

УДК 621.772.43

**В. Д. Рудь<sup>1</sup>**  
**Л. М. Самчук<sup>1</sup>**  
**Н. М. Гулієва<sup>1</sup>**

## **ЗАСТОСУВАННЯ ПІРОМЕТРИЧНОЇ МЕТОДИКИ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ФРОНТУ СВС-ГОРІННЯ**

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет

*Розглянуто пірометричну методику дослідження процесів виготовлення пористих проникливих картриджів з використанням самопоширюваного високотемпературного синтезу. Запропонована методика дозволяє на основі обробки даних відеозапису забезпечити візуалізацію фронту горіння і визначення його теплової структури.*

**Ключові слова:** високотемпературний синтез, реактор, візуалізація, фронт горіння, пірометрія, пористи заготовки.

### **Вступ**

Існуючі моделі макрокінетики синтезу базуються на уявленнях про розподіл температури в об'ємі порошкової заготовки в режимі СВС-спікання. При цьому ігнорується існування мікронеоднорідностей в шихті, пов'язаних з природою подрібнення тугоплавкого компонента, що може призвести до неправильних уявлень про розвиток процесу синтезу, отже, виникає завдання експериментального виявлення теплових мікронеоднорідностей і динаміки їх розвитку. На сьогоднішній день найбільш ефективним методом у цьому напрямку є швидкісна відеозйомка, яка вирішує поставлене завдання. Одним з ефективних способів отримання та обробки порошкових заготовок з необхідними функціональними властивостями є самопоширюваний високотемпературний синтез (СВС-процес), який застосовується в гетерогенних, екзотермічних реагуючих порошкових сумішах. Для СВС-процесу традиційно розглядаються 4 області: зона попереднього прогріву, зона спалахування, високотемпературна зона екзотермічної реакції, зона догорання. В зоні догорання в основному відбуваються дифузійні процеси, що супроводжуються процесами фазових і структурних перетворень. Розробка засобів реєстрації та контролю таких явищ важлива для розвитку СВС-технології на новому технологічному рівні, яка полягає в програмно керованому синтезі матеріалів у візуалізації фронту хвилі горіння.

В роботі [1] описано пристрій для пірометрії, побудований на базі побутової кольорової цифрової відеокамери та персонального комп'ютера. Описана методика дослідження термодинамічних процесів. Інтервал вимірюваних температур 800...2500 °С. Авторами [2] розглянуто оптичні методи неруйнівного контролю — метод лазерного підсвічування і системи з підсилювачем яскравості, засновані на використанні лазерів на парах броміду міді. Ці методи дозволяють візуалізувати процеси і об'єкти. Подані результати візуалізації процесу горіння порошкових систем з температурою горіння від 1500 до 2000 К. Розроблені [3] оригінальні пірометричні методики для вивчення теплової структури хвилі горіння в режимі СВС-процесу, засновані на обробці даних відеозапису; методом колірної пірометрії шляхом зіставлення суцільних спектрів випромінювання конденсованих продуктів реакції; методом еталонної світловимірювальної лампи.

Найпоширенішим способом прямого спостереження за реагуючим середовищем є мікротермопарна методика. Розробка сучасних мікротермопарних методів визначення структури хвилі горіння була проведена А. А. Зеніним [4]. Застосування термопар для вивчення СВС-процесу обґрунтовано в роботах [5].

Незважаючи на загальноприйняті уявлення про недоліки мікротермопарної методики, пов'язані з інерційністю і можливістю спотворення температурного профілю, вказаний метод відрізняється простотою і високою надійністю. Його застосування може бути виправдане у випадку, якщо шви-

дкість зміни температури значно менша швидкості теплової релаксації термопар.

Застосування досконаліших безконтактних способів визначення температури, спектрально-оптичних [6], рентгеноструктурних [7], пірометричних [8] мають свої недоліки, пов'язані з інтерпретацією отриманих даних за температурним профілем хвиль горіння. Основною проблемою, пірометричної методики, є достовірність калібрувальних характеристик для порошкових тіл.

Під час використання термопарної методики виникають дві основні проблеми: 1 — можливість відводу тепла від робочого спаю термопар уздовж термоелектропроводів і, як наслідок, виникнення похибки вимірювання температури; 2 — наявність теплової інерційності термоелектродів при вивченні динаміки розігрівання досліджуваного середовища.

У наших дослідженнях розглядалася взаємодія на сумішах порошків титану марки ПТС-1 (ГОСТ 17746-99) фракції (0,1...+0,063), алюмінію марки АПВ-90 (ТУ 48-5-152-98) фракції (0,1...+0,063) та порошку сапоніту фракції (0,1...+0,063). Сьогодні для вивчення динаміки горіння успішно застосовуються цифрові високошвидкісні відеокамери, а комп'ютерна обробка та відеозйомка методами колірної пірометрії дозволяє вивчати теплову мікроструктуру поширення хвилі фронту горіння, а також отримувати локальний розподіл температури в полі відеокадру [1].

*Метою роботи* є вивчення можливості застосування цифрової високошвидкісної відеокамери для візуалізації поширення фронту горіння СВС-процесу під час виготовлення порошкових фільтрувальних картриджів.

### Результати дослідження

У Луцькому національному технічному університеті розроблено реактор для здійснення процесу СВС [9]. Інтенсивна його експлуатація виявила низку недоліків:

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

2. В конструкції реактора була недосконала система відеоспостереження за процесом синтезу і тому зіставлення теоретичних розрахунків з експериментальними результатами спостереження здійснювалося тільки не 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.

З урахуванням цих недоліків конструкцію реактора вдосконалено. Креслення модернізованого реактора подано на рис. 1. Реактор розрахований на спікання зразків діаметром 40 мм та максимальною висотою 220 мм.

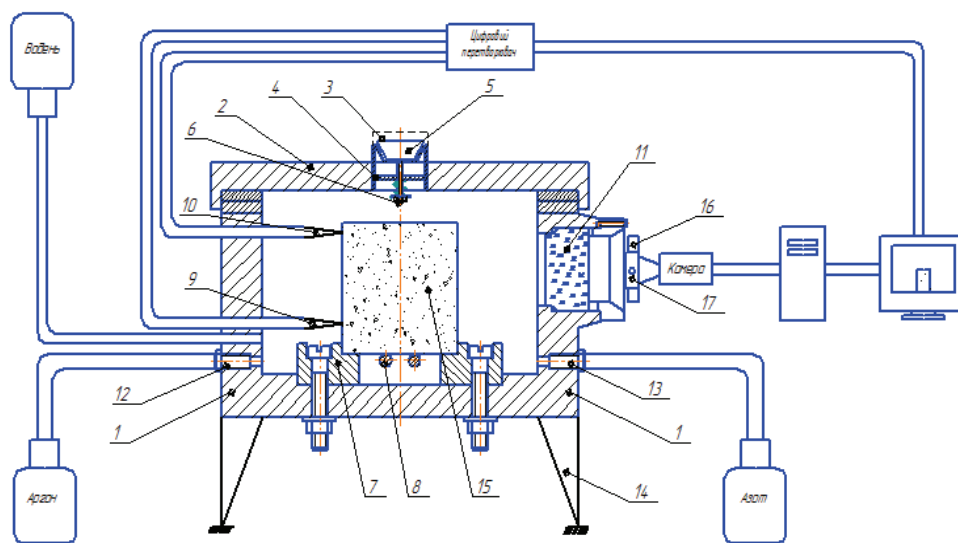


Рис. 1. Реактор для здійснення СВС-процесу: 1 — корпус; 2 — роз'ємна кришка; 3, 4 — прокладка; 5 — запобіжний клапан; 6 — регульовальна гайка; 7 — підковоподібна підкладка; 8 — ніхромові спіралі; 9, 10 — термопар; 11 — вікно спостереження; 12, 13 — штуцер; 14 — стійка; 15 — зразок; 16 — світлофільтр; 17 — тримач

Технічно реактор виконаний у вигляді термоізолюваної ємності, із роз'ємною кришкою 2, яка дозволяє ставити дослідні зразки на підковоподібну підкладку 7 всередині реактора. В кришку вмонтований клапан 5, який складається з корпусу, пружини і регулювальної гайки 6. Клапан служить запобіжником у випадку вибухонебезпечної ситуації. Корпус реактора 1 виготовлений з нержавіючої сталі марки 95X18 і розміщений на стійках 14. Досліджуваний зразок 15, який знаходиться на підковоподібній підкладці, що нагрівається за допомогою ніхромової спіралі 8 марки Х20Н80, з діаметром дроту 0,8 мм та під'єднана до блока живлення. Горіння ініціюється теплом від цієї спіралі і розповсюджується від нижньої частини зразка вгору. Температура нагрівання зразка контролюється за допомогою вольфрамрениових термопар 9, 10 марки ВР-5 та ВР-20, підключених до комп'ютера через аналого-цифровий перетворювач моделі В7-35. До термоізолюваної ємності приєднано балон з воднем для забезпечення захисту поверхні зразка від окислення. Через штуцери 12 і 13 також приєднано балони із аргоном та азотом. З однієї з бокових сторін встановлено вікно спостереження з кварцовим склом 11 товщиною 6 мм. Фотофіксація процесу горіння здійснюється за допомогою відеокамери моделі Nikon D5100. Оскільки процес СВС-горіння супроводжується яскравим світінням, для отримання якісного зображення використовується світлофільтр 16 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 під час зйомки на матрицю камери, а також для коригування кольору, яскравості та контрастності. Світлофільтр кріпиться до об'єктива камери різьбовим з'єднанням за допомогою спеціального тримача 17. Камера під'єднана до комп'ютера, за допомогою якого з використанням програмного забезпечення будуються графічні залежності: поширення хвилі горіння у дослідному зразку, зміна температури в часі.

Отримана за допомогою відеокамери послідовність фотографій процесу взаємодії пресованої стехіометричної суміші із пірофорних порошоків титану і сапоніту з тиском аргону 3МПа показана на рис. 2. За початкову було взято стадію нагрівання зразка ніхромовою спіраллю до температури  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  (кадр № 1). На наступному кадрі (кадр № 2) зафіксовано момент запалювання нижнього шару зразка, що супроводжується яскравим світінням. Після стадії ініціювання відбувається стадія протікання екзотермічної реакції (кадри № 3—8) порошку титану з сапонітом. Загальний час спікання пресованої стехіометричної суміші із порошоків титану і сапоніту становить 80 с.

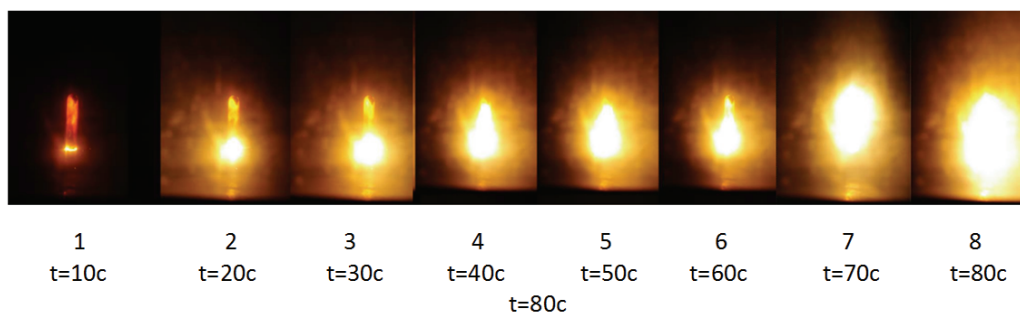


Рис. 2. Фотографія процесу горіння стехіометричної порошкової суміші титану з сапонітом

Послідовність фотографій процесу взаємодії пресованої стехіометричної суміші із порошоків алюмінію та сапоніту з тиском аргону від 0,5 до 4 МПа показано на рис. 3.

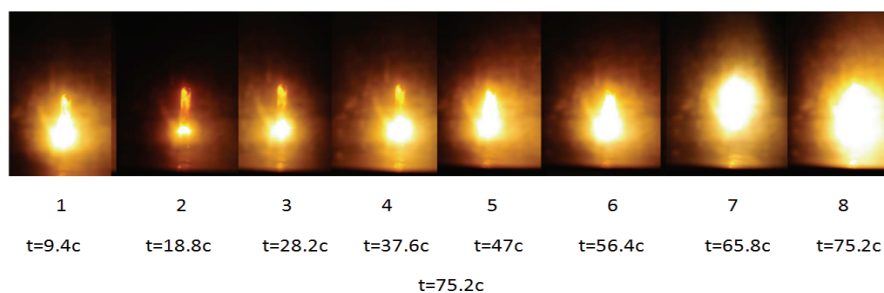


Рис. 3. Фотографія процесу горіння стехіометричної порошкової суміші алюмінію з сапонітом

Початковою є стадія нагрівання зразка за допомогою ніхромової спіралі до температури  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на якій зразок різко спалахує (кадр № 1). На наступній стадії яскраве світіння дещо

гасне (кадр № 2). На подальших кадрах зафіксовано горіння зразка, що супроводжується більш яскравим світінням (кадри № 3—8). Загальний час спікання в режимі СВС-процесу пресованої стехіометричної суміші із порошків алюмінію і сапоніту становить 75,2 с.

Результати вимірювання температури для зразків із суміші порошків титану і сапоніту та алюмінію і сапоніту показані на рис. 4.

Швидкість горіння розраховується як відношення висоти зразка до часу повного реагування, починаючи з моменту запалювання і закінчуючи моментом затухання видимого фронту горіння.

Вимірювання швидкості поширення хвилі горіння проводились на основі відеозапису процесу синтезу. Залежності зміни швидкості горіння зразків із стехіометричних сумішей порошків титан — сапоніт та алюміній — сапоніт в інтервалі тиску аргону 0,5—4 МПа показані на рис. 5.

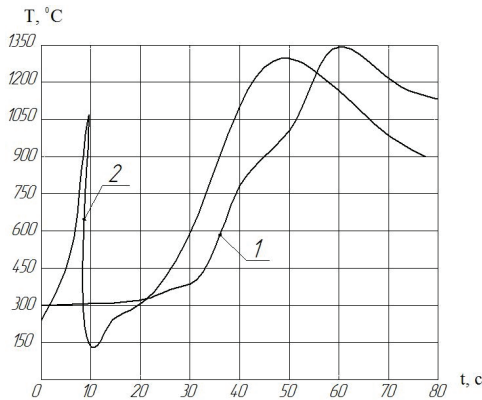


Рис. 4. Поширення хвилі горіння для систем: 1 — титан-сапоніт; 2 — алюміній-сапоніт

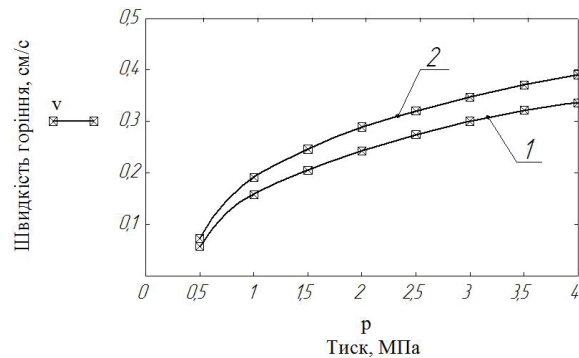


Рис. 5. Залежність швидкості горіння від тиску газів у реакторі стехіометричної суміші порошків: 1 — титану і сапоніту; 2 — алюмінію і сапоніту

З даних графічних залежностей видно, що збільшення тиску приводить до зростання швидкості горіння зразка.

### Висновок

Застосування пірометричної методики та модернізованої конструкції реактора для синтезу дозволило отримати достовірні експериментальні результати по спостереженню за хвилиною горіння різних екзотермічних порошкових сумішей.

Розбіжність експериментальних даних з теоретичними розрахунками для суміші титану із сапонітом становить 10...15 %, для суміші алюмінію із сапонітом — 15...20 %. Це зумовлено, на наш погляд, вищою окисленістю порошку алюмінію.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Новая методика высокоскоростной яркостной пирометрии для исследования процессов СВС. / Д. А. Гарколь, П. Ю. Гуляев, В. В. Евстигнеев, А. Б. Мухачев // ФГВ. — 1994. — № 1 (30). — С. 72—77.
2. Цыба Г. А. Видеопирометр / Г. А. Цыба, В. Г. Саламатов, В. Л. Поляков // Приборы и техника эксперимента. — 2003. — № 4. — С. 54—57.
3. Особенности оптического излучения реакционных систем в процессе СВС / [А. И. Кирдяшкин, В. Г. Саламатов, Р. М. Габбасов и др.] // Горение и плазмохимия : матер. IV Международного симпозиума. — Алматы, Казахстан. — 2007. — С. 56—58.
4. Зенин А. А. О теплообмене микротермопар в условиях горения конденсированных веществ // ПМТФ. — 1963. — № 5. — С. 125—131.
5. Найбороденко Ю. С. Закономерности и механизм реакционного спекания и безгазового горения смесей металлических порошков : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.01 / Найбороденко Юрий Семенович. — Томск, 1974. — 207 с. — Библиогр. : С. 171—200.
6. Перспективы использования синхротронного излучения для исследования динамики фазовых превращений при горении конденсированных систем / [М. А. Корчагин, С. Н. Гусенко, Б. П. Голочко и др.] // матер. VI Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Алма-Ата, 23—26 сентября 1980 г. — С. 93—96.
7. Исследование взаимодействия системы никель-алюминий в процессе СВС на основе методики высокотемпературной яркостной пирометрии / Б. М. Вольпе, Д. А. Гарколь, В. В. Евстигнеев, А. Б. Мухачев // ФГВ. — 1994. — Т. 30, № 3. — С. 62—69.
8. Азатян Т. Е. Спектрально-оптические исследования самораспространяющейся волны синтеза тугоплавких соединений на основе титана : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.14 / Азатян Тартаря Евратиевич. — Москва, 1977. — 146 с. — Библиогр. : с. 171—200.

9. Рудь В. Д. Вплив технології синтезу на структуру та властивості спеченого композиту системи Ti-Fe-C / В. Д. Рудь, Л. М. Самчук // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. — № 64. — С. 239—244.

Рекомендована кафедрою технології підвищення зносостійкості ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.07.2014

**Рудь Віктор Дмитрович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерного проектування верстатів та технологій машинобудування, e-mail: vikdmrud@ukr.net;

**Самчук Людмила Михайлівна** — канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерного проектування верстатів та технологій машинобудування;

**Гулієва Наталія Михайлівна** — асистент кафедри комп'ютерного проектування верстатів та технологій машинобудування.

Луцький національний технічний університет, Луцьк

**V. D. Rud<sup>1</sup>**  
**L. M. Samchuk<sup>1</sup>**  
**N. M. Guliieva<sup>1</sup>**

## Application of pyrometric technique for imaging of front SHS burning

<sup>1</sup>Lutsk National Technical University

*The pyrometric technique to study the processes of manufacturing of porous sintered cartridges using self-propagating high-temperature synthesis is considered in the paper. The proposed technique allows providing visualization of the combustion front and the determination of its thermal structure considering video-based data processing.*

**Keywords:** high-temperature synthesis reactor, visualization, the combustion front, pyrometry, porous preform.

**Rud Victor D.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Computer Design of Machine-Tools and Engineering Technologies, e-mail: vikdmrud@ukr.net;

**Samchuk Liudmyla M.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Computer Design of Machine-Tools and Engineering Technologies;

**Guliieva Natalia M.** — Assistant of the Chair of Computer Design of Machine-Tools and Engineering Technologies

**В. Д. Рудь<sup>1</sup>**  
**Л. М. Самчук<sup>1</sup>**  
**Н. М. Гулієва<sup>1</sup>**

## Применение пирометрической методики для визуализации фронта СВС-горения

<sup>1</sup>Луцкий национальный технический университет

*Рассмотрена пирометрическая методика исследования процессов изготовления пористых проницаемых картриджей с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Предложенная методика позволяет на основе обработки данных видеозаписи обеспечить визуализацию фронта горения и определение его тепловой структуры.*

**Ключевые слова:** высокотемпературный синтез, реактор, визуализация, фронт горения, пирометрия, пористые заготовки.

**Рудь Виктор Дмитриевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры компьютерного проектирования станков и технологий машиностроения, e-mail: vikdmrud@ukr.net;

**Самчук Людмила Михайловна** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры компьютерного проектирования станков и технологий машиностроения;

**Гулієва Наталія Михайлівна** — асистент кафедри комп'ютерного проектування станків і технологій машиностроєння