

**ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЕЗІНТЕГРАЦІЇ
ЗАГОТОВОК ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ СПОЛУК ОТРИМАНИХ
ТЕРМОХІМІЧНИМ ПРЕСУВАННЯМ**

Белоконь Ю.О.¹ [ORCID], Гречаний О.М.² [ORCID],
Васильченко Т.О.³ [ORCID], Сагулякін О.Є.⁴ [ORCID]

¹ Запорізький національний університет, д-р техн. наук, професор, Україна

² Запорізький національний університет, Ph.D., доцент, Україна

³ Запорізький національний університет, канд. техн. наук, доцент, Україна

⁴ Запорізький національний університет, аспірант, Україна

Анотація. У роботі розглянуто проблему підвищення ефективності отримання інтерметалідних сполук як перспективних матеріалів машинобудування. Проаналізовано особливості застосування, а також недоліки традиційних методів виготовлення. Запропоновано використання термохімічного пресування як енергоефективного способу отримання заготовок інтерметалідних сполук із прогнозованими геометричними параметрами. Обґрунтовано доцільність визначення енергії дезінтеграції методом падаючого вантажу з використанням маятникового копра. Отримані результати дозволяють моделювати процеси подрібнення та обґрунтовано обирати промислове обладнання для досягнення заданої фракції матеріалу.

Ключові слова: інтерметалідні сполуки, енергоефективні технології, крихкі матеріали, метод падаючого вантажу, подрібнення матеріалів

Вступ. Сучасним викликом для машинобудівної галузі промисловості є отримання нових практичних матеріалів, що викликане обмеженістю характеристик класичних матеріалів в умовах постійного конструктивного удосконалення вузлів та деталей виробничих агрегатів. В даному контексті особливий інтерес представляють собою інтерметалідні сполуки, які часто використовують як зміцнюючі фази всередині звичайних сплавів [1]. Інтерметалідні сполуки відносяться до особливого типу матеріалів, які утворюються, коли декілька металів (в більшості випадків два, але інколи і більше) з'єднуються в строго визначеному стехіометричному співвідношенні і створюють нову кристалічну структуру, відмінну від структури вихідних

чистих металів. Завдяки такій властивості можливе отримання сплавів з унікальними властивостями. Наприклад завдяки високій твердості і жароміцності можливе використання титан-алюмінідів (TiAl) або нікель-алюмінідів (NiAl) при виготовленні високотемпературних деталей газових турбін та авіаційних двигунів [2]. Широко застосовуваний в медичному стентуванні сплав з пам'яттю форми – нітинол (NiTi), також відноситься до класу інтерметалідних сполук [3].

Сучасні методи, на кшталт плавлення, порошкова металургія, твердофазна дифузія тощо, передбачають отримання різних за своїми габаритними характеристиками форм заготовок інтерметалідних сполук – від великошматкової до порошкоподібної [4,5]. Таке різноманіття форми виготовлення інтерметалідних сполук дещо загальмовує подальше їхнє впровадження, адже в більшості випадків вони використовуються або як легуючі добавки або як функціональне поверхнєве напилення. При цьому технологічний процес введення інтерметалідних сполук передбачає їхнє використання у форматі дроту, порошку або, у випадку використання як лігатури – шматків певної фракції. Також до недоліків «традиційних» способів отримання інтерметалідних сполук можна віднести їхню досить низьку енергоефективність.

Таким чином питання визначення оптимального енергоефективного способу отримання заготовок інтерметалідних сполук з можливістю завчасного прогнозування їхніх геометричних характеристик є актуальним. За умови його вирішення виникає можливість визначення типу механічного обладнання для подрібнення заготовок з чіткою класифікацією вихідного продукту за розміром часточок. При цьому основним технологічним параметром для визначення класу промислового подрібнюючого обладнання буде виступати енергія дезінтеграції отриманих заготовок встановлена шляхом експериментальних досліджень.

Основний матеріал. Термохімічне пресування це відносно новий альтернативний енергоефективний метод отримання заготовок різних інтерметалідних сполук [6-8]. В залежності від обраного типу формуючого

устаткування термохімічне пресування дозволяє отримувати заготовки як круглого так і прямокутного поперечного перерізу. За умови використання одного типорозміру пресформи вагове відхилення отриманих заготовок інтерметалідних сполук при цьому складає не більше 5 %.

Подальше використання отриманих заготовок передбачає їхнє подрібнення до певної фракції. При цьому варто враховувати, що в більшості випадків інтерметалідні сполуки по своїй природі дуже крихкі і пластично не деформуються [9, 10].

Аналіз відкритих джерел [11, 12] з виявлення перспективного методу оцінки енергії дезінтеграції заготовок отриманих методом термохімічного пресування вказує на те, що найбільш перспективним є метод падаючого вантажу, а саме визначення енергії руйнування з використанням маятникового копра. Перевагою використання дослідницької схеми з маятниковим копром є простота організації експериментальної частини з визначення енергії руйнування дослідного зразка, а також можливість моделювання процесу подрібнення матеріалів в молоткових дробарках.

Висновки. Найбільш перспективним методом визначення енергії дезінтеграції заготовок, отриманих термохімічним пресуванням, є метод падаючого вантажу з використанням маятникового копра. Такий підхід дозволить виконати моделювання процесу руйнування в молоткових дробарках та в подальшому обґрунтовано обрати промислове обладнання для отримання необхідної фракції матеріалу.

Подяки

Дослідження проведено в межах конкурсу проведеного Національним фондом досліджень України на одержання грантів Президента України для підтримки наукових досліджень і розробок молодих вчених-докторів наук (до 40 років включно) за договором № 2025.03/0004.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Schneider A., Sauthoff G. Iron Aluminium Alloys with Strengthening Carbides and Intermetallic Phases for High-Temperature Applications. *steel research international*. 2004. Vol. 75, no. 1. P. 55–61. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.200405927>

2. Pavlenko D. V., Belokon' Y. O., Tkach D. V. Resource-Saving Technology of Manufacturing of Semifinished Products from Intermetallic γ -TiAl Alloys Intended for Aviation Engineering. *Materials Science*. 2020. T. 55, № 6. C. 908–914. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00386-1>
3. Kauffman G. B., Mayo I. The Story of Nitinol. *The Chemical Educator*. 1997. Vol. 2, no. 2. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1333/s00897970111a>
4. Preparation of Highly Pure MnBi Intermetallic Compounds by Arc-Melting / H. Yoshida et al. *Materials Transactions, JIM*. 1999. Vol. 40, no. 5. P. 455–458. URL: <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.40.455>
5. Obtaining NiAl intermetallic compound using different milling devices / E. T. Kubaski et al. *Advanced Powder Technology*. 2012. Vol. 23, no. 5. P. 667–672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2011.08.005>
6. Development of new composite materials based on TiN–Ni cermets during thermochemical pressing / Y. Belokon et al. *Results in Engineering*. 2022. P. 100724. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100724>
7. Development of composite materials based on TiN - Mo cermets during thermochemical pressing / Y. Belokon et al. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.05.006>
8. Exploring thermochemical pressing in the manufacture of TiN - W cermet-based composite materials / Y. Belokon et al. *International Journal of Thermofluids*. 2025. Vol. 25. P. 101020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101020>
9. Cahn R. W. Intermetallics: New physics. *Contemporary Physics*. 2001. Vol. 42, no. 6. P. 365–375. URL: <https://doi.org/10.1080/00107510110084084>
10. Mechanical properties of porous Fe–Al intermetallics / H. Y. Gao et al. *Powder Metallurgy*. 2014. Vol. 58, no. 3. P. 197–201. URL: <https://doi.org/10.1179/1743290114y.0000000107>
11. Quality assurance of absorbed energy in Charpy impact test / C. L. F. Rocha et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 733. P. 012009. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/733/1/012009>
12. An Improved Indentation Method for Estimating Limits of Fracture Toughness in Brittle Films / K. K. Fu et al. *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1095. P. 598–602. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1095.598>

**SUBSTANTIATION OF THE METHODOLOGY FOR RESEARCHING THE
DISINTEGRATION ENERGY OF INTERMETALLIC COMPOUNDS
PREPARATIONS OBTAINED BY THERMOCHEMICAL PRESSING**

Yuriy Belokon, Oleksii Hrechanyi, Tetiana Vasilchenko, Oleksandr Sahuliakin

Abstract. *The paper considers the problem of increasing the efficiency of obtaining intermetallic compounds as promising materials for mechanical engineering. The features of their application, as well as the shortcomings of traditional manufacturing methods, are analyzed. The use of thermochemical pressing is proposed as an energy-*

efficient method of obtaining blanks of intermetallic compounds with predicted geometric parameters. The feasibility of determining the disintegration energy by the falling load method using a pendulum impact hammer is substantiated. The results obtained allow modeling grinding processes and reasonably selecting industrial equipment to achieve a given fraction of material.

Keywords: *intermetallic compounds, energy-efficient technologies, brittle materials, falling weight method, material grinding*

Acknowledgments

The research was conducted within the framework of the competition held by the National Research Foundation of Ukraine for grants from the President of Ukraine to Support Research and Developments of Early Career Researchers – Doctors of Science (up to 40 years old inclusive) under contract No. 2025.03/0004.