

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 699.86:666.189.3

А. В. КРАСНЮК¹, О. В. ГРОМОВА², А. С. ЩЕРБАК³, І. Ф. ЗІБРОВ^{4*}

¹ Кафедра «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 62, ел. пошта krasnyuk@mail.diiit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1400-9992

² Кафедра «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 46, ел. пошта elenagromova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5149-4165

³ Кафедра «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Український державний університет науки і технологій, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 586 45 74, ел. пошта pro-f@ukr.net, ORCID 0000-0003-1340-0284

^{4*} Кафедра «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 189 75 80, ел. пошта ivanzibrov44@gmail.com, ORCID 0000-0002-9384-985X

МЕХАНІЗМИ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ПІНОСКЛА ЯК ЕФЕКТИВНОГО УТЕПЛЮВАЧА ДЛЯ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Мета. В статті розглянуто процеси утворення піноскла, як утеплювача, отримання різних видів скла шляхом використання різних газотворювачів і модифікуючих добавок. Розглянуто процеси виробництва і технологічні прийоми для отримання виробів із піноскла для підвищення енергоефективності будівель і споруд в сучасному архітектурному проектуванні. **Методика.** Досліджено ресурсозберігаючі технології виробництва піноскла в промислових умовах, а саме одностадійний та двостадійний способи виробництва виробів з піноскла. Обраний найбільш ефективний метод виробництва піноскла оптимальної структури і низької густини. Визначені оптимальні хімічні склади стекл, за яких формується оптимальна структура і фізико-механічні властивості піноскла для промислового виробництва. **Результати.** Проведено аналіз різних видів газотворювачів, досліджено їх переваги та недоліки. Встановлено, що скло, яке містить триокис сірки, дає завжди найбільш якісне і найбільш однорідне піноскло, а оскільки SO_3 є і найбільш дешевим окиснювачем, тому його застосування доцільно у виробництві піноскла. Встановлено, що чим більш висока тонкість помелу і чим в більш чистому вигляді буде використовуватися вуглець, тим менша кількість його буде потрібна, і тим краще буде зовнішній вигляд піноскла і нижче густина і теплофізичні властивості. Модифіковане піноскло на основі бою скла та золи-виносу має більш високу міцність при стиску і меншу теплопровідність у порівнянні з піносклом без використання модифікатора, при однаковій густині, та може бути рекомендоване для впровадження у виробництво за двостадійною технологією. **Наукова новизна.** Отримано розвиток дослідження про утворення оптимальної структури, складу і покращені фізико-механічні властивості піноскла, виготовленого із застосуванням модифікаторів структури у вигляді золи-виносу і пластифікаторів за енергоефективною промисловою технологією. **Практична значимість.** Результати роботи дозволяють в промислових умовах отримувати піноскло оптимальної структури, складу і з фізико-механічними властивостями, що відповідають вимогам енергоефективності сучасних будівель і споруд. В результаті проведених досліджень були розроблені вироби з модифікованого піноскла з наступними характеристиками: густина – 160...220 кг/м³; теплопровідність – 0,055...0,074 Вт/(мК); водопоглинання – 1,95...2,43 % (об'ємних); міцність при стиску – 1,5...2,1 МПа.

Ключові слова: енергоефективність; теплоізоляція; піноскло; газотворювач; окислення; відновлення; хімічний склад

Вступ

В Україні 45 % загального споживання енергоресурсів приходить на теплопостачання будівель. В середньому в країні багатоповерхові будівлі споживають 450 кВт рік/м² тепла в рік,

а будівлі котеджного типу близько 800 кВт рік/м² в рік. Для порівняння в Швеції котеджі споживають близько 135 кВт рік/м² тепла в рік.

В сучасному архітектурному проектуванні і будівництві гостро постають питання енерго- і ресурсозбереження при архітектурному проєк-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

туванні цивільних і громадських будівель і споруд у зв'язку із введенням нових норм забезпечення енергоефективності (Пшинько, Гребенников, Федоренко, Дудник, & Лисняк, 2005; Пшинько, Краснюк, Гребенников В. Н., & Щербак, 2010; ДСТУ Б EN 15603:2013, 2013; ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015, 2015).

Одним з найбільш ефективних вирішень цієї проблеми, є зниження втрат тепла через огорожуючі конструкції будівель, споруд і інженерні системи тепломереж тощо.

Дослідження, досвід проектування і застосування теплоізоляційних матеріалів для будівель і споруд за останні роки, показали, що для забезпечення ефективної теплоізоляції необхідні екологічно чисті, довговічні, пожегобезпечні матеріали (тобто неорганічні) з місцевої сировини, що володіють низьким коефіцієнтом теплопровідності (0,05...0,07 Вт/мК), міцністю при стиску в межах 0,1...2,0 МПа, малим водопоглинанням (до 5 % за об'ємом). У промислових об'єктах до перерахованих додається ще ціла низка додаткових вимог, викликаних специфікою їх експлуатації. Для цього необхідна розробка і застосування ефективних теплоізоляційних матеріалів і одним з таких матеріалів являється піноскло.

Піноскло – легкий за щільністю, пористий матеріал зі скла і наповнювачів, що представляє собою затверділу скляну піну із рівномірно розподіленими порами. Вперше піноскло було отримано в Радянському Союзі ще в тридцяті роки минулого століття відомим вченим і фахівцем в області скла І. І. Китайгородським (Китайгородский, & Бутт, 1960).

Використання в повній мірі комплексу термомеханічних властивостей при високій міцності, а також можливість зв'язуватися з іншими будівельними матеріалами, такими як: цементно-піщаний розчин, бетон, каміння, цегла, метал, залізобетон тощо дозволяють вважати піноскло ефективним будівельним та будівельно-ізоляційним матеріалом не тільки для внутрішніх перегородок, але і для заповнення зовнішніх стін в звичайному, і особливо у висотному будівництві (Кулаєв, & Гаркаві, 2007; Кетов, Пузанов, & Сауліна, 2007; Fernandes, Tulyaganov, & Ferreira, 2009a; Fernandes, Tulyaganov, & Ferreira, 2009b).

Застосування піноскла як наповнювача дозволяє різко знизити вагу зовнішніх стін і нава-

нтаження на фундамент, а також здешевити будівництво. Піноскло легко піддається механічній обробці при пилянні, різанні, свердлінні. Екологічна безпека піноскла робить його придатним для будь-яких видів будівництва.

Теплоізоляція з піноскла, в порівнянні з іншими матеріалами, більш ефективна і економічна, не вимагає частих ремонтів і термін служби її набагато триваліший. Використання піноскла в будівництві дозволяє знизити втрати тепла в 2,5...3 рази (Bai, et al., 2014; Zhu, et al., 2016).

Але основною перешкодою широкої організації виробництва піноскла є відсутність технологій, які забезпечують отримання дешевого матеріалу з властивостями, що задовольняють сучасні вимоги виконання теплоізоляційних робіт і забезпечення енергоефективності будівель і споруд, а також недостатнє освоєння сировинної бази.

Фізико-технічні властивості піноскла в значній мірі обумовлені способом його виробництва, складом скла і піноутворюючої суміші, природою, кількістю газоутворювача, режимом спінювання і відпалу. Змінюючи ці фактори, можна отримати піноскло з різною щільністю, міцністю, структурою, водопоглинанням, проникністю, теплопровідністю і морозостійкістю.

Мета

Розглянути процеси утворення піноскла, як утеплювача, дослідити отримання різних видів скла шляхом використання різних газоутворювачів і модифікуючих добавок.

Розглянути процеси виробництва і технологічні прийоми для отримання виробів із піноскла з фізико-механічними властивостями, що дозволяють підвищити енергоефективність будівель і споруд при сучасному архітектурному проектуванні.

Методика

З точки зору фізики піноскло (рис. 1) є гетерогенною системою газоподібної і твердої фаз. Хоча газоподібна фаза в кінцевому продукті диспергована у твердій фазі, виникнення скляної піни протікає, як і у всіх пін, між фазою газоподібної і рідкої. Під впливом швидкого зростання в'язкості скла при охолодженні структура скляної піни стабілізується без видимих змін.



Рис. 1. Фотографія зовнішнього вигляду зразка піноскла, виготовленого з використанням склобою

Складним є питання отримання піноскла з щільністю нижче $800 \dots 1000 \text{ кг/м}^3$, оскільки під впливом високого поверхневого натягу розплавленої скломаси такі піни малостійкі. Велика частина газоподібної фази випаровується з цієї системи або в процесі спінювання, або в процесі твердіння скла.

Скляну піну з низькою щільністю поки вдалося отримати в промисловому масштабі тільки шляхом нагрівання порошкової суміші скла з піноутворювачем. Як і у всіх пін, в яких обсяг газоподібної фази становить понад $3/4$ від їх загального обсягу, окремі осередки піноскла мають форму неправильних багатогранників, розділених тонкими, але тим не менш компактними плівками.

При достатньому збільшенні, піноскло нагадує типову найбільш відому піну, утворену продуванням повітря через розчин мила (мильні бульбашки). Так як формування скляної піни починається спонтанно і практично відразу у всьому об'ємі і, крім того в процесі піноутворення проявляється тенденція до вирівнювання тиску між окремими осередками приблизно до однієї і тієї ж величини поліедра, пори виявляються в значній мірі рівномірними по величині і формі.

Помилково підібраний технологічний процес або ж не ефективний газоутворювач, як правило призводить до утворення неоднорідної гетерогенної системи газоподібної і скляної фаз, яка за своєю структурою швидше нагадує губку. Такий продукт, як правило, характеризується досить високим водопоглинанням і тому в цьому випадку можна говорити скоріше про губчасте скло, ніж про піноскло.

При сучасному способі виробництва піноскла з порошкової суміші скла і піноутворювача скляна піна утворюється в результаті виділення великої кількості газів в момент, коли порошок скла вже досить спікся. Виникає помилкова думка, що при виробництві піноскла досить ввести до розмолотого скла яку-небудь речовину будь-якого складу, яка здатна виділяти при температурах, що перевищують температуру спікання відповідного скла, необхідну кількість газів (хімічна реакція зі склом або з деякими компонентами скла, термічне розкладання тощо) і потім цю суміш нагріти до температури, при якій скло є досить текучим. Дійсно, за допомогою цього способу завжди можна отримати більш-менш спінювану масу. Однак проблема виробництва піноскла з рівномірними, відокремленими один від одного осередками і з об'ємом газоподібної фази, що перевищує 90 % загального обсягу піни, залишається складною (Пшинько, Гребенников, Федоренко, Дудник, & Лисняк, 2005).

При утворенні піноскла вирішальну роль відіграє велика питома поверхня піноутворюючої суміші. Відомо, що структура поверхні скла відрізняється від структури в масі скла. Прямим наслідком структурних змін поверхні скла є підвищена реакційна здатність поверхні, яка проявляється як при спіканні скляного порошку, так і при утворенні скляної піни.

Вплив розміру часток піноутворюючої суміші на кінетику спікання і спінювання, а також і на властивості піноскла вивчали багато вчених (Пшинько, Гребенников, Федоренко, Дудник, & Лисняк, 2005; Пшинько, Краснюк, Гребенников, & Щербак, 2010; Китайгородський, & Бутт, 1960; Кулаєв, & Гаркаві, 2007). В якості вихідного матеріалу для отримання піноскла вони використовували бій віконного скла. Поряд з цим вони встановили, що температура спікання скляного порошку залежить від його питомої поверхні: чим більше питома поверхня скляного порошку, тим нижче його температура спікання. Так, якщо для порошку віконного скла з питомою поверхнею $760 \text{ см}^2/\text{г}$ температура спікання становила приблизно $900 \text{ }^\circ\text{C}$, то для порошку з питомою поверхнею $1050 \text{ см}^2/\text{г}$ температура спікання знижується до $750 \text{ }^\circ\text{C}$ і для питомої поверхні $4200 \text{ см}^2/\text{г}$ до $650 \text{ }^\circ\text{C}$.

Якщо піноутворювач в піноутворюючій суміші добре перемішаний зі склом (при цьому

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

м'який піноутворювач, наприклад вуглець, рівномірно розподілений на поверхні окремих частинок скла), то після спікання скла він виявляється рівномірно розподіленим в рідкій склоподібній фазі. Починаючи з цього моменту, виділення газу всередині рідкої склоподібної фази і утворення піни залежать виключно від реакційної здатності піноутворювача. Теоретично, віконне скло, розмелене до тонкості помелу, відповідної питомої поверхні $5000 \text{ см}^2/\text{г}$, могло б утворювати піну вже при $650 \dots 670 \text{ }^\circ\text{C}$ (Кулаєв, & Гаркаві, 2007). Насправді, температура спінювання віконного скла є вища, так як при температурах нижче $700 \text{ }^\circ\text{C}$ жоден піноутворювач не в змозі утворити достатньої кількості газів. Початок утворення піни у віконного скла при використанні карбонатних піноутворювачів починається при $730 \text{ }^\circ\text{C}$. Для вуглецевих піноутворювачів ця температура лежить трохи вище. Підвищення температури прискорює утворення піни, так що практичне застосування температури спінювання для віконного скла знаходиться в межах $760 \dots 790 \text{ }^\circ\text{C}$ для карбонатних піноутворювачів і для вуглецевих піноутворювачів $830 \dots 850 \text{ }^\circ\text{C}$. Інтервал температур $780 \dots 880 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідає для віконного скла інтервалу в'язкості $9 \cdot 10^6 \dots 5 \cdot 10^5 \text{ пз}$.

При застосуванні вуглецевих піноутворювачів процес спінювання складніший, ніж при застосуванні карбонатних. Виділення газів в них відбувається не шляхом реакції з самим склом, як при карбонатних піноутворювачах, а шляхом взаємодії тільки з певним компонентом скла, що містяться в склі у відносно невеликій кількості. Величина температури спінення залежить також і від виду цього активного компонента. Утворення і стійкість будь якої піни тісно пов'язані з поверхневою енергією на фазовій межі газоподібної і рідкої фази. Чим менше ця поверхнева енергія, тим легше утворюється піна і тим більше вона стійка. Якщо проаналізувати процес утворення піни в рідкому середовищі, то можна спрогнозувати, що аналогічним чином і при утворенні піноскла питання поверхневого натягу грає таку ж важливу роль. Велике збільшення поверхні рідини при утворенні піни є причиною підвищення загальної вільної енергії системи, яка прямо пропорціональна поверхневому натягу рідини і поверхні між рідкою і газоподібною фазами. Чим більш вільна енергія системи, тим менш стій-

кою вона є, і тому рідини з високим поверхневим натягом або взагалі не утворюють піни, або утворюють малостійку піну. Нестійкість такої піни є прагненням до зменшення граничної поверхні між фазами тощо. До взаємного з'єднання окремих осередків з виділенням газоподібною фазою в атмосферу. Цей процес зазвичай називають осадженням піни.

Розплавлена скло-рідина з відносно високим поверхневим натягом при температурах спінювання $290 \dots 480 \text{ дин}/\text{см}$. Тому скляна піна повинна проявляти велику схильність до взаємного з'єднання окремих осередків при їх одночасному зростанні, які супроводжуються виділенням газів в атмосферу. Якби цього не було, то освітлення скла при варінні було б проблематичною операцією. Отже, отримання піноскла з об'ємом газоподібною фазою більше 90% загального обсягу є явищем, яке заслуговує на особливу увагу.

При утворенні піноскла дійсно відбувається взаємне з'єднання окремих осередків через відносно високий поверхневий натяг розплавленого скла. Процес з'єднання осередків в першій стадії утворення піни є інтенсивним, в цьому можна перекопатися на простому прикладі. Піноутворююча суміш підвищується до питомої поверхні $5000 \text{ см}^2/\text{г}$, що застосовується для виробництва піноскла, має насипну густину порядку $1200 \dots 1500 \text{ кг}/\text{м}^3$. Отже, при щільності скла $2500 \text{ кг}/\text{м}^3$ піноутворююча суміш в одиниці об'єму містить $40 \dots 50 \%$ газоподібною фазою. При отриманні піноскла обсяг окремих осередків зростає не тільки під впливом виділення газів з піноутворювача, але і за рахунок зменшення їх числа в результаті взаємного з'єднання.

В процесі спінювання осередки взаємно з'єднуються в темпі, що повільно сповільнюється. При збільшенні обсягу окремих осередків газу повинні працювати проти сил, викликаних поверхневим натягом. В осередках малих діаметрів, під впливом великої кривизни поверхні має діяти високий тиск газів для того, щоб ці осередки збільшували свій об'єм. Оскільки тиск в осередках падає зі збільшенням їх діаметра, то різниця в тиску між окремими осередками буде тим більшою, чим менше діаметр осередків. Це явище пояснюється тим, що на початку спінювання відбувається в набагато більшій ступені взаємне об'єднання окремих

осередків, ніж збільшення їх обсягу під впливом виділення газів.

Як тільки розмір осередків в результаті взаємного об'єднання збільшиться і при цьому вирівняється тиск в сусідніх осередках, вони з'єднуються один з одним в меншій мірі. Якщо в'язкість скла низька, а виділення газів з піноутворювача інтенсивне, то поступово може відбуватися і збільшення об'ємів осередків за рахунок розширення їх газами. Оскільки при з'єднанні окремих осередків загальний обсяг піни не збільшується, можна отримати піноскло з низькою щільністю виключно за рахунок збільшення обсягу осередків шляхом їх розширення газами, утвореними з піноутворювача. Між з'єднанням осередків і зростанням окремих осередків за рахунок розширення газами в процесі спінювання викликає певну рівновагу. Шляхом регулювання умов піноутворення (часу, температури тощо) необхідно досягти таких виробничих умов, які б гарантували утворення піноскла з необхідною щільністю (Кетов, Пузанов, & Сауліна, 2007).

Однак окремі осередки піноскла постійно з'єднуються один з одним, хоча в кінці процесу спінювання в значній мірі менші ніж на початку. Доказом цього є утворення великих за розмірами порожнин в місцях, де піноскло під час виробничого процесу значно перегрівалося, наприклад на дні форми. І у готового піноскла можна знову викликати процес з'єднання осередків шляхом повторного нагрівання зразка піноскла до температури спінювання і витримки при цій температурі протягом тривалого часу. Без істотного збільшення обсягу в зразку відбувається утворення все більших і більших осередків шляхом з'єднання окремих осередків. В кінці процесу обсяг зразка починає зменшуватися, осередки збільшуються до тих пір, поки в кінці кінців скляна піна повністю не осяде, гази не випаруються в атмосферу і зразок не перетвориться в тонкий шар спеченого скла (Кетов, Пузанов, & Сауліна, 2007).

Процес з'єднання окремих осередків піноскла починається з розтягування проміжних стінок шляхом розтікання склоподібної маси, потім утворюється новий осередок поліедричної форми. Розтікання скла і новоутворення осередків при відносно низькій в'язкості скла є досить повільним процесом, при чому він виявляється тим більш повільним, чим більш товсти-

ми були стінки первинних осередків та чим більше грубозерниста була пінообразуюча суміш. Якщо процес піноутворення завершити передчасно, то частина осередків може бути пов'язаною один з одним, в результаті чого піноскло матиме підвищене водопоглинання.

Іншою причиною виникнення зв'язаних каналів в піносклі може бути рекристалізація скломаси. При утворенні кристалів на стінках осередків при вспіненні з одного боку знижується їх механічна міцність і з іншого – значно знижується пластичність скла. Тому стінки осередків прориваються набагато легше, а формування нових осередків, навпаки, виявляється більш ускладненими.

У разі введення води та інших рідин виробництво і стабілізація піни досягається додаванням невеликої кількості поверхнево-активних речовин. Стабілізуючу дію їх можна пояснити не тільки зниженням поверхневого натягу дисперсійного середовища, а також утворенням так званого «бар'єру». Цей «бар'єр» утворює підвищення міцності стінок в місцях, де вони мають найменшу товщину.

Зниження поверхневого натягу скла шляхом лише однієї зміни поверхневого натягу його хімічного складу не було б достатнім для формування і стабілізації скляної піни. Вплив окремих компонентів скла на його поверхневий натяг приблизно однаковий, так що поверхневий натяг стекол різного хімічного складу мало відрізняється один від одного. Тому нами було досліджено стабілізуючу дію піноутворювача з урахуванням досвіду інших вчених (Aaboe, & Oiseth, 2015).

При спіненні, як правило, не настає хімічне розкладання всього піноутворювача і, крім того, після розкладання піноутворювача можуть залишатися тверді залишки. При утворенні піноскла поряд з рідкою і газоподібною фазами присутня певна кількість твердої фази. В процесі спінення настає швидке переміщення нерозкладеного твердого залишку піноутворювача (як правило, з меншою щільністю) в сторону повторного утворення поверхні склоподібної фази. Речовини, які мають малу хімічну схожість з рідкою фазою скла.

Завдяки цьому, речовини з хімічною схожістю зі склом розчиняються в рідкій фазі скла, а іноді і хімічно реагують і тому, такі речовини не будуть мати ніякої активної дії.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Дія твердої фази на межі рідкої і газообразної фаз проявляється в тому, що частки твердої фази приклеюються до поверхні скла, або ж, в залежності від вологості скла, в більшій чи меншій мірі заглиблюються в поверхневий шар скла. У такій системі вільна поверхнева енергія межового шару значно знижується, виникає енергетичний бар'єр, завдяки чому піна стабілізується. Було доведено, що максимальну стабілізуючу дію на піну мають саме такі тверді речовини, які лише незначно зволожені рідкою фазою, тобто, коли між поверхнею рідкої і твердої фазами утворюється максимальний граничний кут. Таким чином поводить, наприклад, вуглець, який має малу хімічну спорідненість до розплаву скла та, крім того, незначно змочується розплавом скла. Як показали лабораторні дослідження, подібними властивостями володіють і незгорючі вуглецеві частки в золі-винесення. До того ж вона має подібний склад зі складом стекол.

Результати

Результати, отримані при нагріванні порошків протягом 2 годин у лабораторній спеціально виготовленій печі, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Спікання порошку віконного скла з питомою поверхнею 6000 см²/г

Температура, °С	В'язкість скла, пз	Стан скла після двогодинного нагрівання
<540	>10 ¹¹	Вільний порошок
540...650	10 ¹¹ ...7·10 ⁸	Прогресуюче спікання
650	7·10 ⁸	З'являється рідка склоподібна фаза
650...690	7·10 ⁸ ...7·10 ⁷	Прогресуюче склоутворення
690	7·10 ⁷	Заглушене скло з блискучою поверхнею, пронизане дрібними бульбашками повітря
>690	7·10 ⁷	Поступове освітлення і перетворення в прозоре скло

Завдяки мікроскопічному аналізу можна встановити, що чорне забарвлення піноскла,

виготовленого за допомогою вуглецевого піноутворювача з додаванням золи-винесення, обумовлена малими частками непрореагованого вуглецю, прилипають на поверхні стінок осередків рис. 2.

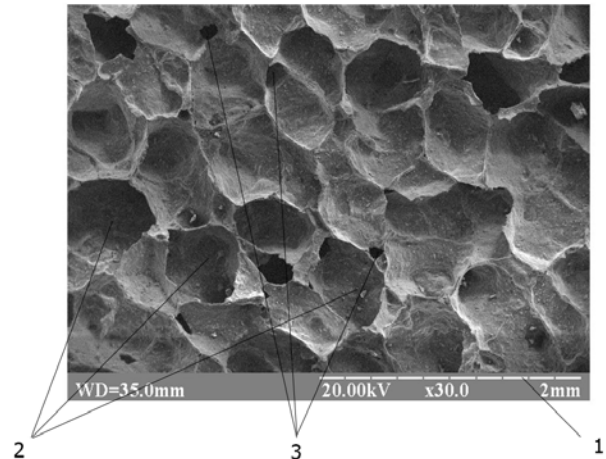


Рис. 2. Мікрофотографія структури модифікованого піноскла:
1 – масштабна смужка; 2 – пори, утворені технічним вуглецем; 3 – пори, утворені модифікатором

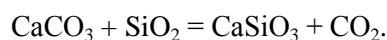
Таким чином, остання обставина є головним поясненням того, чому при застосуванні вуглецевих піноутворювачів можна отримати якісне піноскло з малим водопоглинанням. На противагу цьому, більшість мінеральних піноутворювачів, перш за все карбонатних (доломіт або вапняк) – характеризуються значною хімічною схожістю зі склом; тому ні самі газоутворювачі, ні продукти їх дисоціації (CaO або MgO) не можуть надавати на скляну піну стабілізуючу дію. Дійсно, використовуючи ці газоутворювачі, до сих пір не вдалося отримати піноскло з щільністю близькою до 200 кг/м³, яка не мала б значного водопоглинання. Тому важливим є питання вивчення впливу газоутворювача на властивості кінцевого матеріалу.

Розбухання осередків піноскла в процесі спінювання обумовлено виділенням з газоутворювача в значному обсязі газів в період, коли скляний порошок вже остаточно спікся. За різними показниками, таким як наприклад, величина температури спінювання одного і того ж скла при застосуванні різних газоутворювачів, значні відмінності між температурою розкладання газоутворювача і температурою утворення піни з суміші одного і того ж газоутворювача і скла, можна встановити, що газу утворюються не тільки в наслідок термічного розкла-

дання газоутворювача, але і в результаті хімічної реакції між газоутворювачем і деякими компонентами скла.

Відомо, і було досліджено декілька десятків речовин, придатних до застосування як газоутворювача. Однак з них лише невелика кількість рекомендується для використання при виробництві піноскла. Залежно від виду хімічної реакції, що протікає при виділенні газів, всі запропоновані або випробувані газоутворювачі можна розділити на дві основні групи: 1. Газоутворювачі нейтралізаційні. 2. Газоутворювачі окислювально-відновлюючі.

Нейтралізаційні газоутворювачі – це група газоутворювачів, дія яких є результатом реакції нейтралізації, в даний час за малим винятком в промисловості не використовуються. Деякі компоненти скла, перш за все двоокис кремнію або ж V_2O_3 і P_2O_5 , є в реакції нейтралізації кислоти складової, а газоутворювач, яким зазвичай буває карбонатних лужноземельних металів, – основною складовою. Виділення газу в момент, коли скло вже є досить рідким для утворення піни, можна представити за допомогою простої схеми, наприклад для вапняку:



Даний механізм реакції між склом і карбонатом кальцію, звичайно, є більш складним. Початок розкладання відноситься вже до реакції в твердому стані між частинками вапняку і скла. Важливе значення мають також і лужні метали, що знаходяться в склі, які порушують безперервну сітку з тетраєдрів SiO_2 і роблять таким чином скло більш реакційноспроможним. Крім реакції нейтралізації одночасно відбувається і термічний розклад вапняку, який залежить не тільки від температури, але і від парціального тиску вуглекислого газу в осередках піноскла. Те, що при піноутворенні мова йде не тільки про термічний розпад вапняку, впливає також з того, що парціальний тиск вуглекислого газу для суміші скла з вапняком при даній температурі завжди вище, ніж у чистого вапняку.

З використання карбонату кальцію починали свої праці багато відомих дослідників в області піноскла (Fernandes, Tulyaganov, & Ferreira, 2009a; Fernandes, Tulyaganov, & Ferreira, 2009b; Bai, et al., 2014; Zhu, et al., 2016).

Замість карбонату кальцію можна використовувати і інші карбонати, наприклад карбонат магнію, доломіт, сидерит, а іноді соду або поташ. Ці газоутворювачі застосовуються в кількості 1...2 % від маси скла. При цьому газоутворення протікає швидко і зазвичай при температурах на 30...50 °C нижче (для одного і того ж скла), ніж при використанні вищезазначених вуглецевих газоутворювачів. Однак лише з великими труднощами вдається отримати піноскло з щільністю нижче 200...250 кг/м³. При використанні безбарвного скла піноскло виходить білого кольору, з кольорового скла можна отримати піноскло різного забарвлення. Однак, про отримане в такий спосіб піноскло вірніше говорити як про губчасте, оскільки в ньому окремі осередки нерівномірні як по своїй величині, так і формі і неозброєним оком між ними можна розрізнити багато пов'язаних один з одним каналів. Водопоглинання таких виробів досить високе – від 30 до 90 % за об'ємом.

Як показали дослідження, використання карбонатів як газоутворювачів, не дає можливість отримання матеріалу з замкнутими осередками. Тому ми відмовилися від подібних газоутворювачів і перейшли до досліджень вуглецевих газоутворювачів.

Основними причинами, чому при застосуванні карбонатних газоутворювачів не вдається отримати піноскло з незначним водопоглинанням, може бути кілька. Карбонат кальцію може надавати сприятливий вплив і на рекристалізацію скла при вспіненні, оскільки види технічного скла з підвищеним вмістом оксидів двовалентних металів характеризуються особливо високою схильністю до цієї рекристалізації. При нагріванні порошкової суміші скла та вапняку можна достатньо добре відокремити один від одного процес спікання скла від процесу утворення газів, оскільки у тонкомолотого вапняку термічний розклад відбувається вже при відносно низьких температурах і протікає з реакцією нейтралізації протягом всього часу піноутворення.

Капіляри, якими пронизані окремі осередки карбонатного піноскла, здебільшого мають незначний діаметр і мають вид лабіринтоподібних. Просте занурення блоку піноскла в холодну воду, як це часто робиться для визначення водопоглинання, не забезпечує повного видалення всього повітря з досліджуваних зразків і

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

заповнення капілярів водою. Само собою зрозуміло, в цьому випадку піноскло показує менше значення водопоглинання, ніж це відповідає дійсному обсягу пор. Однак достатньо видалити повітря з пор, наприклад вакумуванням, під водою або кип'ятінням, і водопоглинання цих виробів досягає високих значень.

Окислювально-відновлюючі газоутворювачі призводять до реакцій, за якими певний компонент скла відновлюється газоутворювачем з утворенням газів. Відновлювальним компонентом скла зазвичай буває SO_3 , відновлювачем – вуглець або матеріал, в складі якого він присутній.

Якщо про нейтралізаційні піноутворювачі було сказано, що дійсний механізм протікання реакцій з їх участю досить складний, то в ще більшій мірі це справедливо для газоутворювачів окислювально-відновлювачів.

У схемі реакції наведено відновлення шестивалентної сірки, що міститься в склі, до сірки сульфідної, тоді як в деяких джерелах наводиться відновлення лише до чотиривалентної сірки з утворенням SO_2 . При цьому готове піноскло, отримане за цим способом має запах сірководню і ніколи не має запаху сірчистого газу. На противагу цьому при тривалому нагріванні готового піноскла в великих порожнинах, що утворилися в результаті з'єднання окремих осередків, утворюється і сірчистий газ. Однак останній може утворюватися в результаті взаємної реакції сульфідної сірки, що утворилася раніше, яка прореагувала з триокисом сірки, так і відновленням триокису сірки вуглецем.

У зв'язку з утворенням в піносклі сірководню, який не тільки відчувається по запаху при дряпанні осередків, а й може бути виявлений хімічним шляхом (в кількості декількох відсотків), вельми цікавим є питання функції води. Для створення сірководню необхідна присутність водню, а така значна його кількість в піносклі може виникати тільки за рахунок розкладання води. Сама газоутворювача суміш, як будь-яке тонкозмелене технічне скло, досить гігроскопічна і навіть при повністю автоматизованому виробництві і герметизації всіх транспортних комунікацій готова газоутворювача суміш містить завжди кілька десятків відсотків вологи. Спільна присутність води і вуглецю при температурах близько $820^\circ C$ неминує веде до взаємної реакції з утворенням водного

газу. Швидкість цієї реакції в газоутворювачій суміші може бути досить великою, внаслідок великої реакційної поверхні. Не ясно, яку роль відіграє утворення і присутність водного газу в протіканні загальної окислювально-відновлювальної реакції процесу піноутворення. Однак лабораторними випробуваннями вдалося встановити, що добре висушена газоутворювача суміш спінює набагато гірше, ніж суміш, висушена на повітрі, тобто містить кілька десятків відсотка вологи.

Однак, крім реакції вуглецю з водою або деякими компонентами скла не можна з механізму реакції виключити безпосереднє окислення киснем, що міститься в газоутворювачій суміші і в печі, і оборотні реакції між вуглецем і різними продуктами реакцій, перш за все CO , CO_2 . Встановлено, що в протіканні окислювально-відновлювальних реакцій беруть участь і інші компоненти, перш за все оксиди заліза.

Завдяки протіканню реакцій між газоутворювачем і компонентами скла утворюється необхідна кількість газів, при чому в найсприятливіший момент, коли скло вже спеклося і знаходиться в стані утворювати скляну піну.

В якості головного окислюючого компонента в склі був досліджений триокис сірки. Дійсно вона міститься в кількості $0,1...0,6\%$ практично у всіх технічних стеклах. Як було відзначено раніше, триокис сірки при наявності певного надлишку кисню містять також і скло, яке було зварено з шихти без додавання сульфату, але перебувало з окислюючими сполуками сірки.

Однак, триокис сірки не є єдиним окислюючим компонентом скла, який здатний утворювати з газоутворювачем піноскло. У лабораторії досліджувались процеси отримання скла з окисом сурми, перекису марганцю, перманганатом калію, біхроматом калію та іншими окислювачами. Всі ці види скла в суміші з вуглецем утворювали піноскло. При цьому скло з окисом сурми давали відносно якісне піноскло і при температурах нижчих, ніж скло, яке вміщувало тільки триокис сірки. Однак скло, що містить триокис сірки, дає завжди найбільш якісне і найбільш однорідне піноскло, а оскільки SO_3 є і найбільш дешевим окиснювачем, тому його застосування доцільно у виробництві піноскла.

При використанні вуглецевого газоутворювача з'являється велика можливість вибору, ніж

в разі окислюючого компонента скла. Піноутворення викликають практично всі сполуки вуглецю, якщо вони не містять надлишок кисню і інших окислюючих компонентів.

Вуглець може бути застосований в різних формах, починаючи з ультратонких видів з питомою поверхнею 350000...1200000 см²/г і закінчуючи його природними різновидами, такими як антрацит, тверде вугілля або кокс.

Перераховані вище газоутворювачі застосовуються в різних кількостях, а також за різних температур спінення і витримки. У загальному випадку можна стверджувати, що чим більш висока тонкість помелу і чим в більш чистому вигляді буде використовуватися вуглець, тим менша кількість його буде потрібна, і тим краще буде зовнішній вигляд піноскла. Як було вже відмічено, функція вуглецю полягає не тільки в створенні необхідної кількості газів, але його присутність важлива для стабілізації скла. Тому в піносклі має залишатися певна кількість непрореагованого вуглецю, яка більшою мірою залежить від обсягу, ніж від ваги, і в цьому випадку актуальним є застосування золи-винесення. Спостерігається найбільша залежність вмісту золи-винесення від питомої поверхні частинок вуглецю, тому вуглецеві добавки з більшою питомою поверхнею, наприклад, окремі види технічного вуглецю, можуть бути використані в меншій кількості, ніж вугілля і кокс. Останні подрібнюються одночасно зі склом або окремо приблизно до такої ж тонини помелу, що і порошок скла.

Менший вміст вуглецю проявляє себе в зовнішньому вигляді готового піноскла. Так, піноскло, отримане при застосуванні технічного вуглецю, є більш блискучим і світлим, ніж отримане на основі вугілля та коксу, яке абсолютно чорне і матове. З іншого боку вуглець в тонкозернистих формах схильний до окислення. Тому при його використанні необхідно застосування щільних форм або спінювання повинно відбуватися в печі без сполучення з атмосферою, в цьому випадку скло не піддається окисленню. В іншому випадку піноутворювач вигорить раніше, ніж спечеться скло, в результаті чого не відбудеться спінювання, або вийде піноскло низької якості і, як правило зі значним водопоглинанням. Як тільки скло спечеться, воно обволікає окремі частинки вуглецю, перешкоджаючи його передчасному окислюван-

ню. Оскільки підтримувати неокислювальну або навіть відновлювальну атмосферу, особливо в тунельних печах, досить важко виконати в умовах нормального виробництва, то при застосуванні газоутворювачів з великою питомою поверхнею доводиться працювати при відносно високих початкових температурах в печі для спінювання, щоб газообразуюча суміш спікалась якомога скоріш.

З усіх можливих вуглецевих газоутворювачів на даний час використовується вуглець активного виду, такий же, як при виробництві покриттів. Такі газоутворювачі слід застосовувати для отримання матеріалу з мінімальною щільністю. Кількість вуглецю залежить від його питомої поверхні і коливається від 0,1 до 0,6 %. На підставі проведених досліджень піноскло можна отримати при застосуванні кам'яновугільного коксу, який вводиться в кількості 1,5...3 %. Однак щільність матеріалу виходить вище 300 кг/м³.

На основі природного лускатого графіту також можна виробляти піноскло, що не володіє високим водопоглинанням. Однак його якість гірша, ніж при використанні коксу, і для його отримання потрібно більш висока температура 870...890 °С. Графіт вводиться в тій же кількості, що і кокс.

Для виготовлення піноскла використовувалося скло наступного хімічного складу: SiO₂ (70...74 %), Al₂O₃ (1...5 %), F₂O₃ (0,05...0,3 %), MgO (3...4,5 %), CaO (4...7 %), R₂O (12...16 %), SO₃ (0,1...0,7 %). Дослідження механізму спінювання піноскла показало, що йому притаманні риси, які є загальними для всіх гетерогенних піропластичних матеріалів. В основі його лежать процеси капсуляції частинок газоутворювача і подальше зростання мікропор, обумовлених хімізмом реакцій газоутворення, фазовими перетвореннями, в'язкістю, поверхневим натягом рідкої фази і тиском газів. Відомо, що для газоутворення і формування пористої структури піноскла додатково може додаватися в шихту SO₃, щоб його кількість становила 0,1...0,2 %. При використанні в якості газоутворювача технічного вуглецю хімічна реакція газоутворення проходить за наступною формулою: 2SO₃+C=2SO₂+CO₂.

Відомо, що в якості сировини для виробництва піноскла може використовуватися склобій, але на його основі не виходить якісний матері-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ал, тому при виробництві використовують спеціально зварений склогранулят. Для виготовлення піноскла з низькою щільністю зі склобою, згідно наукової гіпотези, в роботі використовували як модифікатор золу-винесення, яка має в хімічному складі $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3 - 14...20\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 18...25\%$, $\text{SO}_3 - 0,1...0,8\%$. В багатокомпонентній системі $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{CaO}-\text{R}_2\text{O}$ при збільшенні кількості оксидів $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ і Al_2O_3 знижується температура початку розм'якшення і плавлення системи. Завдяки цьому, при нагріванні в процесі твердофазових реакцій виникають легкоплавкі евтектики, які розм'якшуються при більш низьких температурах.

Нами було досліджено теплофізичні і механічні властивості модифікованого золою-

виносу піноскла. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу великою мірою обумовлюється його структурою. У пористих тіл тепло передається через тверду речовину і через порожнечі з газами, що знаходяться в них. Оскільки гази мають малі показники щодо провідності тепла, то ізолююча здатність матеріалу буде тим вище, чим більше його пористість. Але передача тепла всередині пор знижується із зменшенням їх діаметру, завдяки цьому може досягатися мінімальна теплопровідність.

На рис. 3 показані результати визначення теплопровідності отриманого модифікованого теплоізоляційного матеріалу та піноскла, виготовленого на основі склогрануляту та технічного вуглецю.

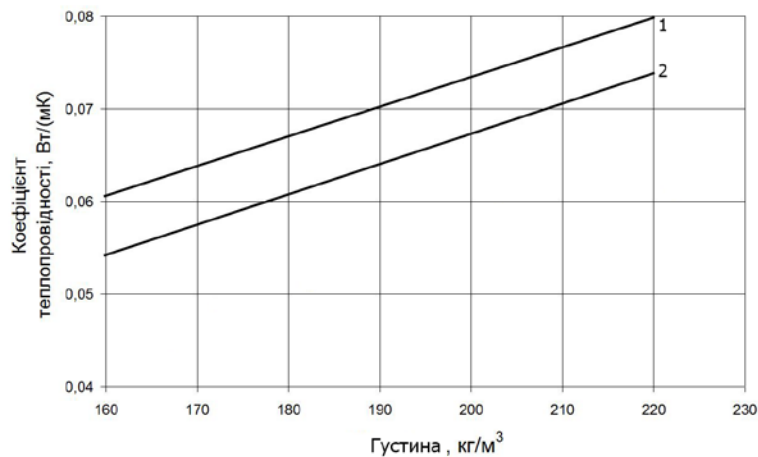


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта теплопровідності від густини матеріалу:

- 1 – піноскло, виготовлене на основі склогрануляту та технічного вуглецю;
2 – модифікований теплоізоляційний матеріал на основі піноскла

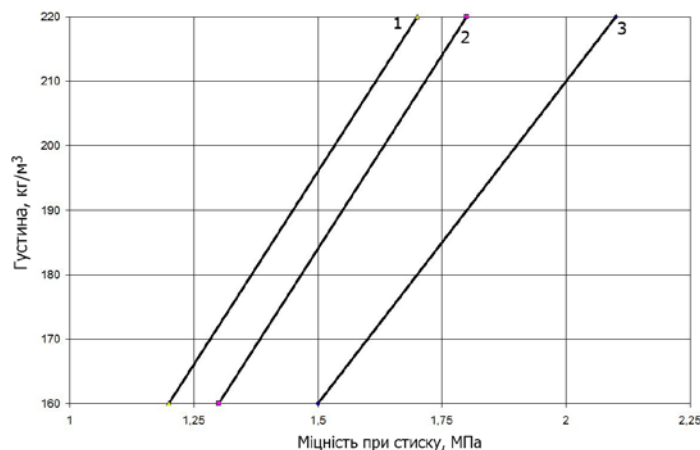


Рис. 4. Графік залежності міцності при стиску піноскла від густини:

- 1 – склогранулят Костянтинівського заводу + технічний вуглець (0,25 %); 2 – склогранулят Лисичанського заводу + технічний вуглець (0,25 %); 3 – склобій віконного скла + технічний вуглець (0,2 %) + зола-виносу ТЕС (10 %)

Результати досліджень (рис. 3) показали, що при введенні модифікатора (золи-виносу) в шихту в інтервалі густини 160...220 кг/м³ коефіцієнт теплопровідності зменшується на 10 %, що здійснюється за рахунок мікропор та рівномірної структури. Це видно на мікрофотографії структури модифікованого піноскла, представленій на рис. 2. На ній видно, що осередки, утворені технічним вуглецем, мають розмір 500...700 мкм, а мікропори, утворені золю-виносу – 50...70 мкм.

Міцність піноскла при стиску значно підвищується при збільшенні рівномірності та зменшенні розмірів пор. Завдяки мікропорам, утвореними модифікатором (золю-виносу ТЕС), утворюється більш рівномірна та міцніша структура піноскла, що видно з рис. 4.

Таким чином, розроблене модифіковане піноскло на основі бою скла та золи-виносу має більш високу міцність при стиску і меншу теплопровідність у порівнянні з піносклом без використання модифікатора, при однаковій густині, та може бути рекомендоване для впровадження у виробництво.

Слід зазначити, що на структуру піноскла істотно впливає технологія спінювання і відпалу. Тому важливо провести дослідження і в цьому напрямку. Піноскло з низьким водопоглинанням в даний час виробляється в промисловому масштабі виключно із застосуванням вуглецевих газотворювачів в металевих формах в тунельних печах.

Застосовується як одностадійний спосіб виробництва зі спіненням і відпалом в одній тунельній печі, так і двохстадійний спосіб, за яким в першій тунельній печі відбувається процес піноутворення, після виходу з печі блоки витягують з форм і піддають відпалу в другій тунельній печі.

Обидва способи мають свої переваги і недоліки. Одностадійний спосіб є більш простим з точки зору самого виробництва і обладнання. Форми в цьому випадку внаслідок їх більш повільного нагрівання та охолодження мають більш тривалий термін служби. Однак кількість форм для однієї закладки внаслідок тривалого часу відпалу піноскла набагато більше, ніж при двохстадійному способі. Так як умови спінювання і відпалу піноскла кардинально відрізняються, при використанні однієї печі доводиться обирати компромісне рішення, яке повинно за-

довольняти обом процесам, хоча оптимальних умов не вдається досягти ні для одного з них.

На противагу цьому, двохстадійний спосіб виробництва дозволяє проводити процес спінювання і відпалу окремо і застосовувати для них дійсно оптимальні умови виробництва (Стаховська, & Червоний, 2012; Вайсман, Кетов, А. А., & Кетов, П. А., 2017).

Двохстадійний спосіб виробництва піноскла передбачає головним чином конструктивне рішення тих виробничих вузлів, які для одностадійного методу вважають важкими і вважаються невідповідними. Перш за все, це відноситься до ділянки між печами для спінювання і відпалу, на якому блоки виймаються з форм при відносно високих робочих температурах, а також до роботи з гарячими формами при їх підготовці та новому заповненні. За умови, що вдається вирішити ці виробничі процеси, двохстадійний спосіб виробництва в порівнянні з одностадійним має перш за все такі переваги:

- а) мінімальний час спінювання;
- б) оптимальне регулювання процесу спінювання в окремій керованій печі, включаючи спікання газотворючої суміші і стабілізацію спінених блоків;
- в) максимальне використання простору печі відпалу за рахунок розстановки блоків вертикально з мінімальними зазорами між окремими блоками;
- г) оптимальне управління процесом відпалу шляхом відпалу блоків без форм в спеціально сконструйованій печі відпалу з регульованим і рівномірним відведенням тепла від поверхні блоків;
- д) мінімальна кількість форм, які після закінчення процесу спінення відразу повертаються в виробництво.

Відповідно до сучасного стану техніки, двохстадійним способом може бути вироблено більш якісне піноскло, ніж за одностадійним, перш за все з більш однорідною структурою і більш низькою щільністю.

Наукова новизна та практична значимість

Отримано подальший розвиток теорії і технологічних прийомів утворення оптимальної структури і складу піноскла за ефергоєфективною промисловою технологією виробництва.

Практична значимість полягає у промисловому впровадженні розробленої технології з

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

отриманням піноскла оптимальної структури, складу і фізико-механічних властивостей для використання як енергоефективного матеріалу для теплоізоляції огорожуючих конструкцій при архітектурному проектуванні сучасних цивільних будівель і споруд.

Висновки

В статті наведені сучасні уявлення про піноскло, як ефективний теплоізоляційний матеріал для використання в архітектурному проектуванні сучасних будівель і споруд. При цьому розглядаються ресурсозберігаючі технології виробництва піноскла в промислових умовах, а саме одностадійний та двостадійний способи виробництва виробів з піноскла. Обраний найбільш ефективний метод виробництва піноскла – двостадійний.

Наведені оптимальні хімічні склади стеклол, за яких формується оптимальна структура і фізико-механічні властивості піноскла для промислового виробництва. Проведено аналіз різних видів газоутворювачів, їх переваги та недоліки. Встановлено, що скло, яке містить триокис сірки, дає завжди найбільш якісне і найбільш однорідне піноскло, а оскільки SO_3 є і найбільш дешевим окиснювачем, тому його застосування доцільно у виробництві піноскла. Але при використанні вуглецевого газоутворювача з'являється велика можливість вибору, ніж в разі окислюючого компонента скла. Тому в роботі вибраний як газоутворювач зола-виносу.

В результаті проведених досліджень були розроблені вироби з модифікованого піноскла з наступними характеристиками: густина – 160...220 кг/м³; теплопровідність – 0,055...0,074 Вт/(мК); водопоглинання – 1,95...2,43 % (об'ємних); міцність при стиску – 1,5...2,1 МПа.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Aaboe, R., & Oiseth, E. (2015). *No Access Foamed Glass – An Alternative Lightweight and Insulating Material*. Oslo, Norway.

- Bai, J., et al. (2014). Preparation of foam glass from waste glass and fly ash. *Materials Letters*, 136, 52-54.
- Fernandes, H. R., Tulyaganov, D. U., & Ferreira, J. M. F. (2009a). Production and characterization of glass ceramic foams from recycled raw materials. *Advances in Applied Ceramics*, 108(1), 9-13.
- Fernandes, H. R., Tulyaganov, D. U., & Ferreira, J. M. F. (2009b). Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*, 35(1), 229-235.
- Zhu, M., et al. (2016). Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. *Construction and Building Materials*, 112, 398-405.
- Вайсман, Я. І., Кетов, А. А., & Кетов, П. А. (2017). Вторинна переробка піноскла при виробництві піносклокристалічних плит. *Будівельні матеріали*, 5, 56-59.
- ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015 (2015). *Енергетична ефективність будівель. Настанова з проведення енергетичної оцінки будівель*. Київ: Мінрегіон України.
- ДСТУ Б EN 15603:2013 (2013). *Енергетична ефективність будівель. Загальне енергоспоживання та проведення енергетичної оцінки* (EN 15603:2008, ІОТ). Київ: Мінрегіон України.
- Китайгородский, И. И., & Бутт, Л. М. (1960). Высокопористое теплоизоляционное пеностекло. *Стекло: Бюл. института стекла*, 2, 3-7.
- Кетов, А. А., Пузанов, І. С., & Сауліна, Д. В. (2007). Досвід виробництва піноскляних матеріалів з склобою. *Будівельні матеріали*, 3, 70-72.
- Кулаев, Н. С., & Гаркаві, М. С. (2007). Піноскло з склобою. *Будівельні матеріали*, 3, 74-76.
- Пшинько, А. Н., Гребенников, В. Н., Федоренко, С. В., Дудник, А. В., & Лисняк, В. П. (2005). Теплоизоляционные изделия на основе алюмосиликатного сырья. *Залізничний транспорт України*, 2, 64-66.
- Пшинько, А. Н., Краснюк, А. В., Гребенников В. Н., & Щербак, А. С. (2010). Анализ технологий производства пеностекла. *Залізничний транспорт України*, 31, 159-163.
- Стаховська, Н. Е., & Червоний, А. І. (2012). Піноскло з несорттованих відходів скла. *Будівельні матеріали*, 11, 24-26.

A. V. KRASNYUK¹, O. V. HROMOVA², A. S. SHCHERBAK³, I. F. ZIBROV^{4*}

¹ Department of Architectural design, land management and building materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+38 (056) 373 15 62, e-mail mail krasnyuk@mail.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1400-9992

² Department of Architectural design, land management and building materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+38 (056) 373 15 46, e-mail mail elenagromova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5149-465

³ Department of Architectural design, land management and building materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+38 (067) 586 45 74, e-mail mail pro-f@ukr.net, ORCID 0000-0003-1340-0284

^{4*} Department of Architectural design, land management and building materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 189 75 80, e-mail mail ivanzibrov44@gmail.com, ORCID 0000-0002-9384-985X

THE MECHANISMS OF FORMATION OF FOAM GLASS STRUCTURE AS AN EFFECTIVE INSULATOR FOR ENCLOSING STRUCTURES IN ARCHITECTURAL DESIGN OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Purpose. The article considers the processes of formation of foam glass as insulation, obtaining different types of glass by using different gas generators and modifying additives. Production processes and technological methods for obtaining foam glass products to increase the energy efficiency of buildings and structures in modern architectural design are considered. **Methodology.** Resource-saving technologies for the production of foam glass in industrial conditions, namely one-stage and two-stage methods of production of foam glass products have been studied. The most effective method of production of foam glass of optimum structure and low density is chosen. The optimal chemical compositions of glasses are determined, according to which the optimal structure and physical and mechanical properties of foam glass for industrial production are formed. **Findings.** The analysis of different types of gas generators is carried out, their advantages and disadvantages are investigated. It has been established that glass containing sulfur trioxide always gives the highest quality and most homogeneous foam glass, and since SO₃ is the cheapest oxidant, its use is appropriate in the production of foam glass. It is established that the higher the fineness of grinding and the purer the carbon will be used, the less it will be needed, and the better will be the appearance of foam glass and lower density and thermophysical properties. Developed modified foam glass based on glass and fly ash has higher compressive strength and lower thermal conductivity compared to foam glass without the use of modifiers, at the same density, and can be recommended for implementation in production by two-stage technology. **Originality.** The development of research on the formation of the optimal structure, composition and improved physical and mechanical properties of foam glass, made with the use of structure modifiers in the form of fly ash and plasticizers by effervescent industrial technology. **Practical value.** The results of the work allow in industrial conditions to obtain foam glass of optimal structure, composition and with physical and mechanical properties that meet the energy efficiency requirements of modern buildings and structures. As a result of the conducted researches products from the modified foam glass with the following characteristics were developed: density – 160 ... 220 kg/m³; thermal conductivity – 0.055 ... 0.074 W/(mK); water absorption – 1.95 ... 2.43 % (volume); compressive strength – 1.5 ... 2.1 MPa.

Keywords: thermal insulation; foam glass; blowing agent; oxidation; reduction; chemical composition; two stag

REFERENCES

- Aaboe, R., & Oiseth, E. (2015). *No Access Foamed Glass – An Alternative Lightweight and Insulating Material*. Oslo, Norway. (in English)
- Bai, J., et al. (2014). Preparation of foam glass from waste glass and fly ash. *Materials Letters*, 136, 52-54.
- Fernandes, H. R., Tulyaganov, D. U., & Ferreira, J. M. F. (2009a). Production and characterization of glass ceramic foams from recycled raw materials. *Advances in Applied Ceramics*, 108(1), 9-13. (in English)
- Fernandes, H. R., Tulyaganov, D. U., & Ferreira, J. M. F. (2009b). Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*, 35(1), 229-235. (in English)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Zhu, M., et al. (2016). Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. *Construction and Building Materials*, 112, 398-405. (in English)
- Vaisman, Ya. I., Ketov, A. A., & Ketov, P. A. (2017). Vtorynna pererobka pinoskla pry vyrobnytstvi pinosklokrystalichnykh plyt. *Budivelni materialy*, 5, 56-59. (in Ukrainian)
- DSTU-N B A.2.2-13:2015 (2015). *Enerhetychna efektyvnist budivel. Nastanova z provedennia enerhetychnoi otsinky budivel*. Kyiv: Minrehion Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU B EN 15603:2013 (2013). *Enerhetychna efektyvnist budivel. Zahalne enerhospozhyvannia ta prove-dennia enerhetychnoi otsinky (EN 15603:2008, YuT)*. Kyiv: Minrehion Ukrainy. (in Ukrainian)
- Kitaygorodskiy, I. I., & Butt, L. M. (1960). Vysokoporistoe teploizolyatsionnoe penosteklo. *Steklo: Byul. instituta stekla*, 2, 3-7. (in Russian)
- Ketov, A. A., Puzanov, I. S., & Saulina, D. V. (2007). Dosvid vyrobnytstva pinosklianykh materialiv z skloboiu. *Budivelni materialy*, 3, 70-72. (in Ukrainian)
- Kulaiev, N. S., & Harkavi, M. S. (2007). Pinosklo z skloboiu. *Budivelni materialy*, 3, 74-76. (in Ukrainian)
- Pshinko, A. N., Grebennikov, V. N., Fedorenko, S. V., Dudnik, A. V., & Lisnyak, V. P. (2005). Teploizolyatsionnye izdeliya na osnove alyumino-silikatnogo syrya. *Zaloznychnyi transport Ukrainy*, 2, 64-66. (in Russian)
- Pshinko, A. N., Krasnyuk, A. V., Grebennikov V. N., & Shcherbak, A. S. (2010). Analiz tekhnologiy proizvodstva penostekla. *Zaloznychnyi transport Ukrainy*, 31, 159-163. (in Russian)
- Stakhovska, N. E., & Chervonyi, A. I. (2012). Pinosklo z nesortovanykh vidkhodiv skla. *Budivelni materialy*, 11, 24-26. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 03.04.2022.

Прийнята до друку 10.05.2022.