



Рис. 1. Режим азотування, суміщеного із зміцнювальним термічним обробленням сплаву VT22

**Левченко Г.Б., Полегенько О.О.**  
*(КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ)*

### **ЖАРОМІЦНІ СПЛАВИ НА ОСНОВІ ІНТЕРМЕТАЛІДІВ**

E-mail: [glebchenko14@gmail.com](mailto:glebchenko14@gmail.com)

Інтерметаліди – хімічні сполуки двох або декількох металів у певних кількісних (стехіометричних) співвідношеннях (напр. NiTi, Ti<sub>3</sub>Al, Cu<sub>2</sub>MnAl). Вони утворюються внаслідок взаємодії компонентів при сплавленні, конденсації з парової фази, а також при перетвореннях у твердому стані. Лише в подвійних системах синтезовано майже 7 тисяч, а загалом – до 14 тисяч інтерметалідів. Вони займають проміжне становище між металами та кераміками (як за типом хімічного зв'язку, так і за властивостями), але мають переважно металевий зв'язок. На відміну від звичайних металів та сплавів, інтерметаліди мають кращу високотемпературну міцність, високі антикорозійні та антифрикційні властивості [1].

Однією з найбільш важливих властивостей інтерметалідів, як основи для створення конструкційних матеріалів є поєднання їх високої жаростійкості, жароміцності та питомої міцності [2]. Для прикладу, інтерметалід Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> має тетрагональну ґратку, високу температуру плавлення (2484 °C), густину лише на 10 % нижчу, ніж у сталі, та високу вартість, що робить його малопривабливим для

виробництва багатьох жароміцних деталей типу газотурбінних лопаток, камер двигунів, тощо. Інтерметалід  $Zr_5Si_3$  з гексагональною ґраткою має лише на  $150\text{ }^\circ\text{C}$  нижчу температуру плавлення та помітно нижчу густину ( $6\text{ г/см}^3$ ) і меншу вартість та може використовуватись в атомній енергетиці.

Для газотурбінного машинобудування основними інтерметалідними сплавами є алюмініди нікелю  $AlNi$  з кристалічною структурою  $B_2$  (ОЦК) і температурою плавлення  $1638\text{ }^\circ\text{C}$  та  $Ni_3Al$  з ГЦК-решіткою  $L_{12}$  і температурою плавлення  $1360\text{ }^\circ\text{C}$ . Густина обох сполук є майже однаковою, і, незважаючи на нижчу температуру плавлення другого інтерметаліду, він є більш технологічним, а його ґратка здатна до більш ефективного розчинення легувальних елементів та зміцнення [3].

Протягом багатьох десятиріч алюмініди титану розглядаються як потенційна альтернатива алюмінідам нікелю. Хоча  $\gamma$ - $TiAl$  має також ГЦК ґратку, проте його кристалічна структура відрізняється від структури  $Ni_3Al$  і має структуру  $L_{10}$ , яка не забезпечує сплавам на основі такого інтерметаліду достатнього рівня механічних властивостей. Температура плавлення  $TiAl$  становить  $1480\text{ }^\circ\text{C}$ , а дуже мала густина ( $4,1\text{ г/см}^3$ ) робить його затребуваним в аерокосмічній галузі в якості матеріалу для газотурбінних двигунів та компонентів обшивки літальних апаратів [4].

Підвищення механічних та експлуатаційних властивостей алюмінідів нікелю досягається головним чином легуванням: бор підвищує міцність та твердість, покращує зносостійкість, підвищує жаростійкість і зменшує схильність до крихкого руйнування; хром і титан підвищують жаростійкість та корозійну стійкість, міцність і твердість; молібден та вольфрам мають схожий вплив, але також зменшують схильність до крихкого руйнування [5].

Для алюмінідів титану зміна властивостей більшою мірою пов'язана зі зміною структури через вплив різного виду обробки – термомеханічної, термічної, тощо. Легування гафнієм, молібденом, танталом, ванадієм, вольфрамом, оловом, кремнієм та марганцем також грає позитивну роль у питанні, зокрема, підвищення міцності та низькотемпературної пластичності алюмінідів титану, проте найсильніший вплив на ці параметри має ніобій. Високий вміст ніобію (на рівні

20 % мас.) у сплаві на основі  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al дозволив створити окремий інтерметалідний сплав, особливість якого полягає в підвищенні температури шкідливої надпластичності з 600 до 900 °C і забезпеченні максимальної стабільності механічних властивостей в усьому інтервалі температур експлуатації [6].

Інша перспективна основа для сплавів на основі інтерметалідів базується на силіцидах молібдену, які характеризуються високою температурою плавлення, високою твердістю та не надто високою густиною. Вони використовуються в діапазоні температур 1200–1600 °C з агресивними середовищами, тому застосовуються в аерокосмічній, енергетичній, хімічній промисловості, машинобудуванні та інших галузях. До мінусів таких матеріалів належать висока крихкість при кімнатній температурі та недостатня міцність при високій температурі, хоча потенційно їх можна використовувати при температурах вище 1600–2000 °C за умови додаткового легування або армування. Зазвичай інтерметаліди системи Mo-Si легують такими елементами: титан підвищує міцність, твердість і модуль пружності; ванадій та бор покращують зварюваність і оброблюваність; хром підвищує жаростійкість і корозійну стійкість, азот підвищує міцність, твердість і жаростійкість [7].

#### Література:

1. Інтерметаліди та матеріали на їхній основі / С. О. Фірстов // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.]; НАН України, НТШ. – К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2011. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-12407>
2. Takasugi T. Intermetallic Alloys. Metals. 2019; 9:940. <https://doi.org/10.3390/met9090940>
3. Симс Ч.Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / под ред. Симса Ч.Т., Столоффа Н.С., Хагеля У.К.: Пер. с англ. В 2-х книгах. Кн 1. / Под ред. Шалина Р.Е. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.

4. Avdeeva V., Bazhina A., Antipov M., Stolin A., Bazhin P. Relationship between Structure and Properties of Intermetallic Materials Based on  $\gamma$ -TiAl Hardened In Situ with  $Ti_3Al$ . *Metals*. 2023; 13(6):1002. <https://doi.org/10.3390/met13061002>

5. C. Herzig, S. Divinski. Essentials in diffusion behavior of nickel- and titanium-aluminides. *Intermetallics*. 2004. 12 (7-9). – P. 993–1003. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2004.03.005>

6. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник / Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 348 с.

7. Melih Cemal Kushan, Yagiz Uzunonat, Sinem Cevik Uzgur and Fehmi Diltemiz (2012). Potential of  $MoSi_2$  and  $MoSi_2-Si_3N_4$  Composites for Aircraft Gas Turbine Engines, *Recent Advances in Aircraft Technology*, Dr. Ramesh Agarwal (Ed.), ISBN: 978-953-51-0150-5, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/recent-advances-in-aircraft-technology/potential-of-mosi2-and-mosi2-si3n4-composites-for-aircraft-gas-turbine-engines>

**Лисенко Т.В., Крейцер К.О., Козішкурт Є.М.**

*(НУ «Одеська політехніка», м. Одеса)*

**ВАКУУМУВАННЯ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ ПІД ЧАС ЛИТТЯ  
ПІД ВИСОКИМ ТИСКОМ**

E-mail: [tv112odessa@gmail.com](mailto:tv112odessa@gmail.com), [dakerkir@gmail.com](mailto:dakerkir@gmail.com)

У сучасній техніці найбільш актуальним є розвиток магнієвого виробництва. Магній за останнє десятиліття з рідкісного матеріалу для космічної індустрії став третім найбільш часто використовуваним металом після заліза та алюмінію.

Крім високих характеристик, цей метал дуже конкурентоспроможний у рамках ринкової економіки. Це обумовлено його поширеністю, це восьмий елемент у земній корі і третій у морській воді.

Магнієві сплави застосовуються в багатьох галузях промисловості, таких як корпуси електроінструментів, біоінженерії тощо. Вироби з магнієвих сплавів легко утилізуються, не завдаючи шкоди навколишньому середовищу, і безпечні при