

**К. В. БЛОГУБКИНА, О. Ю. ФЕДОРЕНКО, Р. В. КРИВОБОК, А. В. ЗАХАРОВ**

## **РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ ОБТІЧНИКІВ МЕТОДОМ ШЛІКЕРНОГО ЛИТТЯ**

У матеріалах статті розглядається ефективність застосування добавок для стабілізації і розрідження безглинистих шлікерів. Для виробництва радіопрозорих керамічних матеріалів цельзіан-вілемітового складу найбільш ефективним та енергоощадним методом виробництва являється метод шлікерного лиття. Згідно з шихтового складу дана технологія ускладнюється відсутністю глинистих складових, що показує необхідність використання домішок для покращення реології такого шлікеру. Основними характеристиками водних керамічних шлікерів є густина, вологість, текучість, в'язкість, коефіцієнт загусності, швидкість набору маси. Шлікер має задовольняти наступним вимогам: бути вільним від піни і газових включень, мати задовільну текучість за умови невисокої в'язкості; бути агрегативно-стійким (характеризується відсутністю агрегування, коагулювання та осідання часток твердої фази); володіти високою фільтруючою здатністю для забезпечення швидкого і бездефектного набору маси; бути хімічно інертним, забезпечувати достатню міцність і низьку усадку напівфабрикатів, а також можливість їх легкого вивільнення з форми. Тому вибір розріджуючих та адгезійних добавок сприятимуть зменшенню вологості шлікеру при збереженні високої текучості, та зміцнення відливки.

**Ключові слова:** непластичні шлікери, безглинисті шлікери, реологія шлікерів, радіопрозора кераміка, цельзіан, вілеміт.

**Вступ.** Зростання швидкості і маневреності літальних апаратів (ЛА), а також збільшення дальності ураження цілей вимагають підвищення ефективності захисту зовнішнього антенного обладнання та поліпшення функціональних характеристик обтічників [1]. Придатні для їх виготовлення радіопрозорі матеріали (РПМ) мають відповідати вимогам щодо сталості діелектричних характеристик в широкому діапазоні робочих температур, що забезпечує мінімальне спотворення електромагнітного поля в заданому діапазоні робочих частот, а також стійкістю до теплових та аеродинамічних навантажень, ерозійною стійкістю до пилових потоків, снігових та дощових впливів [2]. Тому до матеріалів, з яких виготовляються обтічники, висуваються вкрай жорсткі вимоги: діапазон робочих температур від  $-60$  °С до  $+1500$  °С, тривалість дії максимальної робочої температури не менше 5 хв, межа міцності при вигині  $\sigma_{\text{г}} \geq 150$  МПа, діелектрична проникність  $\epsilon = 1-10$ , тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg} \delta \leq 0,01$ , ТКЛР  $\leq 5,0 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ , теплопровідність  $\lambda \leq 3,0$  Вт/(м·°С), ступінь спікання за водопоглинанням  $W \leq 1$  %, а головне – прозорість в радіочастотному діапазоні (коефіцієнт відбиття радіохвиль  $K \leq 1$  %). Вказані вимоги до функціональних властивостей РПМ, зокрема їх радіофізичних характеристик виключають можливість використання для виготовлення обтічників більшості конструкційних матеріалів, зокрема металів і склопластиків [3].

Аналіз літературних даних [4, 5] показав, що сполуки вілеміту і цельзіану за комплексом властивостей задовольняють вимоги до РПМ за показниками електрофізичних властивостей ( $\epsilon = 5,5 \div 7,0$ ;  $\text{tg} \delta = (1,0 \div 2,0) \cdot 10^{-4}$ ), характеризуються високою температурою плавлення ( $1512$  °С і  $1740$  °С відповідно) і відносно низьким тепловим розширенням (ТКЛР  $3,2 \cdot 10^{-6}$  1/К і  $2,7 \cdot 10^{-6}$  1/К відповідно), що створює передумови для отримання жаростійких і термостійких радіопрозорих керамічних матеріалів на їх основі. Наявність комплексу таких властивостей вказує на переваги цих фаз у порівнянні з кварцом, сподуменом, евкспитом і кордієритом, які складають основу існуючих

радіопрозорих ситалів і керамічних матеріалів

Специфіка технології виготовлення обтічників полягає в тому, що метод формоутворення має реалізувати їх конструктивні особливості та специфічні вимоги до функціональних характеристик і умов експлуатації, а також враховувати технологічність матеріалів з яких виготовляють тонкостінні вироби складної конфігурації [6].

**Мета і задачі дослідження.** Розробка рецептурно-технологічних параметрів для отримання радіопрозорих керамічних матеріалів вілеміт-цельзіанового складу з стабільною реологією.

Задачі досліджень включали:

- 1) обґрунтування складу базової оксидної композиції системи BaO–ZnO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>, використання якої забезпечить одночасний синтез цільових фаз (Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> і BaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>), та розробку складу сировинної суміші;
- 2) обґрунтування способу формоутворення при виготовленні обтічників та визначення шляхів оптимізації технологічних параметрів формування;
- 3) визначення оптимальних параметрів формування з урахуванням комплексу властивостей технологічної суміші з використанням повнофакторного експерименту

**Об'єкт дослідження** – вплив адгезуючих та розріджуючих добавок на реологію непластичних шлікерів для виробництва радіопрозорих керамічних матеріалів цельзіан-вілемітового складу.

**Предмет дослідження** – дослідження реологічних властивостей непластичних шлікерів, які використовують у виробництві керамічних обтічників та визначення оптимальних технологічних параметрів формування напівфабрикатів.

**Обґрунтування вибору методу формування обтічників.** Вибір методу формування обтічників ґрунтується на аналізі переваг та недоліків кожного з них з урахуванням технологічності та економічності доцільності.

© Білогубкіна К.В., Федоренко О.Ю., Кривобок Р.В., Захаров А.В., 2021

Так, для формування головних обтічників можуть бути застосовані методи гарячого лиття з термопластичних суспензій і термопластичного пресування з використанням тимчасової зв'язки. Перевагою даного методу є зменшення усадки при випалі і висока міцність напівфабрикату в сухому стані, що дозволяє здійснювати механічну обробку напівфабрикатів до їх випалу. Втім цей метод знаходиться в стадії лабораторних досліджень і вимагає промислового відпрацювання.

Для електрофоретичного формування використовують висококонцентровані суспензії, що дозволяє отримувати високу густину відливків ніж при звичайному шлікерному литті. Використання методу електрофорезу значно прискорює процес формування при невеликій товщині відливки (до 10 мм), тоді як для товстостінних виробів цей метод не є ефективним. Недоліком цього способу є неможливість формування великогабаритних складно-профільних виробів, оскільки при електрофоретичному формуванні відбувається досить швидкий набір маси на анод (сердечник). При цьому з набраного шару маси в бік катоду відбувається інтенсивне відведення води; відливка, втрачаючи вологу дає усадку, що призводить до утворення тріщин на зовнішній поверхні напівфабрикату. Збільшення щільності струму призводить до виникнення ефекту тиксотропії, результатом якої також є брак відливки. Крім того, при формуванні великогабаритних виробів надзвичайно важко забезпечити рівномірний розподіл вологи в формі, а отже її рівномірну електропровідність. Як наслідок відбувається нерівномірний набір шару маси, а утворена відливка з стінками різної товщини відбраковується [7].

Найбільш технологічним і відносно простим в реалізації методом формування тонкостінних оболонок обтічника є лиття з водних шлікерів, яке відбувається шляхом набору маси на поверхні гіпсової форми. Розрізняють вільне лиття з шлікерів та лиття під тиском. Відливання напівфабрикатів під тиском дозволяє отримати строго визначену товщину, однакову для всіх частин напівфабрикату, що усуває появу дефектів. Отриманий напівфабрикат має щільну упаковку частинок дисперсної твердої фази, а отже високу міцність при згині. Формування литтям під тиском здійснюють з шлікерів з густиною  $\rho = 1860\text{--}1920 \text{ кг/м}^3$ . Слід зазначити, що метод лиття під тиском з водних шлікерів прийнятний тільки для формування лише рівних за товщиною тонкостінних оболонок [8].

Механізм утворення відливки полягає в наступному. Рідка фаза шлікеру під дією капілярних сил проникає в пори форми, переносячи тверду фазу, яка відкладається на стінках форми, утворюючи відливку). Рушійною силою процесу на даному етапі є різниця вологості гіпсової форми і суспензії (шлікеру). Утворений щільний шар матеріалу має малу вологопровідність і уповільнює процес набору маси: зі збільшенням товщини шару маси до 60 мм процесу майже припиняється [9].

Якість відливки багато в чому залежить від того, наскільки точно технологічні параметри шлікерного лиття відповідають властивостям шлікеру, які залежать

від складу технологічної суміші. З цієї причини ключовою проблемою технології є оптимізація технологічних параметрів в кожному конкретному випадку виробництва. Тому дослідження реологічних властивостей непластичних шлікерів, які використовують у виробництві керамічних обтічників та визначення оптимальних технологічних параметрів формування напівфабрикатів є важливою технологічною задачею.

До основних характеристик водних керамічних шлікерів відносять густину, вологість, текучість, в'язкість, коефіцієнт загусності, швидкість набору маси. Шлікер має задовольняти наступним вимогам: бути вільним від піни і газових включень, мати задовільну текучість за умови невисокої в'язкості; бути агрегативно стійким (характеризується відсутністю агрегування, коагулювання та осідання часток твердої фази); володіти високою фільтруючою здатністю для забезпечення швидкого і бездефектного набору маси; бути хімічно інертним, забезпечувати достатню міцність і низьку усадку напівфабрикатів, а також можливість їх легкого вивільнення з форми [7]. Велике значення для отримання стабільних реологічних властивостей безглинистих шлікерів та оптимізації процесу лиття мають наступні фактори: ступінь чистоти матеріалу (відсутність сторонніх іонів в суспензії), умови підготовки матеріалу (попередня термічна обробка, спосіб і ступінь подрібнення), наявність або відсутність вакуумування шлікеру і тривалість його зберігання; вибір розріджувачів добавок для зменшення вологості шлікеру при збереженні високої текучості, вибір адгезійних добавок, які зміцнюють відливку.

Зазвичай при використанні шлікерного лиття в технології традиційних видів тонкої кераміки для поліпшення реології шлікерів та зниження їх вологості на стадії мокрого помелу сировинної суміші додають електроліти-розріджувачі та поверхнево-активні речовини (ПАР). Використання електролітів, типових для глиновмісних шлікерів, не дає бажаного результату при формуванні напівфабрикатів з непластичних шлікерів. Слід також зазначити, що введення розріджувачів неорганічної природи вносить свої корективи у перебіг процесів формування фазового складу радіопрозорих керамічних матеріалів, що може негативно позначитись на їх властивостях.

Незважаючи на значний прогрес в області регулювання властивостей керамічних суспензій при введенні ПАР, відомості щодо умов їх використання вельми обмежені, а для визначення механізмів їх дії необхідні подальші дослідження. Крім того, ПАР, які застосовують в керамічному виробництві, надані досить вузьким спектром.

Багато питань стосується стійкості дисперсних систем (відсутності їх розшарування під час тривалого зберігання), впливу складу часток твердої фази на реологічні властивості (рН, текучість, загусність, швидкість набору маси тощо). Наявні в науковій літературі відомості з цих питань частіше всього обмежуються певними складами мас та дослідженими ПАР та нерідко носять суперечливий характер [9]. Це

можна пояснити тим, що найчастіше досліджуються складні полімінеральні дисперсії, а властивості розчинів поліелектролітів і ПАР, пов'язані зі станом їх макромолекул у розчині, надзвичайно нестабільні і змінюються з концентрацією добавок і ступенем іонізації функціональних груп. У зв'язку з цим не завжди вдається однозначно інтерпретувати результати дослідження систем, що об'єднують властивості складних як у хімічному, так і у фазовому відношенні складових керамічних шлікерів та багатофункціональних поліелектролітів і ПАР, що і викликає необхідність їх подальшого вивчення.

Ефективність стабілізації і розрідження безглинистих шлікерів визначається перш за все величиною створюваного  $\xi$ -потенціалу. Найбільш поширеним методом розрідження таких суспензій є регулювання значення їх водневого показника рН. Зміни  $\xi$ -потенціалу і в'язкості в окремих інтервалах рН визначаються адсорбційним зарядом частинок, стисненням або розширенням подвійного електричного шару.

На основі аналізу рекомендацій щодо їх використання розріджувачів виробництва компанії Zschimmer & Schwarz [10] для подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію реологічних параметрів шлікеру вілеміт-цельзіанової кераміки, обраний препарат Dolapix PC 67. Цей препарат, який за складом є натрієвою сіллю полікарбонатової кислоти, дає можливість приготування шлікерів з високою концентрацією твердої фази, має широкий інтервал дефлокуляції, протидіє тиксотропії та не піниться, що також важливо. Оскільки продукт є рідким і повністю дисоціює у водному розчині, ефект дефлокуляції починається одразу після додавання до шлікеру. Отже, добавка Dolapix PC 67 дає можливість в будь-який час регулювати в'язкість шлікеру безпосередньо на лінії лиття. Дефлокуляційний ефект

Dolapix PC 67 є результатом, з одного боку, іонного обміну добавки і твердих часточок шлікеру та вплив на їх подвійний електричний шар. З іншого боку, полімерні ланцюги прикріплюються до мінеральних часточок і тим самим здійснюють стеричне відштовхування. Це сприяє стабілізації суспензії, оскільки тверді часточки залишаються високодисперсними через відсутність їх агрегування. Рекомендована кількість добавки коливається в межах 0,1 – 0,5% від вмісту твердих речовин у шлікері. Оскільки, вплив добавки на реологію шлікерів залежить від складу твердої частини суспензії, необхідним є експериментальні випробування та визначення оптимальної кількості добавки в кожному конкретному випадку [10].

Для покращення адгезійних властивостей шлікеру використовували полівініловий спирт (ПВС 1788), який є високомолекулярним хімічно інертним полімером, легко розчиняється в воді, володіє плівкоутворюючими властивостями. ПВС є чудовим емульгуючим, адгезійним і плівкоутворювальним полімером, який використовується як адгезійна добавка при виготовленні будівельних сумішей для попередження розтріскування.

**Методика досліджень.** Обґрунтування вибору оксидної композиції для отримання кераміки вілеміт-цельзіанового складу здійснювали на основі аналізу відомостей щодо будови системи  $\text{BaO-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  за даними бази *Material project* [11]. Для розробки сировинних композицій вілеміт-цельзіанової кераміки використовували: глинозем металургійний Г-00, карбонат барію марки «ХЧ», кварцовий пісок Новоселівського родовища (Харківська обл.). Як інтенсифікатор спікання та фазоутворення використовували літій карбонат ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), добавка якого в перерахунок на  $\text{Li}_2\text{O}$  становила 2 мас. % (понад 100 мас. % на суху речовину). Хімічний склад сировинних матеріалів надано в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сировинних матеріалів

Матеріали	Вміст компонентів за хіманалізом, мас.%								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{ZnO}$	$\text{BaO}$	$\text{Li}_2\text{O}$	в.п.п.
Пісок Новоселівський	99,13	0,39	0,04	0,20	0,04	–	–	–	0,20
Цинкові білила	0,06	–	–	–	–	99,92	–	–	0,02
Карбонат барію	–	–	–	–	–	–	70,19	–	29,81
Глинозем металургійний Г-00	0,03	98,70	0,02	–	–	0,25	–	–	1,00
Карбонат літію	–	–	–	–	–	–	–	2	1,94

Технологія виготовлення лабораторних зразків обтікачів з радіопрозрадної кераміки передбачала наступні етапи: отримання керамічних порошків заданого фазового складу (в даному випадку синтез цільових фаз вілеміту і цельзіану за температури 1200 °С), помел продуктів синтезу в планетарному млині, приготування шлікерів з оптимальними реологічними властивостями, формування напівфабрикатів методом відливання шлікеру в гіпсові форми, сушка напівфабрикатів до залишкової вологості не більше 0,5 % та їх випал за температури 1200 °С для забезпечення необхідного рівня спікання готових виробів. Для визначення фазового складу отриманих керамічних порошків проводили

рентгенофазовий аналіз продуктів синтезу із застосуванням дифрактометра ДРОН-3М з  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванням та нікелевим фільтром при стандартних умовах його роботи.

Дослідження реологічних властивостей керамічного шлікеру проводили на водній суспензії, яка містила 70 мас. % тонкодисперсної твердої фази (керамічний порошок вілеміт-цельзіанового складу). Розріджуючі та адгезуючі добавки вводили до суспензії розчиненими у воді. Ступінь розрідження матеріалу визначали за залежностями текучості шлікеру від концентрації добавки розріджувача Dolapix PC 67:  $\tau_1 = f(C_{\text{Dolapix}})$ . Текучість шлікеру ( $\tau_1$ ) визначали за часом витікання 25 мл суспензії крізь отвір піпетки діаметром

4 мм. Набрана до піпетки суспензія повинна витікати суцільним струменем після відкриття верхнього отвору. Для більш точного визначення параметру проводили 5 паралельних вимірювань, за якими знаходили середнє арифметичне значення текучості.

Вологість керамічних шлікерів з добавками визначали після висушування проби в сушильній шафі (за температури 110 °С до постійної ваги) за формулою

$$W = \frac{m_{\text{шл}} - m_{\text{с.р.}}}{P_{\text{шл}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де  $m_{\text{шл}}$  – маса шлікеру, г;  $m_{\text{с.р.}}$  – маса сухої речовини після висушування шлікеру, г.

Визначення швидкості набору черепка проводили з використанням гіпсових стрижнів. Перед проведенням експерименту гіпсові стрижні висушували до постійної ваги за температури 70–75 °С. Для визначення швидкості набору черепка стрижень занурювали до мітки в склянку зі шлікером та витримували впродовж 1 хв. Після набору маси на гіпсові стрижні їх висушували до постійної ваги в сушильній шафі та зважували з точністю до 0,01 м. Швидкість набору шлікеру (г/хв) розраховували за вагою маси, яка була набрана за одиницю часу

$$g_{\text{маси}} = g_1 - g_0 \quad (2)$$

де  $g_{\text{маси}}$  – вага сухої маси, набраної на гіпсовий стрижень за 1 хв, г;

$g_1$  – вага сухого стрижня з масою, г;

$g_0$  – вага сухого гіпсового стрижня, г.

Міцність зразків в сухому стані вимірювали на пристрої для визначення міцності при згині, який забезпечує швидкість навантаження в межах 0,05–1,0 Н/с. Для досліджень формували зразки довжиною 60 мм і діаметром 8 мм, які після сушки за температури 110 °С охолоджували в ексікаторі. Перед випробуванням вимірювали діаметр зразка мікрометром з похибкою  $\pm 0,5$  мм. Зразок вміщували на

опорні призми та поступово збільшували навантаження

Таблиця 2 – Вміст компонентів шлікеру з вологістю 30%

Сировинні матеріали	Вміст компонентів, мас. %						
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
Суміш цельзіану та вілеміту у співвідношенні 1:1	70	70	70	70	70	70	70
Полівініловий спирт (ПВС 1788)	0,35	0,58	0,82	1,05	–	–	–
Натрієва сіль полікарбонатової кислоти (Dolarix 3С 67)	–	–	–	–	0,2	0,3	0,4

\* Серія Р – шлікери з добавкою ПВС 1788; \*\*Серія D – шлікери з добавкою Dolarix PC 67

Вплив розріджувальної добавки Dolarix PC 67 та адгезійної добавки ПВС 1788 добавок на текучість, набір черепка та міцність відливки проілюстровано у вигляді графічних залежностей (рис. 1).

Як видно з рис. 1а, при введенні ПВС 1788 в межах дослідних концентрацій підвищується міцність при згинанні відливок у висушеному стані.

до моменту, коли відбувалось руйнування зразка. Межу міцності при згинанні зразків в сухому стані обчислювали за формулою

$$\sigma_{\text{зг}} = \frac{7,64 \cdot P}{d^3} \quad (3)$$

де P – руйнівне навантаження, г;

d – діаметр зразка, мм.

Для випалених зразків методом гідростатичного зважування визначали характеристики спікання (уявну густину  $\rho$ , водопоглинання W, загальну пористість P<sub>3</sub>), а також основні властивості, що обумовлюють функціональність матеріалів: діелектричні характеристики ( $\epsilon$ , tg $\delta$ ), межу міцності на стиск  $\sigma_{\text{ст}}$ , та мікротвердість (HRA, HV). Вимірювання діелектричних втрат матеріалів проводили на автоматизованому приладі «Тангенс-3М» при діапазоні робочих напружень до 270 В у інтервалі частот 48–62 Гц. Твердість зразків кераміки визначали за методом Rockwell (за глибиною проникнення в матеріал алмазної пірамідки за умови плавного навантаження від 1 МПа).

**Експериментальна частина.** Відповідно до задач досліджень в якості базової обрано оксидну композицію системи BaO–ZnO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>, склад якої (в мас. %: BaO – 15,91; ZnO – 36,52; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 15,65; SiO<sub>2</sub> – 31,92) відповідає заданому співвідношенню цільових фаз (BaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub> : Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> = 1:1) з урахуванням стехіометричного складу сполук. Розроблений склад базової сировинної композиції характеризується наступним вмістом компонентів, мас. %: пісок новоселівський – 30,05; цинкові білила – 34,11; карбонат барію – 21,16; глинозем металургійний Г-00 – 13,67; Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – 8,41 (понад 100 % на суху речовину).

Дослідження технологічних параметрів шлікерів, які містили розріджувальні та адгезувальні добавки проводили за умов, узагальнених в табл. 2. При цьому вологість досліджених суспензій, що містили добавки становила 30 %.

Найбільшою міцністю характеризуються зразки P<sub>4</sub> та P<sub>3</sub> (7,22 МПа та 6,12 МПа відповідно), що містять понад 0,8 мас. % ПВС. Це є позитивним технологічним фактором з точки зору транспортування відливок та можливостей їх механічної обробки. Однак введення адгезуючої добавки призводить до погіршення текучості шлікеру.

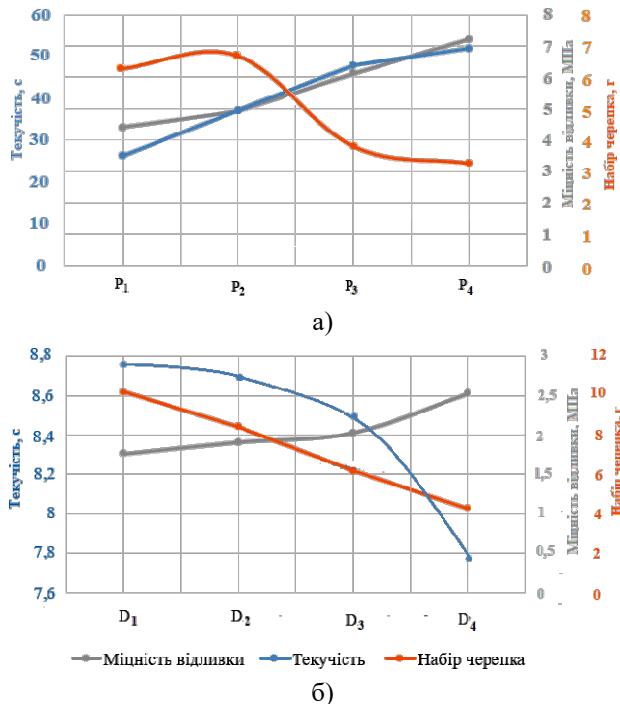


Рис. 1 – Вплив добавок на властивості шлікеру та міцність відливки: а) адгезійна добавка ПВС 1788; б) розріджувальна добавка Dolapix PC 67

Натомість при додаванні до шлікеру 0,2 мас. % розріджувача Dolapix PC 67 спостерігається поліпшення текучості шлікерів: у порівнянні з

еталонним шлікером D<sub>0</sub> час витікання 25 см<sup>3</sup> суспензії D<sub>1</sub> крізь отвір піпетки зменшився на 10 с. При подальшому збільшенні концентрації розріджувальної добавки з 0,2 мас. % до 0,6 мас. % (понад 100 % на суху речовину) змінюється несуттєво (час витікання шлікеру зменшується на 1 с). При цьому трохи збільшується міцність сухої виливки (з 1,76 МПа до 2,53 МПа), проте спостерігається погіршення набору маси. Тому, введення Dolapix PC 67 більше за 0,4 мас. % не є доцільним. Враховуючи отримані дані, в подальшому досліджували можливість комбінування розріджувальної та адгезувальної добавок, що дозволить оптимізувати технологічні параметри шлікерного лиття вілеміт-цельзіанової кераміки.

Визначення складу оптимальної комплексної добавки здійснювали з використанням повного факторного експерименту ПФЕ 2<sup>2</sup>. Як фактори варіювання досліджували вміст добавок ПВС 1788 та Dolapix PC 67, вплив яких на властивості шлікеру був досліджений на попередньому етапі. Вміст адгезувальної та розріджувальної добавок, варіювали в межах концентрацій, зазначених в табл. 3. Представлені дослідження проводили для шлікерів з вологістю 30 %.

Результати досліджень одночасного впливу адгезувальної та розріджувальної добавок ілюструють діаграми залежностей текучості шлікеру, швидкості набору маси та міцності відливок у сухому стані від їх концентрації (рис. 2 та рис. 3).

Таблиця 3 – Матриця планування та натуральний план експерименту ПФЕ 2<sup>2</sup>

№ досліджу	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Полівініловий спирт (ПВС 1788)	Натрієва сіль полікарбонатової кислоти (Dolapix PC 67)
1	+ 1	+ 1	1,05	0,42
2	- 1	+ 1	0,35	0,42
3	+ 1	- 1	1,05	0,14
4	- 1	- 1	0,35	0,14
Контрольна точка			1,05	0,28

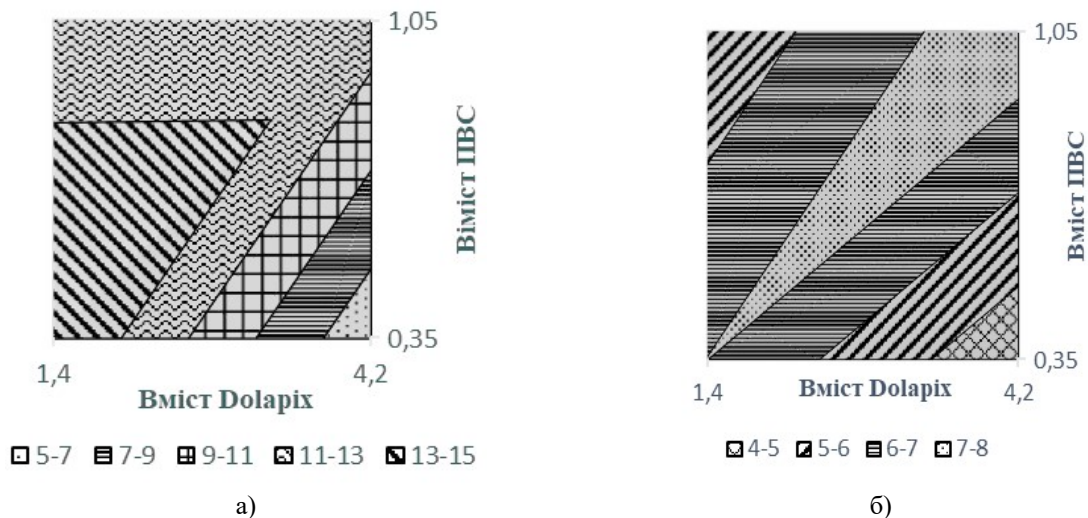


Рис. 2 – Вплив добавок на властивості шлікеру та відливки: а) текучість шлікеру, с; б) швидкість набору маси, г/хв;

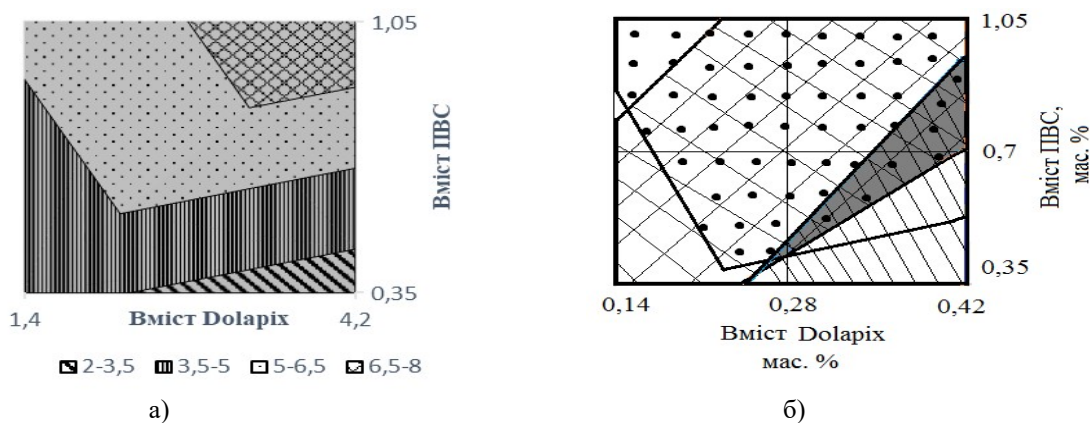


Рис. 3 – Вплив добавок на властивості шлікеру та відливки: а) міцність відливки при згинанні, МПа;

- б) швидкість набору маси 6-8 г/хв; міцність відливки при згині, 5-8 МПа  
 текучість шлікеру 5-11 с; область оптимальних концентрацій добавок

З використанням отриманих залежностей визначено області концентрацій добавок, що за умови їх одночасної присутності забезпечують необхідний рівень властивостей шлікеру (рис 2а, 2б, 3а), які визначають технологічність формування тонкостінних оболонок обтічників з вілеміт-цельзіанової кераміки з водних шлікерів: текучість –  $5 \div 11$  с; швидкість набору маси –  $6 \div 8$  г/хв, а також достатню міцність відливки після сушки  $5 \div 8$  МПа.

Аналіз результатів проведеного експерименту дозволив визначити область оптимальних концентрацій складових комплексної добавки, яка дозволяє виготовляти шлікер високої текучості з задовільними фільтраційними властивостями та отримати відливки високої міцності (рис. 3б). З урахуванням отриманих даних, а також міркувань економічної доцільності визнано наступний оптимальний вміст розріджувальної та адгезійної складових комплексної добавки:

- Dolapix PC 67 – 0,38 мас. % (понад 100 на суху речовину – СР);
- ПВС 1788 – 0,7 мас. % (понад 100 % на СР).

Шлікер, модифікований розробленою комплексною добавкою характеризується текучістю ( $\tau_1 = 9 \div 11$  с), задовільною швидкістю набору маси ( $6 \div 7$  г/хв) та забезпечує підвищену міцність відливки в сухому стані ( $5 \div 6,5$  МПа).

**Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку.** В результаті проведених досліджень визначено вплив розріджувачої (Dolapix PC 67) та адгезійної (ПВС 1788) добавок на технологічні властивості непластичного шлікеру вілеміт-цельзіанового складу. Дослідження впливу розріджувачої добавки Dolapix PC 67 та адгезуючої добавки ПВС 1788 на властивості керамічного шлікеру та міцність відливки показали, що їх окреме використання не є доцільним.

Встановлено, що з використанням адгезуючої добавки дозволяє збільшити міцність відливки до 7,22 МПа, однак при цьому шлікер втрачає текучість.

Натомість використання лише розріджувальної добавки покращує показник текучості шлікеру, однак не забезпечує необхідної міцності відливки в сухому стані. Визначено оптимальний склад комплексної добавки (0,38 мас. % Dolapix PC67 та 0,7 мас. % ПВС 1788 понад 100 % на суху речовину), яка забезпечує отримання шлікеру з високою текучістю ( $\tau_1 = 9 \div 11$  с) і достатньою швидкістю набору маси ( $6 \div 7$  г/хв), який здатний утворювати відливку з підвищеною міцністю на згин ( $5 \div 6,5$  МПа). Використання цієї добавки забезпечує технологічність процесу шлікерного лиття виробів складної конфігурації (головних обтікачів) при використанні вілеміт-цельзіанової кераміки

### Список літератури

1. Ivahnenko, Ju.A., Varrik, N.M., & Maksimov, V.G. (2016). Vysokotemperaturnye radioprozrachnye keramicheskie kompozicionnye materialy dlja obtekatelej antenn i drugih izdelij aviacionnoj tehniky (obzor). *Trudy VIAM*, 5 (41), 36–43. <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/ploads/articles/pdf/957>
2. Gnesin, G. G., & Skorohod, V. V. (Eds.) (2008). Radioprozrachnye materialy. Neorganicheskoe materialovedenie: Jencikloped. izd. V 2-h t., 2 (2), K.: Nauk. dumka, 204–210.
3. Suzdal'cev, E.I. (2014). Keramicheskie radioprozrachnye materialy: vchera, segodnja, zavtra. *Tehnologija*, 10, 5–18. <https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/560/565>
4. Inorganic Material Database AtomWork. National Institute for Materials Science (NIMS). URL: <http://crystdb.nims.go.jp>
5. Sebastian M.T. Low loss dielectric ceramic materials and their properties / M.T. Sebastian, R. Ubic, H. Jantunen // *International Materials Reviews*. 2015. Vol. 60. Iss. 7, pp. 392–412.
6. Zaichuk A.V., Amelina A.A., Karasik Y.V. et al (2019). Radiotransparent ceramic materials of spodumene-cordierite composition. *Functional materials*. № 26 (1), pp. 174–181.
7. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Dajneko K.B. et al. (2017) Optimization of the compositions area of radiotransparent ceramic in the SrO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system. *Przeglad Elektrotechniczny*. № 93 (3), pp. 79–82.
8. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V. et al. (2017) Development of new compositions of ceramic masses in SrO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system. *Functional Materials*. № 24(1), pp. 162–167.
9. Lisachuk G., Kryvobok R., Zakharov A. et al. (2017). Influence of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in SrO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 1 (6–85), pp. 10–15.

10. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Fedorenko O.Yu., Zakharov A.V. (2015). Ceramic radiotransparent materials on the basis of BaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and SrO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> systems *Épitöanyag – J. of Silicate Based and Composite Materials*. № 67(1), pp. 20–23.
11. База даних Material project [Електронний ресурс].– <https://materialsproject.org/#apps/phasediagram>

## References (transliterated)

1. Ivakhnenko, Yu.A., Varrick, NM, & Maksimov, VG (2016). High-temperature radio-transparent ceramic composite materials for antenna fairings and other aviation equipment (review). *Trudy VIAM*, 5 (41), 6–43. <http://viamworks.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/957>
2. Gnesin, G.G., & Skorohod, V.V. (Eds.) (2008). Radioprozrachnye materials. *Inorganic materials science: Encyclopedia*. ed. Is., 2 (2), K.: Nauk. opinion, 204–210.
3. Suzdal'cev, E.I. (2014). Keramicheskie radioprozrachnye materials: yesterday, today, tomorrow. *Technology*, 10, pp. 5–18. <https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/560/565>
4. Inorganic Material Database AtomWork. National Institute for Materials Science (NIMS). URL: <http://crystdb.nims.go.jp>
5. Sebastian M.T. Low loss dielectric ceramic materials and their properties/M.T. Sebastian, R. Ubc, H. Jantunen // *International Materials Reviews*. 2015. Vol. 60. Iss.7, pp. 392–412.
6. Zaichuk AV, Amelina AA, Karasik YV et al (2019). Radio-transparent ceramic materials of spodumene-cordierite composition. *Functional materials*. № 26 (1). pp. 174–181.
7. Lisachuk GV, Kryvobok RV, Daineko KB et al. (2017). Optimization of the compositions area of radiotransparent ceramic in the SrO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> system. *Electrical inspection*. № 93 (3), pp. 79–82.
8. Lisachuk GV, Kryvobok RV, Zakharov AV et al. (2017). Development of new compositions of ceramic masses in SrO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> system. *Functional Materials*. № 24(1) pp. 162–167.
9. Lisachuk G., Kryvobok R., Zakharov A. et al. (2017). Influence of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in SrO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 1(6–85), pp. 10–15.
10. Lisachuk GV, Kryvobok RV, Fedorenko OY, Zakharov AV (2015). Ceramic radiotransparent materials on the basis of BaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and SrO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> systems *Épitöanyag – J. of Silicate Based and Composite Materials*. № 67(1), pp. 20–23.
11. Database Material project [Electronic resource]. <https://materialsproject.org/#apps/phasediagram>

Надійшла (received) 19.11.2021

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

**Білогубкіна Карина Володимирівна (Белогубкина Карина Владимировна, Bilohubkina Karina)** – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4200-7019>; e-mail: kari.rindel@gmail.com

**Федоренко Олена Юрївна (Федоренко Елена Юрьевна, Fedorenko Olena Yuriiivna)** – професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0831-3485> e-mail: fedorenko\_e@ukr.net

**Кривобок Руслан Вікторович (Кривобок Руслан Викторович, Kryvobok Ruslan Viktorovich)** – заст. завідувача НДЧ, доцент кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2334-4434> e-mail: krivobok\_ruslan@ukr.net

**Захаров Артем Вячеславович (Захаров Артем Вячеславович, Zakharov Artem Viacheslavovich)** – заст. завідувача НДЧ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0120-8263> e-mail: zakharovartem106@gmail.com

**К.В. БЕЛОГУБКИНА, Е.Ю. ФЕДОРЕНКО, Р.В. КРИВОБОК, А.В. ЗАХАРОВ**  
**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОБТЕКАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ШЛИКЕРНОГО ЛИТИЯ**

В материалах статьи рассматривается эффективность применения добавок для стабилизации и разжижения безглинистых шликеров. Для производства радиопрозрачных керамических материалов цельзиан-виллемитового состава наиболее эффективным и энергосберегающим методом производства является метод шликерного литья. Согласно шихтовому составу данная технология усложняется отсутствием глинистых составляющих, что показывает необходимость использования примесей для улучшения реологии такого шликера. Основными характеристиками водных керамических шликеров являются густота, влажность, текучесть, вязкость, коэффициент загустительности, скорость набора массы. Шликер должен удовлетворять следующим требованиям: быть свободным от пены и газовых включений, иметь удовлетворительную текучесть при невысокой вязкости; быть агрегативно устойчивым (характеризуется отсутствием агрегирования, коагулирования и оседания частиц твердой фазы); обладать высокой фильтрующей способностью для обеспечения быстрого и бездефектного набора массы; быть химически инертным, обеспечивать достаточную прочность и низкую усадку полуфабрикатов, а также возможность их легкого высвобождения из формы. Поэтому выбор разбавляющих и адгезионных добавок будут способствовать уменьшению влажности шликера при сохранении высокой текучести и укреплению отливки.

**Ключевые слова:** шликерное литье, непластические безглинистые шликеры, реологические свойства шликеров, радиопрозрачная керамика, цельзиан, виллемит.

**К. V. BILOHUBKINA, E. Yu. FEDORENKO, R. V. KRIVOBOK, A. B. ZAKHAROV**  
**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR THE FORMATION OF FASTS BY THE SLIDING CASTING METHOD**

The materials of the article consider the effectiveness of additives for stabilization and dilution of clay-free slippers. For the production of radio-transparent ceramic materials of Celsius-Willemite composition, the most efficient and energy-saving method of production is the method of slip casting. According to the charge composition, this technology is complicated by the lack of clay components, which shows the need to use impurities to improve the rheology of such a slip. The main characteristics of aqueous ceramic slippers are density, humidity, fluidity, viscosity, density factor, rate of mass accumulation. The slip must meet the following requirements: be free from foam and gas inclusions, have satisfactory fluidity under low viscosity; be aggregatively stable (characterized by the absence of aggregation, coagulation and sedimentation of solid phase particles); have a high filtering capacity to ensure fast and defect-free weight gain; to be chemically inert, to provide sufficient strength and low shrinkage of semi-finished products, as well as the possibility of their easy release from the mold.

**Key words:** slip casting, non-plastic clay-free slippers, rheological properties of slippers, radiopaque ceramics, Celsius, Willemite.