Y. Yspolzovanye modyfytyrovannoho zhydkoho stekla dlia polucheniya vodostoikykh uteplytelei metodom kholodnoho vspenyvaniya [The use of modified liquid glass to produce waterproof insulators by cold foaming]. Yzvestiya vuzov. Stroitelstvo, 2002. № 8. S. 27–32.
8. Zarubyna L. P. Teploizoljatsiya zdanyi y sooruzheniy [Thermal insulation of buildings and structures]. Peterburh: Materyali y tekhnolohyy Publ., 2012. 416 s.
9. Morozov A.P. Penobeton y druhe teploizoljatsionnye materyaly [Foam concrete and other thermal insulation materials]. Mahnytohorsk, 2008. 103 s.
10. Maliavskiy N.Y. Shchelochno – sylykatnyi uteplytel. Svoystva y khymycheskye osnovy proizvodstva [It's alkaline – silicate insulation. Properties and chemical bases of production]. Rosyyskiy khymycheskiy zhurnal, 2003. № 4. S. 39–45.
11. Mamontov A.V., Nefedov V.N., Nazarov Y.V., Eds. Mykrovolnovyye tekhnolohyy [Microwave technology]. Monohrafiya. Moskva: HNU NYU PMT, 2008. 308 s.
12. Rymar T., Suvorin O. The choice of the grouting method for liquid glass granulate while obtaining composite thermal insulation materials. Functional materials. Kharkov. 2020. Vol 27. № 3. P. 611 – 621. doi:<https://doi.org/10.15407/fm27.03.611>.

Надійшла (received) 15.01.2021

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Римар Тетяна Ернстівна (Рымар Татьяна Эрнстовна, Rymar Tatyana Ernstovna)** – Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-8640>; e-mail: [rymartatyana1975@gmail.com](mailto:rymartatyana1975@gmail.com).

**Суворін Олександр Вікторович (Суворин Александр Викторович, Suvorin Oleksandr Viktorovith)** – доктор технічних наук, професор, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, завідувач кафедри «Хімічна інженерія та екологія»; м. Северодонецьк; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9251-5017>; e-mail: [avsuvorin@ukr.net](mailto:avsuvorin@ukr.net).