

УДК 004.94:620.22

*Ю.О. Казимиренко, О.В. Гайдаєнко***КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР СПІКАННЯ СКЛЯНИХ МІКРОСФЕР****Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна**

Композиційні матеріали, одержані за технологіями спікання скляних мікросфер, є перспективними для підводної техніки. Високі показники гідростатичної міцності у поєднанні з тепло- і звукоізоляційними властивостями зумовлені зберіганням мікросферами форми, максимально наближеної до сферичної. Запропоновано комп'ютерну модель розподілу температур, в основу розробки якої покладено фізико-хімічні уявлення про процеси структуроутворення склокомпозитів спікання скляних мікросфер натрійборсилікатного складу та оброблення експериментальних результатів вимірювань температур. Методологія моделювання ґрунтується на принципах декомпозиції задачі дослідником і ранжування температурно-часових параметрів; за функціональний критерій прийнято співвідношення гідростатичної міцності до щільності зразків; програмний застосунок написано мовою Python. Для спікання скляних мікросфер застосовано експериментальну установку з можливістю виконання досліджень температурних полів і термодформаційних процесів в умовах реального часу; коефіцієнти температуропровідності спікання визначено методом регулярного режиму. Отримані результати спрямовані на вирішення важливої науково-практичної проблеми розвитку технологій виготовлення склокомпозитів стратегічного призначення.

Ключові слова: спікання, структуроутворення, декомпозиція, умови реального часу, ранжування, температуропровідність, гідростатична міцність.

DOI: 10.32434/0321-4095-2024-154-3-67-74

Вступ

Головною метою технологій створення сучасних композиційних матеріалів для суднобудування, підводної техніки, авіа- та ракетобудування є формування вузькоспеціальних властивостей, таких, як гідростатична міцність, радіаційна стійкість, демпферувальна здатність, термостійкість, ще реалізується шляхом введення до їх складу скляних мікросфер – замкнених тонкостінних (0,5–2,0 мкм) сферичних оболонок дисперсією 10–150 мкм [1]. Фахівці фірм «Dupont» і «Ceno Technologies» (США); «Fuuyi», «Toshiba», «Carasu K.K.» і «Hata Hisao K.K.» (Японія); «Mineralien-Werke» і «Ilmenau» (Німеччина) постійно працюють над удосконаленням їх властивостей та розробкою нових складів.

Фізико-хімічні основи більшості технологій

одержання композиційних матеріалів і покриттів ґрунтуються на низькотемпературному приготуванні колоїдних розчинів з рівномірним перемішуванням неорганічних мікросфер зі сполучниками амінного типу, синтетичним латексом, акриловими суспензіями тощо, які забезпечують однорідність складу, певну щільність і підвищення міцності зчеплення з поверхнею [2]. Через деструкційні процеси та плинність у міжфазній ділянці полімер-наповнювач їх використання неможливе в умовах підвищених температур і теплових ефектів. Застосування високотемпературних технологій, зокрема спікання, надають змоги з'єднувати між собою скляні мікросфери без застосування полімерних сполучників [3]. Ці матеріали отримали назву «синтактичне піноскло» і поєднують у собі високі акустичні властивості і

© Ю.О. Казимиренко, О.В. Гайдаєнко, 2024



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Computer modeling of temperature distribution in the course of sintering of glass microspheres

гідростатичну міцність, що вирішує багато конструкційних питань з проектування підводних технічних засобів. Формування комплексу цінних властивостей обумовлено особливостями структури, головними умовами формування якої є зберігання форми скляних частинок, максимально наближеної до сферичної. Таким чином, актуальним питанням для подальшого розвитку технології є дослідження впливу температурних чинників на процеси структуроутворення протягом спікання скляних міросфер, що саме й зумовлює формування експлуатаційних властивостей склокомпозиту.

Метою роботи є дослідження та моделювання розподілу температур в процесі спікання скляних міросфер за умовами контролю структури.

Методика експерименту

Матеріали

Експериментальні дослідження здійснені на скляних міросферах натрійборсилікатного складу, розмір скляних міросфер коливається від 20 до 100 мкм (табл. 1) фірми «ЗМСо» (INTA 3М, офіційний дистриб'ютор компанії «ЗМ» в Україні).

Технологічний цикл одержання матеріалу

Технологічний цикл одержання матеріалу включає підготовку міросфер (дозування, зважування); їх засипання у форму (графітову, сталеву, корундову); віброутрушування з метою щільного угруповання частинок різної дисперсності; поступовий підйом температури з прогріванням засипки міросфер та підпресуванням невеликими тисками (від 0,2 до 0,7 МПа); ізотермічне витримування при температурах 600–650°C; зняття навантаження після остигання зразків разом з піччю.

Комп'ютерна модель

В основу розроблення комп'ютерної моделі покладено фізико-хімічні уявлення про процеси структуроутворення склокомпозитів на кожному з технологічних етапів спікання скляних міросфер. При цьому процес спікання розглядається як складна система з формалізацією критеріїв. Запропонована концепція ґрунтується на чотирьох основних складових, а саме: банк експериментальних напрацювань з технологічних параметрів і режимів; бібліотека математичних модулів (рівнянь регресії з планування експериментів, розрахунків усадочних процесів, геометричних

розмірів прес-форм тощо); банк мікроструктур, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей одержаних зразків склокомпозитів.

Для побудови комп'ютерної моделі використано метод декомпозицій задачі дослідником [4] і ранжирування застосовано для визначення проблемних питань та підтвердження пріоритетності технологічних факторів, які визначають спікання скляних міросфер обраного складу за умовами зберігання ними форми, максимально наближеної до сферичної, що саме й визначає щільність і гідростатичну міцність отриманих склокомпозитів. На відміну від відомих методик [5] з розробкою ієрархічних зав'язків між факторами в роботі пропонується застосовувати інструментарій комп'ютерної алгебри [6] з числовим описом через коефіцієнти наступних факторів:

– X_1 – температура проміжного прогрівання шихти зі скляних міросфер, при якій (350–500°C) для формування приконтатної ділянки прикладається невеликий (0,2–0,7 МПа) тиск, якій зберігається до закінчення процесу спікання і знімається лише після повного остигання печі;

– X_2 – час виходу на режим ізотермічного витримування; він залежить від температуропровідності шихти зі скляних міросфер при підвищенні температури;

– X_3 – температура ізотермічної витримки (600–650°C), при якій відбувається остаточне формування пористого каркаса склокомпозита.

За функціональний критерій X прийнято співвідношення гідростатичної міцності (σ_r) до щільності (ρ) зразків склокомпозитів, одержаних спіканням скляних міросфер.

Програмний застосунок написано мовою програмування Python [7].

Технологічне обладнання, устаткування, вимірювання температур

Для експериментальних досліджень застосовано авторський зразок експериментальної установки [8], що складається з шахтної печі вертикального завантаження (рис. 1), яка обладнана механічним пресувальним пристроєм з індикатором часового типу для вимірювання усадочних процесів.

За допомогою блока управління регулюються процеси підйому та підтримки температури, задля її безпосереднього вимірювання викори-

Таблиця 1

Хімічний склад порожніх скляних міросфер, мас.%

Фірми-виробники		SiO ₂	B ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	S	F
«ЗМСо» (США)	№ 1	60–90	1–30	0–25	2–20	0–10	<0,5	0–5
	№ 2	70–80	2–6	8–15	3–8	–	0,2–1,5	–

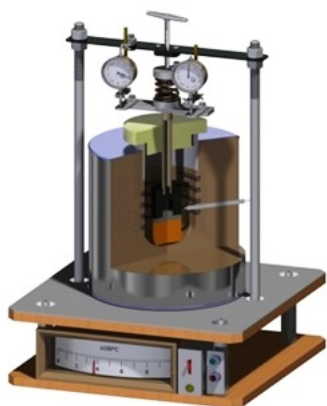


Рис. 1. Установа, що передбачає контроль температури при спіканні скляних мікросфер

стовується перетворювач термоелектричного (термопара) градування ХА (ДСТУ 2837-94), який розміщено безпосередньо у засипці скляних мікросфер і з'єднано з мілівольтметром. Контроль рівномірності температурного поля здійснюється за допомогою додаткової контрольної термопари, яка за необхідністю вставляється у технологічну кришку з отвором. Кореляція даних при нагріванні до температури 650°C досягається шляхом зіставлення показників контрольної термопари з показниками скляного термометра з ртутним заповнювачем, який вставляється безпосередньо при засипанні у графітовий контейнер мікросфери. Результати розрахунків виявили характерні для реперних точок середньоквадратичне відхилення (δ) (табл. 2), значення якого далі використані при обчисленнях та моделюванні. Спостереження за усадочними процесами дає можливість зупинити спікання у певний час з метою одержання необхідної структури та запобігання бракування.

З метою встановлення особливостей формування геометрії контактної ділянки під час спікання скляних мікросфер на кожному з температурно-часових етапів виконувались мікроструктурні дослідження (оптичний мікроскоп ММР-2Р, мікрозйомка у темному полі) з визначенням відкритої пористості зразків шляхом їх просочення гасом. Висновки про особливості процесів структуроутворення склокомпозитів зроблено за допомогою аналізу діаграм стану систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ і

$\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [9] та зіставлення з результатами досліджень, наведених в роботі [10].

В основу досліджень теплофізичних властивостей спечених мікросфер покладено теоретичні уявлення про процеси теплообміну у дисперсних системах [11]. Методологія постановки експерименту полягає у застосуванні методу регулярного теплового режиму [8] за монотонним нагріванням до температури 600°C шихти зі скляних мікросфер, для чого застосовано лабораторний стенд (рис. 2) кафедри теплофізики і суднових паровиробних установок. Коефіцієнт температуропровідності визначено за розрахунками темпу охолодження спечених мікросфер, для чого застосовано результати вимірювання термо-ЕДС в режимі реального часу. Випробування зразків склокомпозитів щільністю 350–650 кг/м³ на міцність при всебічному гідростатичному стисканні здійснено за методикою, наведеною у роботі [3].

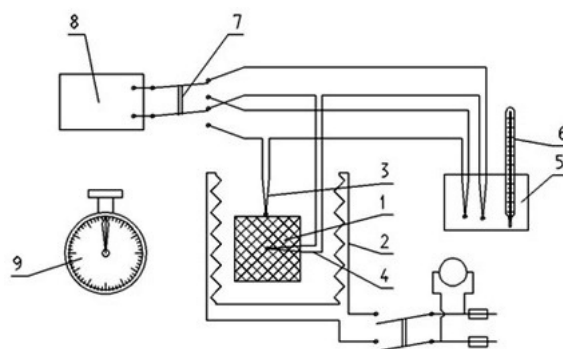


Рис. 2. Експериментальний стенд: 1 – дослідний зразок; 2 – електронагрівач; 3, 4 – термопара градування ХК; 5 – повітряний термостат; 6 – термометр; 7 – перемикач; 8 – потенціометр; 9 – секундомір

Результати і обговорення

Експериментальні дослідження і особливості процесів структуроутворення склокомпозитів

Моделювання розподілу температур являє собою сукупність експериментальних досліджень температур під час спікання скляних мікросфер у межах до 750°C (рис. 3), коефіцієнтів температуропровідності засипаних у форму мікросфер при їх монотонному нагріванні до 600°C (рис. 4) та комп'ютерне оброблення одержаних даних з визначенням вагових коефіцієнтів температурно-часових факторів, які безпосередньо впливають

Таблиця 2

Середньоквадратичне відхилення д температур у реперних точках

Реперні точки температур, °C	100	150	200	350	500	650
Середньоквадратичне відхилення, δ	+8	+8	+4	+3	-1	+5

на формування певної структури склокомпозиту (рис. 5, 6) щільністю 350–650 кг/м³ з високою гідростатичною міцністю (рис. 7). Процес структуроутворення проаналізовано шляхом вивчення геометрії контактної ділянки між спеченими скляними мікросферами (рис. 5).

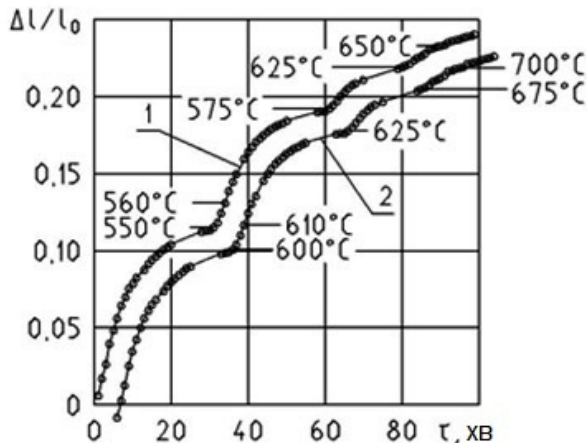


Рис. 3. Кінетика спікання скляних мікросфер для складу: 1 – за № 1; 2 – за № 2

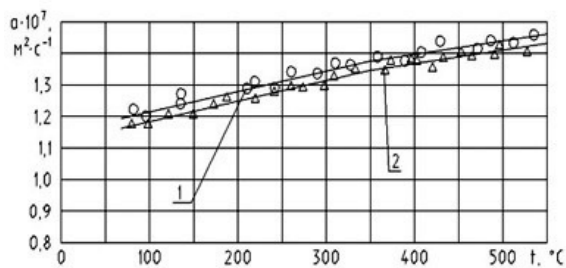


Рис. 4. Коефіцієнти температуропровідності скляних мікросфер складу: 1 – за № 1; 2 – за № 2

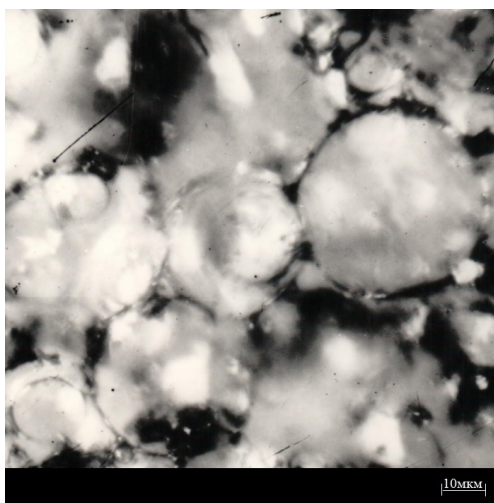


Рис. 5. Оптична мікрофотографія спечених мікросфер (×750)

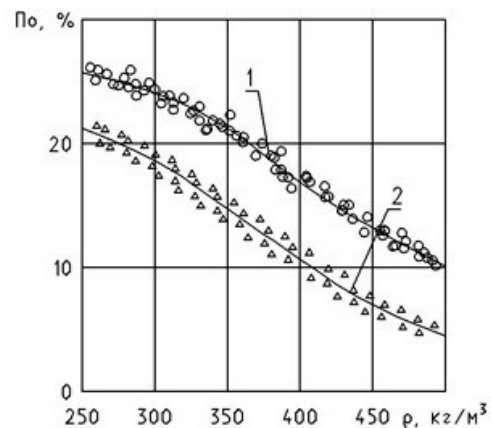


Рис. 6. Зміна відкритої пористості при зростанні щільності спечених скляних мікросфер складу: 1 – за № 1; 2 – за № 2

Щільність мікросфер у стані вільної засипки складає 190 кг/м³, а після вібраційного ущільнення з частотою 50 Гц підвищується до 200 кг/м³. В процесі рівномірного прогрівання мікросфери різного діаметру (20–100 мкм) починають своє перегрупування. Під дією в'язкого перебігу більш дрібні частинки проштовхуються серед крупних, про що свідчить інтенсивність термодформаційних процесів, як це наочно показано на рис. 3. На кінетичних кривих усадки $\Delta l/l_0 = f(\tau)$ умовний «нуль» збігається з початком усадочних процесів при температурі 480–500°C і відповідає початку розм'якшення скла, з якого виготовлено мікросфери (табл. 1). На цьому етапі щільність склокомпозиту не перевищує 230 кг/м³, а мікросфери з'єднані між собою за механізмом контактного плавлення при твердофазному спіканні.

Збільшення контактної перешийки між мікросферами (рис. 5) спостерігається в діапазоні температур 550–650°C і є характерним для обох видів мікросфер. Перегини на кінетичних кривих у цих точках свідчать про уповільнення інтенсивності процесу після кожного ступінчастого підйому температури. На цьому етапі щільність склокомполімерів складає 320–360 кг/м³, формування пористого каркасу відбувається вже за механізмом спікання у рідкій фазі, яка утворюється в процесі розм'якшення скла стінки мікросфери товщиною 1 мкм. Тому важливо зафіксувати за допомогою прикладання невеликого тиску сформовану геометрію контактної ділянки, яка саме й забезпечує міцність композиту; експериментально підібраний діапазон складатиме 0,2–1,2 МПа. Як показали дослідження, підвищення температури і тиску призводить до збільшення щільності зразків з одночасним зменшенням їх пористості

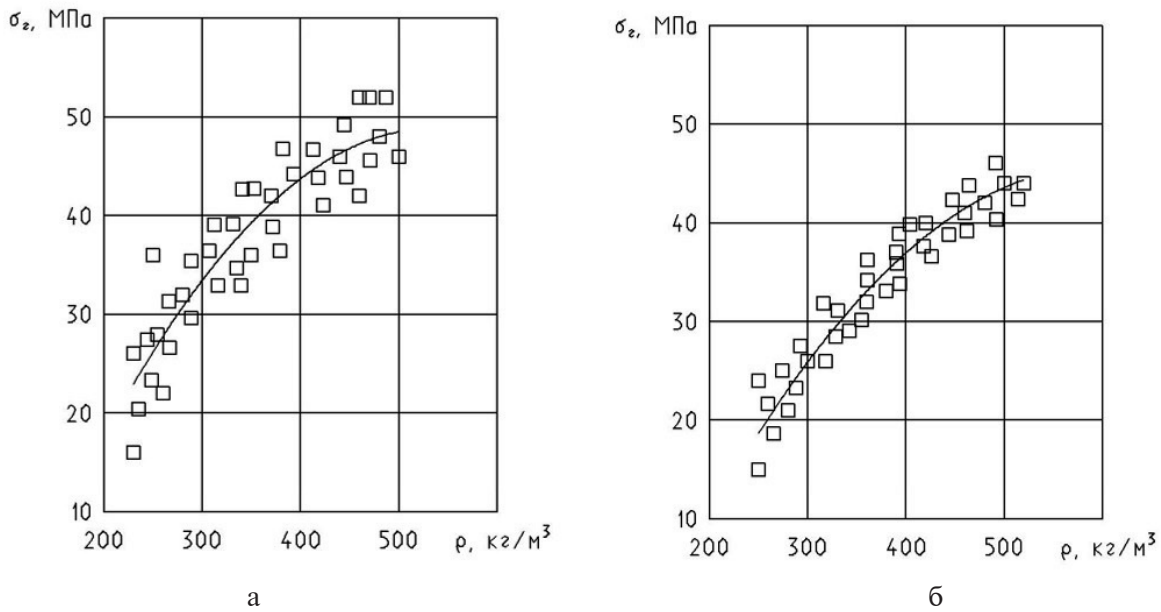


Рис. 7. Гідростатична міцність зразків різної щільності спечених скляних мікросфер складу: а – за № 1; б – за № 2

(рис. 6). Це позитивно впливає на міцність композиту в умовах статичних і динамічних навантажень, проте сприяє викривленню сферичної форми мікросфер, завдяки якій спечені склокомпозити мають здатність витримувати всебічний гідростатичний тиск до 45–50 МПа (рис. 7) з об'ємним водопоглинанням 15–7 % для щільності зразків 320–360 кг/м³.

Експериментальні дослідження показали стабільність теплофізичних властивостей шихти зі скляних мікросфер під час їх нагрівання від 25 до 600°C, а саме, коефіцієнти температуропровідності змінюються незначно: $(1,15-1,45) \cdot 10^{-7}$ м²/с. Одержані значення далі застосовано для розрахунків часу виходу на режим ізотермічної витримки (параметр X_2) і постановки числового експерименту.

Структура і реалізація комп'ютерної моделі

Декомпозиція задачі дослідником (рис. 8) дає змогу комплексно розглядати проблемні питання щодо розвитку технології спікання скляних мікросфер та удосконалення обладнання для одержання функціональних склокомпозитів.

Розробка і реалізація моделі спрямовані на подальший розвиток технології спікання скляних мікросфер та удосконалення обладнання за рахунок впровадження контролювано-вимірювальних заходів. В основу розробки моделі покладено системно-аналітичне дослідження з аналізом впливу термодформаційних факторів на випадковість виробничих і структурних дефектів склокомпозитів. Проведені експериментальні дослідження

розрахункової ділянки з реперними точками дозволяють виділити відповідні домени з коливанням у цих точках температур, на підставі чого поставлено числовий експеримент та оброблено його результати. Після верифікації даних розроблено програмний застосунок для оброблення результатів вимірювань.

Моделювання процесу розподілу температур реалізується за допомогою побудованих рівнянь регресії, які у алгебраїчній формі встановлюють вплив температурно-часових факторів спікання скляних мікросфер на функціональну спроможність склокомпозиту з мінімальною щільністю протистояти максимальним гідростатичним навантаженням.

Для випадку спікання скляних мікросфер за № 1 взаємний вплив температурно-часових факторів описується наступним чином:

$$y = 97,04 + 15,611x_1 - 10,69x_2 - 0,801x_3 - 6,176x_1x_2 - 2,771x_1x_3 - 0,829x_2x_3 - 14,97x_1^2 - 9,99x_2^2 - 1,18x_3^2, \quad (1)$$

а для спікання скляних мікросфер за № 2 відповідно:

$$y = 80,57 + 13,25x_1 - 8,584x_2 - 5,03x_1x_2 - 2,916x_1x_3 - 10,83x_1^2 - 7,813x_2^2 - 1,853x_3^2. \quad (2)$$

Модель дозволяє одночасно аналізувати кілька процесів: взаємний вплив температурно-

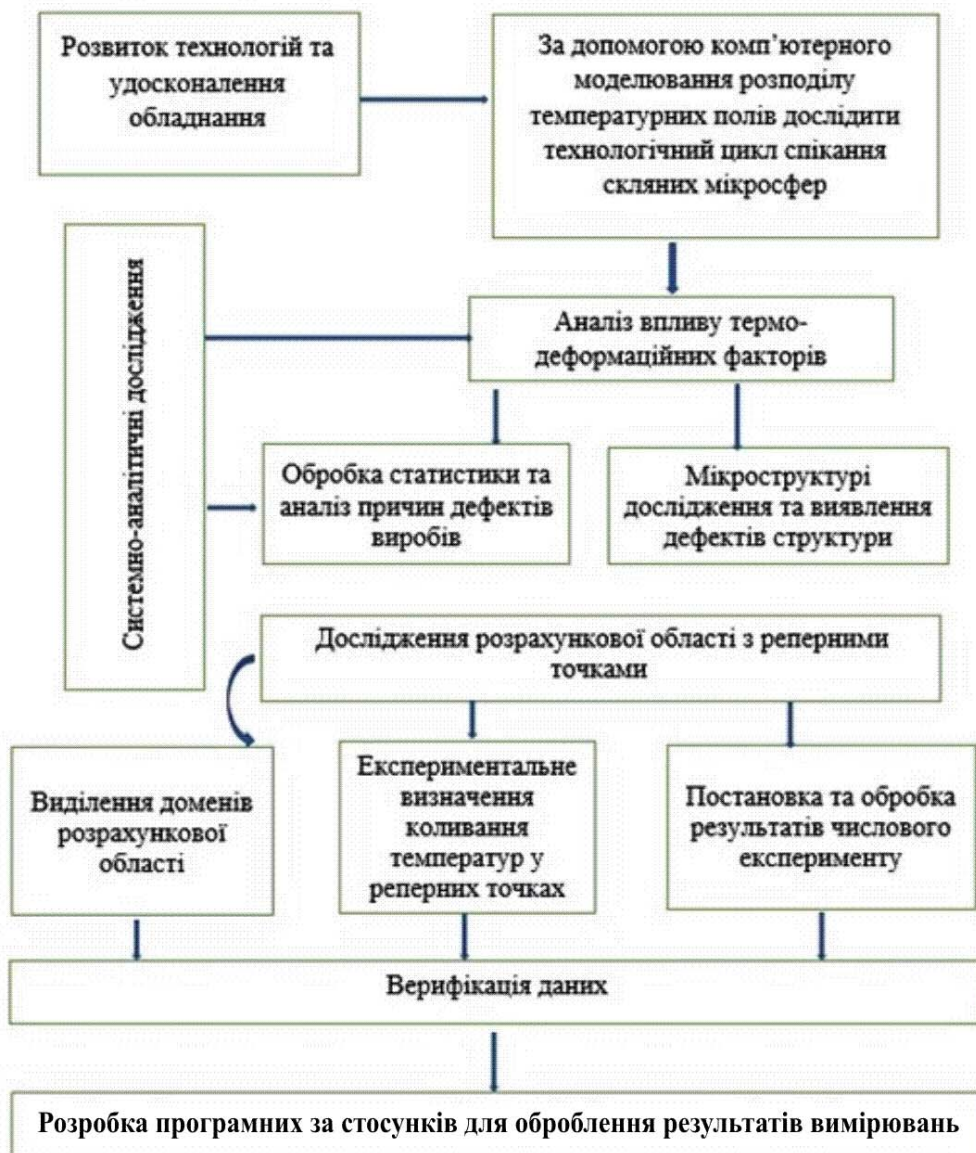


Рис. 8. Декомпозиція проблемної ситуації

часових факторів та динаміку формування під час спікання легковажних склокомполімерів щільністю 350–650 кг/м³ з міцністю на всебічне гідростатичне стискання від 35 до 45 МПа, що є цінним і достатнім для роботи у складі комбінованих підводних технічних засобів на шельфових глибинах до 250 м.

Отримані результати спрямовані на вирішення важливої науково-практичної проблеми розвитку технологій виготовлення склокомполімерів стратегічного призначення.

Висновки

Процес спікання скляних мікросфер розглянуто як складну систему з декомпозицією задачі

дослідником та формалізацією критеріїв, для чого у алгебраїчній формі встановлено ієрархічний зв'язок між температурою проміжного прогрівання, часом виходу на режим і температурою ізотермічного витримування; програмний застосунок написано мовою Python.

Експериментальні дослідження проведено на прикладі спікання (до температури 750⁰С) скляних мікросфер натрійборсилікатного складу з безпосередніми вимірюваннями температур в середині шихти, контролем їх форми і геометрії контактної ділянки. Методом регулярного теплового режиму за монотонним нагріванням (до температури 600⁰С) визначено коефіцієнти темпера-

туропровідності, значення яких складатимуть $(1,15-1,45) \cdot 10^{-7}$ м²/с, що застосовано для розрахунків часу виходу на ізотермічну витримку.

Встановлено, що при нагріванні зі швидкістю 20°C/хв до температури 500°C з'єднання скляних мікросфер між собою відбувається за механізмом контактного плавлення; при підвищенні температури до 550–650°C через розм'якшення скла стінки мікросфери ($\delta \approx 1$ мкм) утворюється рідка фаза. За допомогою прикладання на цьому етапі невеликого тиску (0,2–1,2 МПа) можливо інтенсифікувати процес спікання задля формування структури, яка саме й забезпечує здатність спечених склокомпозитів щільністю 350–650 кг/м³ витримувати навантаження всебічним тиском 35–50 МПа, що дозволяє використовувати їх на шельфових глибинах.

Перспективи подальших досліджень пов'язані із розробкою спеціалізованого комплексу програмного забезпечення для вивчення поліфункціональних склокомпозитів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Демченко В. Оцінка властивостей наповнювачів сумішей для мурування // Товари і ринки. – 2018. – № 2. – С.68-77.
2. Копійка С.В., Захарова І.О., Єгоров О.Г. Обґрунтування раціональної конструкції блоків плавучості підводних апаратів // 36. наук. пр. НУК. – 2017. – № 2(469). – С.28-32.
3. Kazymyrenko Yu., Solomoniuk N., Drozd O. Glass microspheres thermo-deformation sintering processes in the technologies of obtaining materials for underwater technical equipment // Pol. Marit. Res. – 2023. – Vol.30. – P.174-180.
4. Комп'ютерне проектування систем: програмні та алгоритмічні компоненти / Щербань В.Ю., Колиско О.З., Мельник Г.В., та ін. – Київ: Освіта України, 2019. – 902 с.
5. Кудряшова А.В. Ранжування факторів впливу на якість реалізації післядрукарських процесів // Вісн. ЧДТУ. – 2023. – № 2. – С.71-79.
6. Румянцев А.О., Гетьман І.А., Держевецька М.А. Використання систем комп'ютерної алгебри для розв'язування економічних задач // Ефективна економіка. – 2018. – № 2.
7. Мова програмування Python / Alyoshin S., Borodina E., Kikot A., Zaban I. // Системи управління, навігації та зв'язку. 2018. – Т.4. – № 50. – С.95-98.
8. Патент України № 99331, МПК В22F3/14. Установа для виготовлення порошкових виробів / Казимиренко Ю.О.; заявник і патенто власник: НУК ім. адм. Макарова. « № 201414197; заявл. 30.12.2014; опубл. 25.05.2015ю – Бюл. № 10.
9. Dyre J.C. Colloquium: the glass transition and elastic models of glass-forming liquids // Rev. Mod. Phys. – 2006. – Vol.78. – P.953-972.
10. Казимиренко Ю.О., Лебедева Н.Ю. Вплив високотемпературних технологій на структуру порожніх мікросфер // East Eur. Sci. J. Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2018. – No. 5(33). – Vol.1. – P.41-49.
11. Мізерний В.М. Моделювання процесу теплообміну в дисперсній системі: монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – 80 с.

Надійшла до редакції 01.03.2024

COMPUTER MODELING OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE COURSE OF SINTERING OF GLASS MICROSPHERES

Yu. O. Kazymyrenko *, O. V. Haidaienko
Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Mykolaiv, Ukraine

* e-mail: yuliia.kazymyrenko@nuos.edu.ua

Composite materials obtained by sintering glass microspheres are considered the promising ones for the underwater technology. The high indicators of the hydrostatic strength combined with the heat and sound insulation properties are due to the microspheres maintaining their shapes as close to the spherical as possible. The computer model of the temperature distribution is developed based on the physical and chemical conceptions of the glass composites structure formation by sintering the glass microspheres of sodium borosilicate composition and processing the experimental results of the temperature measurements. The modeling methodology is based on the principles of decomposition of the task by the researcher and ranking the temperature and time parameters. The ratio of the hydrostatic strength to the density of the samples is taken as a functional criterion and the software application is written in the Python language. The experimental setup that is used for sintering the glass microspheres enables to study the temperature fields and thermal deformation processes in real-time conditions. The coefficients of thermal conductivity of sintering are determined by the regular mode method. The results obtained are aimed at solving one of the most important scientific and practical issues of developing technologies for manufacturing glass composites for strategic purpose.

Keywords: sintering; structure formation; decomposition; real-time conditions; ranking; thermal conductivity; hydrostatic strength.

REFERENCES

1. Demchenko V. Otsinka vlastyvostei napovniuvachiv sumishei dlya muruvannya [Evaluation of the properties of fillers of masonry mixtures]. *Tovary i Rynky*. 2018; (2): 68-77. (in Ukrainian).
2. Kopyika SV, Zakharova IO, Yehorov OH. Obgruntuvannya ratsionalnoi konstruktsii blokov plavuchosti pidvodnykh aparativ [Justification of the rational design of the buoyancy blocks of underwater vehicles]. *Zbirnyk Naukovykh Prats' NUK*. 2017; 2(469): 28-32. (in Ukrainian).

3. Kazymyrenko Yu, Solomoniuk N, Drozd O. Glass microspheres thermo-deformation sintering processes in the technologies of obtaining materials for underwater technical equipment. *Pol Marit Res.* 2023; 30: 174-180. doi: 10.2478/pomr-2023-0050.
4. Shcherban VYu, Kolysko OZ, Melnyk HV. *Kompyuterne proektuvannya system: prohramni ta alhorytmichni komponenty* [Computer design of systems: software and algorithmic components]. Kyiv: Osvita Ukrainy; 2019. 902 p. (in Ukrainian).
5. Kudriashova AV. Ranzhuvannya faktoriv vplyvu na yakist realizatsii pislidrukarskykh protsesiv [Ranking of influencing factors on the quality of implementation of post-printing processes]. *Visn ChDTU.* 2023; (2): 71-79. (in Ukrainian).
6. Rumiantsev AO, Hetman IA, Derzhevetska MA. Vykorystannya system kompiuternoi alhebry dlya rozviazuvannya ekonomichnykh zadach [Use of computer algebra systems for solving economic problems]. *Efektivna Ekonomika.* 2018; (2). (in Ukrainian).
7. Alyoshin S, Borodina E, Kikot A, Zabran I. Mova prohramuvannya Python [Python programming language]. *Systemy Upravlinnia, Navihatsii ta Zviazku.* 2018; 4(50): 95-98. (in Ukrainian).
8. Kazymirenko YO, inventors; Admiral Makarov National University of Shipbuilding, assignee. *Installation for manufacturing of powdered products.* Ukraine patent 99331. 2015 May 25.
9. Dyre JC. Colloquium: the glass transition and elastic models of glass-forming liquids. *Rev Mod Phys.* 2006; 78: 953-972. doi: 10.1103/RevModPhys.78.953.
10. Kazymyrenko YuO, Lebedieva NYu. Vplyv vysokotemperaturnykh tekhnolohii na strukturu porozhnykh mikrosfer [The influence of high-temperature technology on the structure of hollow microspheres]. *East Eur Sci J.* 2018. 5(33): 41-49. (in Ukrainian).
11. Mizernyi VM. *Modeliuvannya protsesu teploobminu v dyspersnii systemi* [Modeling of the process of heat exchange in dispersed systems]. Vinnytsia: VNTU Publishers; 2019. 80 p. (in Ukrainian).