

УДК 621.457

Л.М. Самчук

Луцький національний технічний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СВС – ПРОЦЕСУ СИСТЕМИ Тi-C-ШХ15

На підставі експериментальних досліджень доведена правомірність використання математичної моделі СВС - процесу для опису процесу синтезу системи Тi-C-ШХ15. Показано, що процес горіння триває менший часовий інтервал, ніж процес нагрівання. Спочатку спостерігається накопичення температури від ініціювання СВС - процесу у заготовці, що дає поштовх швидкому проходженню процесу горіння.

Ключові слова: температура, СВС – процес, циліндричний зразок. СВС – реакція.

Постановка проблеми. Процес спікання виробів в режимі СВС супроводжується нестационарними тепловими явищами. Для отримання виробів з необхідними та якісними показниками необхідно використовувати обладнання з прогнозованими параметрами та правильно організованим теплообміном в ньому [1]. У зв'язку з цим, проблема дослідження закономірностей розвитку нестационарних просторових теплових процесів в обладнанні та виробках пов'язані з розв'язком диференціальних рівнянь з відповідними крайовими умовами [2]. Задача розв'язку процесів нестационарного теплообміну з урахуванням кінцевої швидкості поширення теплоти значно ускладнюється [3].

Виходячи із складності задачі доцільним є розділення її на декілька окремих задач, а саме:

- ✓ Підбір обладнання, яке здатне забезпечити створення оптимальних умов для проходження технологічного процесу спікання.
- ✓ Обґрунтування оптимального режиму нагрівання зразка до моменту його запалення, який би забезпечив рівномірний прогрів. Рівномірність нагрівання забезпечує рівномірність розповсюдження фронту СВС та якість спікання зразка.
- ✓ Оптимізація умов проходження процесу СВС після запалення зразка.
- ✓ Аналіз дифузійних явищ, які відбуваються в процесі СВС.

Вирішення цих окремих задач дасть можливість в цілому підібрати режими роботи обладнання та оптимізувати теплофізичні умови проходження технологічного процесу [4, 5].

Аналіз основних досліджень. Аналіз літературних джерел свідчить про те, що в останній час метод СВС набуває широкого розповсюдження. Про це свідчать роботи таких вчених як: В.Г. Абрамова, Г.А. Баглюк, В.В. Барзика, І.П. Боровінської, Ю.М. Бузова, Ю.М. Григор'єва, Ю.Ю. Жигуца, А.Н. Золотко, А.Г. Мержанова, О.Ю. Повстяного, В.І. Похмурського, В.Д. Рудя, В.І. Савуляка, Б.П. Середи, Н.В. Чуканова, В.М. Шкіро. Є роботи, присвячені математичному моделюванню процесів СВС. Наприклад, В.С. Бермана, Л.М. Демидової, С.В. Костіна, І.М. Любченко, Ю.С. Рязанцева, А.Г. Струніної, А.Н. Фірсова та К.Г. Шкадінського.

Розвиток теорії безкисневого горіння нерозривно пов'язаний з вдосконаленням відомих і розробкою нових раціональних процесів виготовлення виробів, зниженням матеріаломісткості та вартості обладнання, підвищенням продуктивності, безпеки і культури виробництва при одночасному цілеспрямованому формуванні властивостей продукції.

Цілі статті полягають у експериментальному обґрунтуванні СВС – процесу для системи Тi-C-ШХ15.

Об'єкти досліджень. Об'єктом дослідження є порошкова система Тi-C-ШХ15.

Викладення основного матеріалу дослідження Процес спікання дослідного зразка в установці характеризується декількома послідовними діями, які створюють загальний технологічний процес. Як зазначено вище цей технологічний процес розділяється на два етапи: нагрівання дослідного зразка до моменту його запалення та етап проходження самого процесу СВС після запалення дослідного зразка. Для вирішення поставлених задач розглянемо розрахункову схему для моделювання процесу спікання циліндричного дослідного зразка (рис. 1) в циліндричних координатах, коли вісь z співпадає з його віссю симетрії, а вісь r лежить в площині його основи. Дана модель описує процес отримання методом СВС дослідних зразків висотою 60 мм і діаметром 30 мм, з використанням порошоків титану, вуглецю та сталі ШХ15.

Розглядається задача про дослідження процесу поширення тепла у циліндричному зразку (рис. 1) висотою 60 мм та діаметром 30 мм, що отриманий методом СВС з використанням порошків титану, вуглецю та сталі ШХ15. Віднесемо циліндр до циліндричної системи координат xyz , розмістивши її початок у центрі верхньої основи.

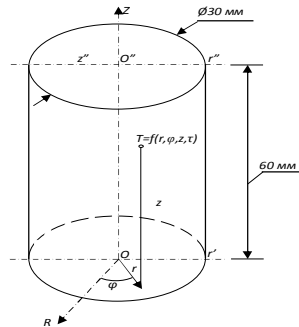


Рис. 1. Числове моделювання процесу нагрівання дослідного зразка

Рівняння теплового балансу в диференційній формі [6, 7]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} \vec{J} + F(\vec{r}, t), \quad (1)$$

$$\text{div} \vec{J} = \frac{\partial \vec{J}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{J}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{J}_z}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\vec{J} = j_x \vec{e}_x + j_y \vec{e}_y + j_z \vec{e}_z, \quad (3)$$

де $\vec{J} = (\vec{r}, t), \quad (4)$

$$\vec{T} = \vec{T}(r, t), \quad (5)$$

де c – питома теплоємність, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$; ρ – густина, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $F(\vec{r}, t)$ – густина потужності джерела тепла, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$.

За законом Фур'є можна представити як:

$$\vec{J}(r, t) = -\lambda \cdot \text{grad} T(\vec{r}, t), \quad (6)$$

$$\text{grad} T(r, t) = \frac{\partial T}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \vec{e}_\theta, \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$.

Підставимо (6) в (1) отримаємо рівняння теплопровідності:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) + F(\vec{r}, t); \quad F(\vec{r}, t) = Q \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad (8)$$

де Q – тепловий ефект реакції, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$; $\frac{\partial \eta}{\partial t} = -k_0 e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)}$ – рівняння хімічної кінетики; k_0 – передекспоненційний фактор; E – енергія активації, $\frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$; R – універсальна газова стала, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Математична модель для цього випадку може бути в загальному вигляді записана в циліндричній системі координат у вигляді рівняння теплопровідності для системи з внутрішніми джерелами теплоти у векторній формі:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{qv}{c\rho}, \quad (9)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності, $a = \lambda / c\rho$; c – теплоємність; ρ – густина, кг/м^3 ; $\nabla^2 t$ – оператор Лапласа.

Записавши оператор Лапласа в циліндричній системі координат:

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (10)$$

та підставивши його в рівняння (3.36) отримаємо дане рівняння у вигляді:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{qv}{c\rho}. \quad (11)$$

Для циліндричного зразка рівняння теплопровідності запишеться у вигляді:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) - \frac{Q}{c\rho} k_0 e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)}, \quad (12)$$

де $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – теплопровідність, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

$$\text{Тоді: } \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \text{ і } \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0.$$

При моделюванні процесу нагрівання для поставленої задачі будемо вважати, що процес поширення тепла є рівномірним вздовж довжини зразка (осі x): відбувається між концентричних циліндрах від зовнішньої поверхні до осі (рис. 2).

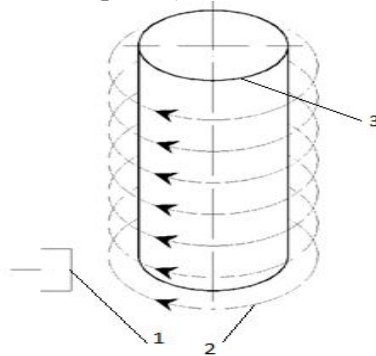


Рис. 2. Поширення теплових хвиль: 1 – ініціююча вольфрамова спіраль, 2 – потік теплових хвиль, 3 – досліджуваний зразок

Тому рівняння теплопровідності [8] запишемо у полярних координатах, нехтуючи зміною тепла вздовж довжини зразка:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) - \frac{Q}{c\rho} k_0 e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)}, \quad (13)$$

де $c\rho$ – теплоємність; λ – ефективна теплопровідність; U – лінійна швидкість горіння, см/с ; Q – тепловий ефект реакції (на одиницю об'єму), k_0 – передекспоненційний фактор.

Для розглянутої моделі зразка були враховані наступні параметри:

$$C_p = 1 \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{кал}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \right] - \text{теплоємність}; \quad \lambda = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} - \text{ефективна теплопровідність};$$

$Q = 1 \text{ Дж}$, $Q = C_p \cdot m \cdot \Delta T$ – тепловий ефект; $\varphi(\eta) = k_0 e^{-E/RT} (1 - \eta)^n$ – степінь перетворення, де n – кількість перетворень; в даному випадку $n=1$.

Розрахунок таких параметрів як: теплоємність, ефективна теплопровідність, тепловий ефект при СВС композиційних матеріалів і формування різного роду сплавів є однією з важливих задач сучасного матеріалознавства [9]. Дані про параметри синтезу (перш за все про енергію активації процесу) дозволяють класифікувати систему за типом взаємодії, а структура кінетичних функцій дає інформацію про фізичні механізми фазоутворення, що дозволяють прогнозувати і моделювати процеси синтезу в тій чи іншій системі при різних режимах.

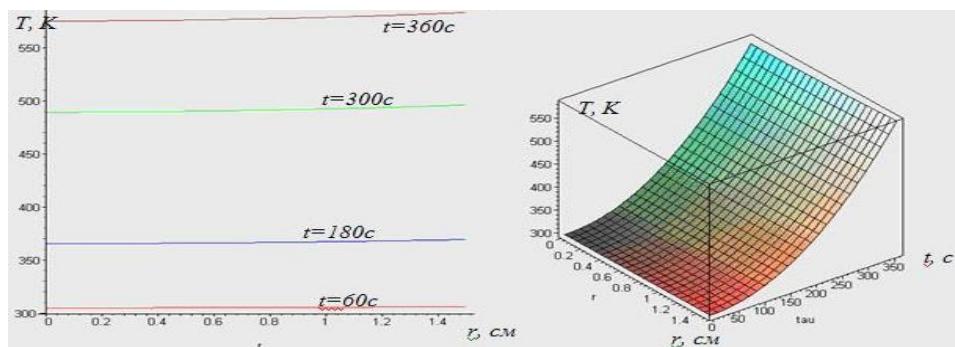
У випадку поставленої задачі граничні умови запишемо у вигляді:

$$T(r,0) = T_0; T(R_0,t) = T_0 + \omega \cdot t^2; \frac{\partial T(0,t)}{\partial r} = 0, \quad (14)$$

де ω – швидкість поширення тепла в заготовці від нагріваючого елемента, K/c^2 .

Графічне зображення розв'язку задачі про нагрівання циліндричного зразка отримано з допомогою числових методів системи комп'ютерної математики *Maple*. У початковий момент дослідження температура зразка співпадає з температурою навколишнього середовища. Режим нагріву змінюється за координатою t . На рис. 3. (а) подано графік залежності зміни температури від глибини проникнення у різні моменти часу. Протягом перших 60 секунд не спостерігається значної зміни температури зразка та відбувається рівномірне нагрівання [9]. Проте, зі збільшенням часу нагрівання відбувається процес нерівномірного нагрівання – зовні поверхня зразка має більшу температуру, ніж внутрішня частина. Це пояснюється тим, що інтенсивність теплопередачі через матеріал менша від теплопередачі конвективного теплообміну. Рис. 3 (б) показує зміну температури у зразку з часом. З рисунку видно, що нагрівання зразка відбувається за експоненціальним законом [10].

Нагрітий до 573К (температура пірофорності матеріалу) зразок спалахував від ініціюючої спіралі, що розміщувалася біля нижньої основи зразка.



а)

б)

Рис. 3. Закономірність зміни температури зразка при СВС - процесі:

а – графічна залежність температури від глибини проникнення, б – графічна залежність зміни температури з часом

Для моделювання процесу горіння рівняння теплопровідності з граничними умовами записувалися у вигляді [11]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{Q}{c\rho} k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \quad (15)$$

Граничні умови:

$$T(x,0) = T_1 + x^\vartheta; c \left(\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} \right) = h(T(0,t) - T_1); -c \left(\frac{\partial T(L,t)}{\partial x} \right) = h(T(L,t) - T_1), \quad (16)$$

де x^ϑ – характеристика додаткової зміни температури, L – довжина зразка,

T_1 - 573К – температура пірофорності матеріалу.

З допомогою пакету прикладних програм *Maple* розв'язок задачі горіння циліндричного зразка отримано числовими методами, що представлений на рис. 4. (за допомогою процедури *dsolve*). В середовищі *Maple* використали можливість чисельного розрахунку диференціальних рівнянь частинних похідних із заданими граничними умовами [11]. На основі отриманого

чисельного розв'язку побудовано графіки залежності температури від полярної відстані у різні проміжки часу (рис.4. (а)) та площину відгуку (рис. 4. (б)).

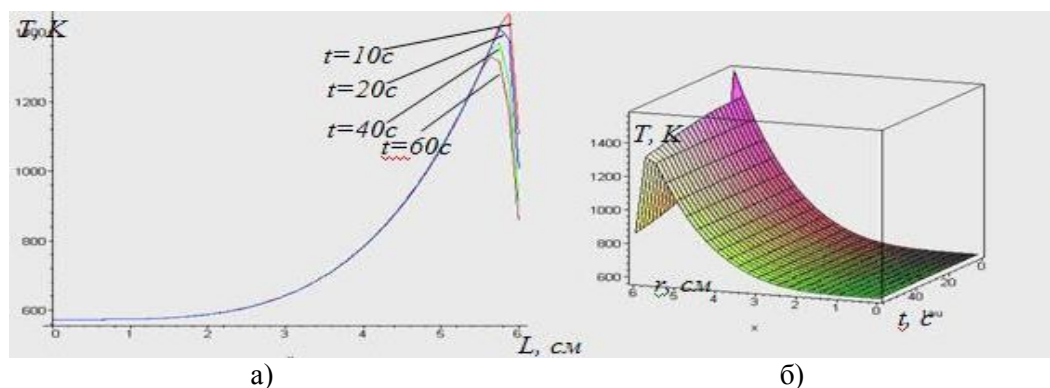


Рис. 4. Вплив геометричних параметрів на температуру: а – залежність температури від полярної відстані в різні проміжки часу, б – характеристика процесу горіння окремого елемента

З отриманих графічних залежностей видно, що процес горіння триває менший часовий інтервал, ніж процес нагрівання [12]. Спочатку спостерігається накопичення температури від ініціювання СВС - процесу у заготовці, а потім швидкий процес поширення хвилі горіння.

Висновок. На підставі експериментальних досліджень доведена правомірність використання математичної моделі СВС - процесу для опису процесу синтезу системи Ti-C-ШХ15. Математична модель дає можливість дослідити температурні процеси в досліджуваному зразку на кожному етапі експерименту та в подальшому оптимізувати процес виготовлення пористих проникливих матеріалів наперед заданими властивостями.

1. Исаченко В.П. Теплопередача: учебник для вузов/ Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. – М.: Энергоиздат, 1981.– 416 с.
2. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / Кутателадзе С.С. – Новосибирск: Наука. – 1989. – 416 с.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М.: Высш. шк., 1986. – 469 с.
4. Ерофеев В.А. Теплотехника: учебник для вузов / В.А. Ерофеев, П.Д. Семенов, А.С. Пряхин; под ред. В.А. Ерофеева. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 456 с. – ISBN 5-94628-227-1.
5. Дементий Л.В. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Л.В. Дементий, А.А. Кузнецов, Ю.В. Менафова. –Краматорск: ДГМА, 2002. – 260 с.
6. Лабай В.Й. Тепломасообмін / В.Й. Лабай. – Львів: Тріада Плюс, 2004. – 260 с. – ISBN 5-7763-8829-5.
7. Кривандин В.А. Металлургическая теплотехника. В 2 т. Т.1. Теоретические основы: учебник для вузов / В.А. Кривандин и др.; под. ред. В.А. Кривандина. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
8. Баскаков, А.П. Теплотехника: учебник для вузов / А.П. Баскаков и др]; под ред. А.П. Баскакова. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоиздат, 1991. – 224 с.
9. Modeling and automation of temperature processes in powder metallurgy/[Ляшенко В.П., Кирилах Н.Г., Григорова Т.А., Настенко О.И.] // Вестник национального технического университета «ХПИ».– Вып. 6/2007. – Харьков: ХПИ, 2007. – С. 35–41.
10. Агошков В.И. Методы решения задач математической физики / Агошков В.И., Дубовский, П.Б., Шутяев В.П. – М.: Физматлит, 2002. – 320 с.
11. Ляшенко В.П. Моделивання процесів пресування та спікання порошкових матеріалів / В.П. Ляшенко, Т.А. Григорова // Вісник Запорізького державного університету. Сер. Фіз.-мат. науки №1. – Запоріжжя, 2008. – С. 124–130.
12. Владимирив В.С. Уравнения математической физики / В.С. Владимирив. – М.: Наука, 1981. –512 с.