

УДК 261.462

В.Д. Рудь, Л.М. Самчук, Ю.С. Повстяна  
Луцький національний технічний університет

## МОДЕРНІЗАЦІЯ РЕАКТОРА ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ СВС-ПРОЦЕСУ ПОРИСТИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В.Д. Рудь, Л.М. Самчук, Ю.С. Повстяна. **Модернізація реактора для здійснення свс-процесу пористих порошкових матеріалів.** Модернізовано реактор для здійснення процесу СВС. Конструкція реактора дозволяє використовувати мікротермопарну та пірометричну методики при дослідженні пористих порошкових матеріалів. В результаті модернізації конструкції реактора для синтезу отримані достовірні експериментальні результати по спостереженню за хвилею горіння для пористих порошкових матеріалів. Висновки та отримані результати спонукають до подальшого наукового та практичного дослідження.

**Ключові слова:** реактор, СВС – процес, СВС – реакція, пористі порошкові матеріали.

**Форм. 11. Літ. 8.**

В.Д. Рудь, Л.М. Самчук, Ю.С. Повстяна. **Модернизация реактора для осуществления свс-процесса пористых порошковых материалов.** Модернизировано реактор для осуществления процесса СВС. Конструкция реактора позволяет использовать микротермопарную и пирометрическую методики исследования пористых порошковых материалов. В результате модернизации конструкции реактора для синтеза получены достоверные экспериментальные результаты по наблюдению за волной горения для пористых порошковых материалов. Выводы и полученные результаты побуждают к дальнейшему научного и практического исследования.

**Ключевые слова:** реактор, СВС - процесс, СВС - реакция, пористые порошковые материалы.

V. Rud', L. Samchuk, U. Povstyana. **Modernization of reactor for implementation svс- process porous powder materials.** Modernized reactor in the process of SHS. The design of the reactor can be used mikrotermoparnu and pyrometric methods in the study of porous powder materials. As a result, upgrading reactor design for the synthesis of reliable experimental results obtained by observation of the combustion wave for porous powder materials. Conclusions and findings stimulate further research and practical research.

**Keywords:** reactor, SHS – process, SHS - reaction, porous powder materials.

**Мета роботи.** Отримання порошкових пористих проникливих матеріалів в режимі СВС-горіння.

**Вступ.** Прискорений розвиток техніки потребує створення нових конструкційних, в тому числі пористих матеріалів, здатних працювати в умовах високих температур, механічних навантажень, агресивних середовищах. Пористі проникні матеріали привабливі тим, що мають хорошу відтворюваність таких властивостей як пористість, проникність, можливість формоутворення в процесі виготовлення, можливість введення каталізаторів в процесі приготування шихти, а також можливість багаторазової термічної регенерації. Завдяки наявності в пористих матеріалах взаємопов'язаних пор і, як наслідок, проникності їх для рідин і газів, вони знаходять широке застосування в багатьох галузях народного господарства: космічній техніці та сільському господарстві, машинобудуванні та медицині, радіоелектронній та хімічній промисловості, атомній енергетиці та приладобудуванні. Враховуючи якісні фізико-хімічні показники, виготовлення пористих проникних матеріалів є актуальним завданням для сучасного виробництва.

### **Постановка проблеми.**

Одним з важливих напрямків порошкової металургії є створення проникних порошкових матеріалів, працездатність та область застосування яких визначається наявністю взаємозв'язаної структури пор. Ця структура забезпечується всіма операціями технологічного процесу, але вирішальні етапи технології - це формування та спікання заготовок, які визначають не тільки розміри, форму, густину, продуктивність, безпеку і культуру праці, але й впливає на ряд найважливіших властивостей готового продукту [1].

Одним із головних напрямків розвитку виробництва є широке впровадження маловідходних і безвідходних технологій виготовлення заготовок. Такими заготовками є заготовки, що отримуються методами порошкової металургії та із композиційних матеріалів [2].

Підвищити ефективність методів порошкової металургії, враховуючи великий об'єм відходів машинобудівного комплексу України, можливо за рахунок процесів саморозповсюджувального синтезу.

### **Викладення основного матеріалу дослідження.**

Одним з найбільш перспективних методів отримання порошкових пористих матеріалів є технологія самопоширюючого високотемпературного синтезу (СВС). СВС забезпечує можливість отримання цілого ряду продуктів з унікальними комплексами експлуатаційних властивостей. При цьому СВС як метод отримання пористих матеріалів поєднує в собі малу енергоємність, безвідходність і можливість динамічного варіювання структурних та інших властивостей продуктів. Використання даної технології підвищує рівномірність поророзподілення порошкових композиційних матеріалів та збільшує локальну проникність, що пов'язано з процесами СВС-горіння, збільшенням середніх розмірів пор, більш рівномірним розподілом густини по об'єму і відсутністю поверхневого закриття пор. Ці передумови дозволяють використовувати економічну і просту технологію отримання пористих виробів [1].

На сьогоднішній день багато розроблено та вдосконалено установок для здійснення СВС - процесу. Основним елементом в технології СВС є реактор. Конструкції реакторів різноманітні і вони класифікуються [2]:

- за фазовим складом реагуючих речовин (гомогенні, гетерогенні, гетерогенно - каталітичні);
- за структурою потоків (ідеального перемішування, ідеального витіснення, з комбінованою структурою потоку);
- за конструктивними ознаками (трубчасті, ємнісні, полицні, комбіновані);
- за тепловим режимом (ізотермічні, адіабатичні);
- за отриманням продуктів реакції (періодичної дії та безперервної дії);
- за призначенням (лабораторні, пілотні, напівпромислові і промислові).

При всьому різноманітті реакторів, їх математичний опис представлено матеріальним і тепловим балансами і дозволяє вирішити два завдання:

- 1) за заданими конструкціями апарату та параметрами вхідного потоку визначити параметри процесу і характеристики вихідного потоку;
- 2) за заданими параметрами вхідного і вихідного потоку підібрати конструкцію апарату і параметри процесу.

Вирішення цих завдань дозволяє здійснити аналіз, синтез, оптимізацію технологічних процесів і можливо тільки при наявності:

- адекватної математичної моделі реактора;
- алгоритмів розв'язання прямих і обернених задач різного типу в їх комп'ютерній реалізації.

Аналіз хімічних реакторів, в яких протікають гомогенні реакції, складається з наступних етапів:

- попередній аналіз, пов'язаний з розрахунком фізико-хімічних властивостей, стехіометрії і термодинаміки;
- кінетичний аналіз реакції;
- гідродинамічний аналіз, пов'язаний з вибором структури потоку;
- складання детермінованої математичної моделі реактора;
- вибір алгоритму і рішення математичного опису реактора;
- збір інформації про параметри роботи реактора в різних умовах;
- визначення параметрів моделі реактора.

В Луцького національного технічного університету розроблений реактор для здійснення процесу СВС. Однак інтенсивна його експлуатація виявила ряд недоліків:

1. Ніхромові спіралі для ініціювання процесу запалення розташовані на боковій поверхні зразка. Це приводить до того, що хвиля горіння розповсюджується одночасно по висоті зразка та у поперечному перерізі. Спостереження за швидкістю горіння за допомогою термопар не дало якісного результату.

2. В конструкції реактора була недосконалою система відеоспостереження за процесом синтезу і тому співставлення теоретичних розрахунків з експериментальними результатами здійснювалося тільки на якісному рівні.

3. В конструкції реактора було передбачено тільки один штуцер для підводу захисного середовища. Це збільшувало час на проведення синтезу з різними захисними середовищами. Крім того, така система підводу різного роду газів не дозволяла якісно проводити відновлення окислених зразків перед початком синтезу.

Вивчення фронту СВС горіння порошкових матеріалів на основі мікротермопарної методики є недостатнім, оскільки за цим методом можна виміряти тільки температуру хвилі горіння. Як відомо, процес СВС горіння умовно можна поділити на чотири області: зона попереднього прогрівання, спалахуюча зона, високотемпературна зона протікання екзотермічної реакції і зона догорання. В останній зоні в більшій степені відбуваються дифузійні процеси, що супроводжуються процесами фазових і структурних перетворень [3]. Тому при дослідженні пористих матеріалів виникає завдання експериментального виявлення теплових мікронеоднорідностей структури і динаміки їх розвитку.

З урахуванням цих недоліків конструкцію реактора було модернізовано. Креслення вже модернізованого реактора представлено на рис. 1. Реактор розрахований на спікання зразків діаметром 40 мм та максимальною висотою 220 мм.

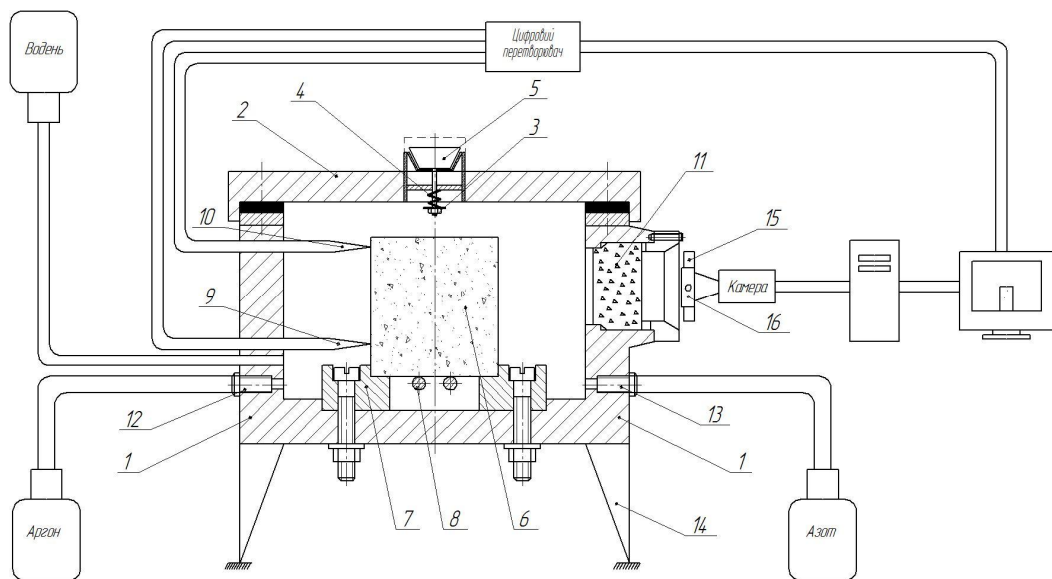


Рисунок 1 – Реактор для здійснення СВС-процесу

1 – корпус; 2 – роз'ємна кришка; 3 – регулювальна гайка; 4 – спіраль; 5 – запобіжний клапан; 6 – зразок; 7 – підковоподібна підложка; 8 – ніхромові спіраль; 9, 10 – термопар; 11 – вікно спостереження; 12, 13 – штуцер; 14 – стійка; 15 – світлофільтр; 16 – тримач.

Технічно реактор виконаний у вигляді термоізолюваної ємності, із роз'ємною кришкою 2, яка дозволяє ставити дослідні зразки на підковоподібну підложку 7 всередині реактора. В кришку вмонтований клапан 5, який складається з корпуса, пружини і регулювальної гайки 6. Клапан служить запобіжником у випадку вибухонебезпечної ситуації. Корпус реактора 1 виготовлений з нержавіючої сталі марки 95X18 і розміщений на стійки 14. Досліджуваний зразок 6, який знаходиться на підложці, нагрівається за допомогою ніхромової спіралі 8 марки Х20Н80, з діаметром ніхрому 0,8 мм, діаметром стрижня 3 мм та довжиною спіралі 68 см, яка під'єднана до блоку живлення. Фронт горіння розповсюджується по зразку до протилежного боку від ніхромової спіралі. Температура нагрівання зразка контролюється за допомогою вольфрам-ренієвих термопар 9, 10 марки ВР-5 та ВР-20, підключених до комп'ютера через аналого-цифровий перетворювач моделі В7-35. В термоізолювану ємність приєднано балон з воднем, який забезпечує захист поверхні зразка від процесу окислення. Через штуцери 12 і 13 приєднано балони із аргонем та азотом. З одної із бокових сторін розміщено вікно спостереження із кварцового скла 11 товщиною 6 мм. Спостереження за процесом горіння здійснюється за допомогою відеокамери моделі Nikon D5100. Оскільки процес СВС-горіння супроводжується яскравим світінням, для отримання якісного зображення використовується світлофільтр 15 серії ND<sub>4</sub>, діаметром 62 мм та

товщиною 1 мм. Вибір світлофільтра регламентується моделлю об'єктива Nikon 1855 та його параметрами, зокрема діаметром 62 мм. Фільтр такого типу призначений для зменшення кількості світла, що потрапляє при зйомці на матрицю камери, а також для коригування кольору, яскравості та контрастності. Світлофільтр кріпиться до об'єктива камери різьбовим з'єднанням за допомогою спеціального тримача 16. Камера під'єднана до комп'ютера, за допомогою якого на основі комп'ютерних програм будуються різні графічні залежності: поширення хвилі горіння у дослідному зразку, зміна температури від часу.

Розробка засобів реєстрації та контролю явищ теплових мікронеоднорідностей важлива для розвитку СВС-технології на новому технологічному рівні – програмно-керованому синтезі матеріалів в процесі поширення фронту хвилі горіння. Це завдання можна визначити за допомогою пірометричної методики. В основі даної методики лежить використання пристрою для пірометрії, побудованому на базі кольорової цифрової відеокамери та персонального комп'ютера. Метод пірометрії дозволяє візуалізувати процес горіння. Оригінальні пірометричні методики для вивчення теплової структури хвилі СВС, засновані на обробці даних відеозапису процесу, методом колірної пірометрії шляхом співставлення суцільних спектрів випромінювання конденсованих продуктів реакції і еталонної світловимірювальної лампи [4]. В даний час для вивчення динаміки горіння успішно застосовуються цифрові високошвидкісні відеокамери, а комп'ютерна обробка та відеозйомка методами колірної пірометрії дозволяє вивчати теплову мікроструктуру фронту горіння, а також отримувати локальний розподіл температури в полі відеокадру.

Для перевірки економічності вдосконаленого реактора запишемо тепловий баланс для періоду нагрівання дослідного зразка (2) використовуючи загальний вираз теплового балансу (1):

$$\sum Q_{1i} = \sum Q_{2j}, \quad (1)$$

$$\sum Q_{11} = \sum Q_{21} + \sum Q_{22} \quad (2)$$

та періоду проходження СВС процесу

$$\sum Q_{11} + \sum Q_{12} = \sum Q_{21} + \sum Q_{22}, \quad (3)$$

де  $\sum Q_{12}$  – теплота внутрішніх джерел, яка виділяється в результаті проходження хімічної реакції, коли відбувається процес спікання в зразку

$$\sum Q_{12} = V \cdot q_V, \quad (4)$$

де  $V$  - об'єм дослідного зразка, м<sup>3</sup>;  $q_V$  - об'ємний питомий тепловий потік від внутрішніх джерел теплоти в дослідному зразку, Дж/м<sup>3</sup>.

Як зазначено вище у виразі (1), у першому наближенні,  $\sum Q_{21}$  - це теплота, яка витрачається на нагрів дослідного зразка та всіх інших елементів установки, як загального умовного тіла. Тому в подальшому викладенні для підвищення достовірності моделі у виразах (2) та (3) цей член потребує деталізації:

$$\sum Q_{21} = Q_{зр.} + Q_{шт.} + Q_{підл.} + Q_{корп.} + Q_{терм.} + Q_{серед.}, \quad (5)$$

де  $Q_{зр.}$  – теплота, яка витрачається на нагрів зразку, Дж;  $Q_{шт.}$  – теплота, яка витрачається на нагрів штативу, Дж;  $Q_{підл.}$  – теплота, яка витрачається на нагрів підковоподібної підложки, Дж;  $Q_{корп.}$  - теплота, яка витрачається на нагрів корпусу установки, Дж;  $Q_{терм.}$  - теплота, яка витрачається на нагрів корпусу термопари, Дж;  $Q_{серед.}$  – теплота, яка витрачається на нагрів середовища (повітря) в корпусі установки, Дж.

Для визначення витрат теплоти по складових теплового балансу використовуємо вираз:

$$Q = Mc(t_1 - t_2) = \frac{V}{\rho} c(t_1 - t_2). \quad (6)$$

де  $t_1$  та  $t_2$  - відповідно температура більш нагрітого об'єкту, який втрачає теплоту, та менш нагрітого об'єкту, який приймає теплоту,  $c$  – питома масова теплоємність матеріалу елемента установки або зразку, Дж/кг·К;  $V$  - об'єм дослідного зразка, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – густина матеріалу елемента установки або зразку, кг/м<sup>3</sup>.

Другий член  $\sum Q_{22}$  враховує втрати тепла в навколишнє середовище і запишеться в наступному вигляді:

$$\sum Q_{22} = Q_{\text{б.н.}} + Q_{\text{вн.}} + Q_{\text{вип.}}, \quad (7)$$

де  $Q_{\text{б.н.}}$  – втрати теплота в навколишнє середовище через бокові поверхні установки, Дж;  $Q_{\text{вн.}}$  – втрати теплота в навколишнє середовище через верхню та нижню поверхні установки, Дж;  $Q_{\text{вип.}}$  – втрати теплота в навколишнє середовище через випромінювання від зовнішніх поверхонь установки, Дж. Визначення втрат теплоти (6) через плоску частину стінки установки:

$$Q = Fk(t_1 - t_2), \quad (8)$$

та при теплопередачі через циліндричну частину стінки установки :

$$Q = \pi Lk_l(t_1 - t_2), \quad (9)$$

де  $t_1$  та  $t_2$  - відповідно температура більш нагрітого об'єкту, який втрачає теплоту, та менш нагрітого об'єкту, який приймає теплоту, °C;  $F$  – площа поверхні через яку відбувається теплопередача, м<sup>2</sup>;  $L$  - довжина циліндричної поверхні через яку відбувається теплопередача, м;  $k$  – коефіцієнт теплопередачі, який визначає потік теплоти через одиницю площі багат шарової поверхні, через яку відбувається теплопередача, Вт/м<sup>2</sup>К;  $k_l$  – коефіцієнт теплопередачі, який визначає потік теплоти через одиницю довжини багат шарової циліндричної поверхні стінки через яку відбувається теплопередача, Вт/мК.

Коефіцієнти теплопередачі визначаються з виразів [5]:

$$\frac{1}{k} = R_s = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{\alpha_j} + \sum_{u=1}^p \frac{\delta_u}{\lambda_u} \quad (10)$$

та

$$\frac{1}{k_l} = R_l = \sum_{i=1}^n R_{li} = \sum_{j=1}^m \frac{1}{\alpha_j d_j} + \sum_{u=1}^p \frac{1}{2\lambda_u} \ln \frac{d_{u+1}}{d_u} \quad (11)$$

де  $R_s$  та  $R_l$  - відповідні сумарні термічні опори, м<sup>2</sup>К/Вт;  $R_i$  та  $R_{li}$  - відповідні термічний опір  $i$  – го шару чи термічної перешкоди із  $n$ , м<sup>2</sup>К/Вт;  $\alpha_j$  – коефіцієнт тепловіддачі на  $j$ -тій термічній перешкоді із  $m$ , які виникають на шляху теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>К;  $d_j$  - діаметр поверхні  $j$ -тої термічної перешкоди матеріалу, м;  $\lambda_u$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу  $i$ -того шару термічного перешкоди, Вт/м•К;  $\delta_u$  – товщина  $i$ -того шару термічної перешкоди, м;  $d_u$  та  $d_{u+1}$  – відповідно внутрішній та зовнішній діаметри поверхонь  $i$ -того шару термічної перешкоди, м.

Коефіцієнт тепловіддачі визначається із залежності [5]:

$$\alpha = \frac{\lambda Nu}{l}, \quad (12)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/мК;  $l$  – характерний розмір, м;  $Nu$  – число Нусельта.

Для визначання числа Нусельта в таких умовах використовуємо розрахункову формулу [5], яка запропонована М. А. Михеевим:

$$Nu = c (Gr Pr)^n, \quad (13)$$

$Pr$  – число Прандля:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (14)$$

та  $Gr$  – число Грасгофа:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T l^3}{\nu^2}, \quad (15)$$

де  $g$  – прискорення земного тяжіння, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  - коефіцієнт об'ємного розширення, 1/К;  $\nu$  – кінематична в'язкість, м<sup>2</sup>/с. Втрати теплоти в навколишнє середовище через випромінювання від зовнішніх поверхонь установки [6, 7]:

$$Q = \sigma_o \varepsilon_{np} F \left( \left( \frac{t_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_2}{100} \right)^4 \right) \quad (16)$$

де  $t_1$  та  $t_2$  - відповідно температура більш нагрітого об'єкту, який втрачає теплоту, та менш нагрітого об'єкту, який приймає теплоту, °K;  $F$  – площа поверхні з якої відбуваються втрати теплоти, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_{np}$  – приведений коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням відповідно для кожного конкретного випадку;  $\sigma_o$  – постійна Стефана-Больмана [8],  $\sigma_o = 5,6710^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>•К<sup>4</sup>).

Визначаємо складові витрат теплоти для нашої дослідної установки з виразів (2) та (3) при цьому будемо вважати, що тепловий баланс складається для умов стабілізації теплообміну між дослідною установкою та навколишнім середовищем, а у виразах (6) та (7-8) різницю температур представляємо у вигляді:

$$\theta'_{\text{стаб.}} = t_{\text{ст.зр.}} - t_{\text{нс.}} = t_1 - t_2, \quad (17)$$

де  $t_{\text{ст.зр.}}$  - температура стінки дослідного зразку при умові стабілізації.

Тоді з виразу (16) визначаємо теплоту на нагрів дослідного зразка:

$$Q_{\text{зр.}} = Mc(t_1 - t_2) = \frac{V_{\text{зр.}}}{\rho} \cdot (t_1 - t_2) = m_{\text{зр.}} \cdot c_{\text{зр.}} \cdot \theta'_{\text{стаб.}} \quad (18)$$

**Висновок.** В результаті модернізації конструкції реактора для СВС отримані достовірні експериментальні результати по спостереженню за хвилию горіння для пористих порошкових матеріалів.

Для точнішого дослідження фронту СВС горіння вдосконалений реактор дозволяє використовувати міктермопарну та пірометричну методики. Конструкція реактора дозволяє фіксувати процес поширення хвилі горіння за допомогою відеозйомки та вимірювати температуру горіння за допомогою термопар. На онові відеоспостереження за допомогою комп'ютерних програм можна візуалізувати процес горіння та визначити теплові мікронеоднорідності структури порошкових зразків та будувати графічні залежності.

#### Список використаних джерел.

1. Кирдяшкин А.И., Саламагов В. Г., Габбасов Р.М., Максимов Ю.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Особенности оптического излучения реакционных систем в процессе СВС // Горение и плазмохимия: Материалы IV Международного симпозиума. – Алматы Казахстан, 2007. – С. 56 – 58.
2. Найбороденко Ю.С. Закономерности и механизм реакционного спекания и безгазового горения смесей металлических порошков. Дисс. канд. физ-мат. наук. Томск 2004. 207с.
3. Зенин А.А. О теплообмене микротермопар в условиях горения конденсированных веществ. ПМТФ, 2003, №5, с.125-131.
4. Гарколь, Д. Новая методика высокоскоростной яркостной пирометрии для исследования процессов СВС. / Д. А. Гарколь, П. Ю. Гуляев, В.В. Евстигнеев, А. Б. Мухачев // ФГВ. – 2004 – № 1(30). – С. 72-77.
5. Тихонов А. Н., Самарский Л.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977, - 736 с.
6. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of heat in solids. Oxford University Press, 1980.
7. Исаченко В.П. Осипова В.А. Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
8. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена, – Новосибирск: Наука. – 1989. – 416 с.