

УДК 669.295:536.46

## КІНЕТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ САМОРОЗПОВСЮДЖУВАЛЬНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗУ

**к.т.н., доц., докторант Белоконов Ю.О.<sup>1</sup>, ст. викл. Жеребцов О.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Запорізька державна інженерна академія, Металургійний факультет, кафедра металургії

<sup>2</sup>Запорізька державна інженерна академія, Факультет будівництва та цивільної інженерії, кафедра природничих наук

E-mail: [aazherebtsov@gmail.com](mailto:aazherebtsov@gmail.com), [belokonura@gmail.com](mailto:belokonura@gmail.com)

На основі експериментальних методів дослідження кінетики взаємодії інтерметалідних сплавів в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС) отримані аналітичні рівняння температурно-часової залежності утворення інтерметалідів в системі Ni-Al і Ti-Al та їхні енергії активації. Встановлено, що для реакції взаємодії нікелю та алюмінію з утворенням перших кристалів інтерметалідів енергія активації становить 43 кДж/моль, що в ~ 1,8 рази нижче енергії активації Ti-Al сплавів. З урахуванням отриманих залежностей обчислено швидкість кінетики утворення інтерметалідних фаз.

Серед найбільш перспективних методів отримання інтерметалідних сплавів на основі алюмінідів титану й нікелю є метод саморозповсюджувального високотемпературного синтезу(СВС). СВС є ефективним методом отримання широкого спектру матеріалів і являє собою сильно екзотермічну взаємодію хімічних реагентів у конденсованій фазі, що протікає у режимі горіння [1]. Одним з варіантів проведення СВС-процесу є нагрівання зі заданою швидкістю до такої температури, при якій починається об'ємне саморозігрівання системи за рахунок хімічної реакції, й СВС проходить в режимі об'ємного теплового вибуху (теплового самозапалення).

З урахуванням значної відмінності нового метода від традиційного способу отримання інтерметалідів значний інтерес являє дослідження кінетичних процесів утворення продуктів синтезу при нестационарних температурних умовах [2].

Метою роботи є встановлення закономірностей кінетичних перетворень при теплому самозапаленні інтерметалідних сплавів NiAl і TiAl.

Об'єктом дослідження є інтерметалідні системи Ti-Al і Ni-Al (таблиця 1). Перша система відноситься до групи інтерметалідних систем, в яких адіабатична температура горіння нижче температури плавлення утворюючих з'єднань ( $T_{пл} < T_{ад}$ ), друга відноситься до систем, для яких адіабатична температура горіння дорівнює температурі плавлення продукту, що утворюється ( $T_{пл} = T_{ад}$ ) [3].

Таблиця 1

### Параметри СВС-системи

Реакція $R_1 + R_2 \rightarrow P$	$T_{пл}(R_1)$ , К	$T_{пл}(R_2)$ , К	$T_{пл}(P)$ , К	$T_{ад}$ , К
Ni + Al $\rightarrow$ NiAl	1728	933	1910	1911
Ti + Al $\rightarrow$ TiAl	1941	933	1733	1654

Для дослідження процесів взаємодії нікелю та алюмінію в твердому стані зразки відпалювали при температурах від 300 до 500 °С через кожні 10 °С з різними часом витримки (~ 5 хв). В системі Ni-Al спостерігається чіткий латентний період, тривалість якого зменшується з підвищенням температури. Дослідивши структуру зразків Ni-Al в залежності від температури і часу нагрівання, вдалось зафіксувати момент появи інтерметалідів певного розміру (0,5-1,0 мкм) при кожній з досліджених температур. Отриману множину емпіричних значень піддали апроксимації методом найменших квадратів згідно до експоненціального

рівняння[4,5]. За допомогою пакету прикладних програм для інженерно-математичних розрахунків SciLab були знайдені розрахункові значення енергії активації та передекспоненціального показника, а рівняння представлено у вигляді графіку температурно-часової залежності (рис. 1).

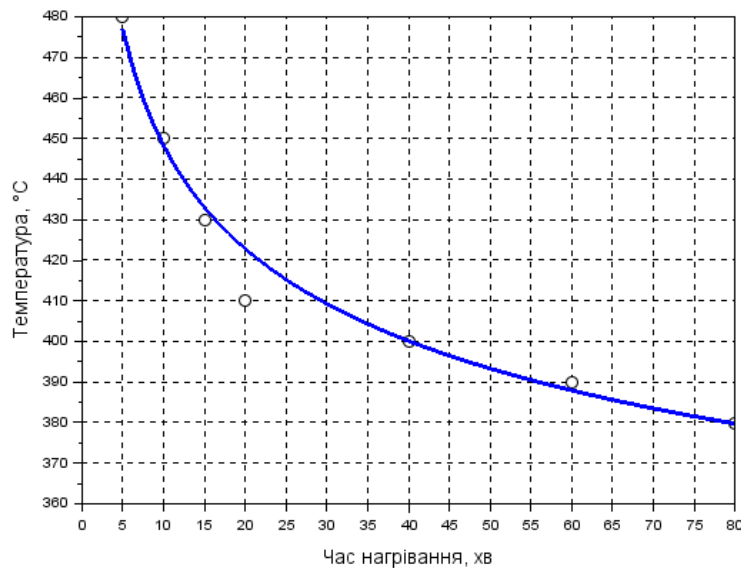


Рис. 1. Температурно-часова залежність утворення інтерметалідів у системі Ni-Al

Розрахунково-аналітична залежність представлена у вигляді наступного рівняння:

$$\tau = 1,0 \cdot 10^{-4} \exp\left(\frac{42917}{RT}\right), \quad (1)$$

яке дозволяє визначити швидкість утворення перших ділянок інтерметалідної фази:

$$\dot{N} = 5,76 \cdot 10^6 \exp\left(\frac{-42917}{RT}\right), \quad (2)$$

Таким чином енергія активації утворення перших інтерметалідних кристалів за експериментальними результатами дорівнює приблизно 43 кДж/моль.

Виконані дослідження з нагрівання зразків з'єднань і наступні металографічні дослідження показали, що при кожній температурі існує латентний період, протягом якого в зоні контакту інтерметаліди не виявляються. Для системи Ti-Al утворення інтерметалідів вдалось виявити при температурі 510 °C тільки після 80 хвилин ізотермічного відпалу. Температурно-часова залежність появи інтерметалідів в системі Ti-Al надана на рисунку 4. Початкова стадія структуроутворення алюмінідів титану - плавлення алюмінію, викликана тепловим імпульсом, і його подальше розтікання по каналах капілярно-пористого середовища [6]. Подальша дифузія атомів алюмінію в решітку часток титану призводить до зародження в дифузійній зоні перших кристалів інтерметалідних з'єднань TiAl<sub>3</sub> (рис. 2).

Дослідження закономірностей тепловиділення при тепловому samozапаленні дозволило встановити наступну послідовність реакцій TiAl<sub>3</sub> → Ti<sub>3</sub>Al → TiAl.

Розрахунок температурно-часової залежності дозволив визначити наступне рівняння:

$$\tau = 8,0 \cdot 10^{-7} \exp\left(\frac{78676}{RT}\right), \quad (2)$$

яке дозволяє визначити енергію активації утворення перших інтерметалідних кристалів в системі Ti-Al ~ 79 кДж/моль.

Відповідно швидкість утворення перших інтерметалідів на границі взаємодії титану і алюмінію складає:

$$\dot{N} = 7,2 \cdot 10^8 \exp\left(\frac{-78676}{RT}\right). \quad (2)$$

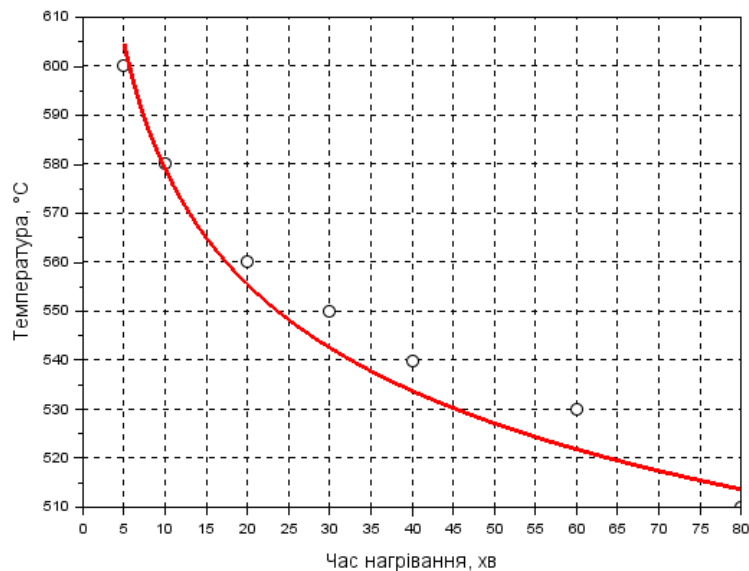


Рис. 2. Температурно-часова залежність утворення інтерметалідів у системі Ti-Al

### ВИСНОВКИ

На основі експериментальних методів дослідження кінетики взаємодії інтерметалідних сплавів в умовах СВС отримані аналітичні рівняння температурно-часових залежностей утворення інтерметалідів в системах Ni-Al і Ti-Al та їхні енергії активації. Встановлено, що для реакції взаємодії нікелю та алюмінію з утворенням перших кристалів інтерметалідів енергія активації становить 43 кДж/моль, що в  $\sim 1,8$  рази нижче енергії активації Ti-Al сплавів. Таким чином, інтерметалідні з'єднання в системі Ti-Al мають високі значення енергії активації, а отже, показують складність протікання СВС-реакції в звичайних умовах. Для здійснення реакції синтезу в системі Ti-Al необхідний попередній підігрів системи до температури 400-600 К.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Амосов А.П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов / А.П. Амосов, И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 567 с.
2. Sereda B. The Retrieving of Heat-resistant Alloys on Intermetallic Base for Details of Gas Turbine Engine Hot Track in SHS Conditions / Sereda B., Zharebtsov A., Belokon' Y. [and other]. // Materials Science and Technology. – 2010. Vol.3. – P. 2097-2102.
3. The Researching and Modeling of Physical-Chemical Properties of Ni-base Alloys in SHS Conditions / Sereda B., Belokon' Y., Zharebtsov A. and Sereda D // Materials Science and Technology. – 2012. Vol.1. P. 494-498.
4. Лариков Л.Н. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке/ Л.Н. Лариков, В.Р. Рябов, В.М. Фальченко. – М.: Машиностроение, 1975. – 192 с.
5. Fe-Al phase formation around SHS reactions under isothermal conditions/ E. Poche'c, S. Jó'zwiak, K. Karczewski, Z. Bojar// Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – No 509 . – P. 1124-1128.
6. Sereda B., Zharebtsov A. and Belokon Y. The processes research of structurization of titan aluminides received by SHS // Materials Science and Technology. – 2009. Vol.3. P. 2069-2073.