

УДК 669.187.56.001.1

Віталій Порохонько к.т.н.¹; Євгеній Тітков PhD¹; Тарас Майданчук к.т.н.¹; Сергій Мариненко к.т.н.²

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

**ВПЛИВ ТЕРМОЦИКЛІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МІКРОСТРУКТУРНУ
ЕВОЛЮЦІЮ СПЛАВУ TiNi, ОТРИМАНОГО МЕТОДОМ
МАГНІТОКЕРОВАНОЇ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ПЛАВКИ**

Анотація. У роботі досліджено вплив термоциклічної обробки на мікроструктуру сплаву TiNi складу 45Ti–55Ni (мас. %), отриманого методом магнітокерованої електрошлакової плавки. Показано, що термоциклювання у температурному інтервалі 550–1050 °C сприяє підвищенню дисперсності та однорідності структури. Встановлено, що ефективність термоциклічної обробки визначається температурним діапазоном, кількістю циклів, тривалістю витримки та швидкістю охолодження.

Ключові слова: нікелід титану, TiNi, термоциклічна обробка, магнітокерована електрошлакова плавка, мікроструктура, ефект пам'яті форми.

Vitalii Porokhonko PhD, Yevgen Titkov PhD, Taras Maydanchuk PhD, Serhii Marynenko PhD

**EFFECT OF THERMAL CYCLING TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURAL
EVOLUTION OF TiNi ALLOY PRODUCED BY MAGNETICALLY CONTROLLED
ELECTROSLAG REMELTING**

Abstract. The influence of thermal cycling treatment on the microstructure of TiNi alloy produced by magnetically controlled electroslag remelting was investigated. It was shown that thermal cycling within the temperature range of 550–1050 °C promotes grain refinement and improves structural homogeneity. The efficiency of thermal cycling depends on the temperature range, number of cycles, holding time and cooling rate.

Keywords: TiNi alloy, thermal cycling treatment, electroslag remelting, microstructure, shape memory alloys.

Сплави системи Ti–Ni належать до класу функціональних матеріалів з ефектом пам'яті форми та надпружністю. Їх унікальні властивості обумовлені оборотними мартенситними перетвореннями між аустенітною та мартенситною фазами. Завдяки цьому сплави TiNi широко застосовуються у біомедичній техніці, авіакосмічній галузі, робототехніці та інтелектуальних конструкціях.

Разом із тим отримання структурно однорідних сплавів TiNi залишається складною технологічною задачею. У литому стані структура нікеліду титану характеризується наявністю вторинних фаз Ti₂Ni, TiNi₃ та інших інтерметалідних утворень, які негативно впливають на функціональні властивості матеріалу, кінетику мартенситних перетворень та характеристики ефекту пам'яті форми.

Одним із перспективних способів підвищення хімічної однорідності сплавів TiNi є використання магнітокерованої електрошлакової плавки (МЕП). Однак навіть при використанні електрошлакових технологій необхідні додаткові методи керування мікроструктурою матеріалу.

Метою даної роботи є оцінка можливості використання термоциклічної обробки для керування мікроструктурою сплаву TiNi, отриманого методом магнітокерованої електрошлакової плавки.

Зливки сплаву TiNi номінального складу 45Ti–55Ni (мас. %) отримували методом МЕР в атмосфері аргону з використанням витратних електродів. Як вихідні компоненти застосовували губчастий титан ТГ-90 та нікель марки НР-2. Для підвищення хімічної однорідності металу отримані зливки піддавали повторному переплаву.

Після повторного переплаву зливки піддавали гарячій деформації шляхом осадки на гідравлічному пресі з подальшою прокаткою. Деформацію здійснювали при температурах 800–950 °С із сумарним ступенем деформації близько 75 %.

Із деформованих заготовок виготовляли зразки для термоциклічної обробки. Термоциклювання здійснювали у температурному інтервалі 550–1050 °С. Кількість циклів становила 19–21, тривалість витримки — 15–30 хв. Охолодження після кожного циклу здійснювали переважно у воді.

Мікроструктурний аналіз показав суттєвий вплив термоциклічної обробки на структуру сплаву TiNi. Зразки без термоциклювання характеризувалися більш крупнозернистою та менш однорідною структурою. Після термоциклічної обробки спостерігалось подрібнення структурних елементів та підвищення рівномірності їх розподілу.

Встановлено, що після термоциклічної обробки зменшується розмір округлих структурних утворень, які виявляються після травлення, а також зростає дисперсність структури загалом. Межі окремих зерен стають менш вираженими, що може свідчити про інтенсифікацію процесів структурної перебудови.

Одночасно у структурі після термоциклювання спостерігалися окремі крупні утворення трикутної та чотирикутної форми. Їх кількість та розміри залежали від режимів термоциклічної обробки. Імовірно, зазначені утворення можуть бути пов'язані з локальним виділенням вторинних інтерметалідних фаз або карбідних та оксидних включень, формування яких активізується під час циклічного температурного впливу. Для остаточного визначення природи цих структур необхідне проведення додаткових фазових досліджень із використанням методів рентгеноструктурного аналізу та локального мікрорентгеноспектрального аналізу.

На підставі отриманих результатів і літературних даних можна припустити, що спостережуване подрібнення структури зумовлене комплексною дією кількох механізмів. Одним із них є активація дифузійних процесів під час повторюваних циклів нагрівання та охолодження. Температурна нестаціонарність сприяє перерозподілу легувальних елементів і частковому розчиненню вторинних фаз.

Іншим важливим фактором є циклічна генерація дефектів кристалічної ґратки — вакансій, дислокацій та внутрішніх напружень. У сплавах TiNi додатковий внесок у структурну еволюцію здійснюють мартенситні перетворення, які супроводжуються локальними деформаціями кристалічної ґратки. Повторювані фазові переходи можуть сприяти формуванню нових центрів кристалізації та подрібненню структури.

Імовірний механізм подрібнення структури при термоциклюванні можна представити у вигляді послідовності:

Нагрівання → активація дифузії → фазові перетворення → генерація дефектів → охолодження → формування нових центрів кристалізації → подрібнення структури.

Результати проведених досліджень свідчать, що ефективність термоциклічної обробки значною мірою визначається температурним діапазоном термоциклювання, кількістю циклів, тривалістю витримки та швидкістю охолодження металу після кожного циклу.

Термоциклювання доцільно здійснювати окремими серіями циклів зі ступінчастою зміною температур. При цьому поступове зниження температур окремих

серій може сприяти подрібненню структури та підвищенню структурної однорідності матеріалу.

Таким чином, термоциклічна обробка може розглядатися як перспективний технологічний метод керування мікроструктурою та властивостями сплавів TiNi, отриманих методом магнітокерованої електрошлакової плавки.

Перелік посилань

1. Fischer R. L., Losco E. F., Lustman B. Phase transformation bonding of metal members : Patent USA № 3025592. Publ. 20.03.1962.
2. Макара А. М., Назарчук А. Т. Про механізм дифузійного зварювання та підвищення якості з'єднань // Автоматичне зварювання. 1969. № 2. С. 29–34.
3. Макара А. М., Назарчук А. Т., Лариков Л. Н., Фальченко Ф. М. Використання температурної нестационарності при дифузійному зварюванні // Фізика і хімія обробки матеріалів. 1972. № 3. С. 115–119.
4. Гордієнко А. І., Івашко В. В. Фазова перекристалізація титанових сплавів при термоциклічній обробці // Ti-2011 в СНД : праці міжнародної конференції. Львів, 2011. С. 418–423.
5. Коваль Ю. М. Сплави з ефектом пам'яті форми — потужний клас функціональних матеріалів // Наука та інновації. 2005. Т. 1, № 2. С. 80–95.
6. Коллеров М. Ю., Александров А. В., Кузнецов С. Ю. та ін. Вплив методу та технології плавки на структуру і властивості зливок на основі нікеліду титану // Титан. 2011. № 2(32). С. 22–28.
7. Лотков А. І., Заводчиков С. Ю., Котрехов В. А. та ін. Мікроструктура та фазовий склад зливок нікеліду титану, отриманих в установці з холодним тиглем // Ti-2011 в СНД : матеріали міжнародної конференції. Львів, 2011. С. 223–233.
8. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys // Progress in Materials Science. 2005. Vol. 50, No. 5. P. 511–678.
9. Ma J., Karaman I., Noebe R. D. High temperature shape memory alloys // International Materials Reviews. 2010. Vol. 55, No. 5. P. 257–315.
10. Frenzel J., George E. P., Dlouhy A. et al. Influence of Ni on martensitic phase transformations in NiTi shape memory alloys // Acta Materialia. 2010. Vol. 58, No. 9. P. 3444–3458.
11. Gall K., Sehitoglu H., Chumlyakov Y. I., Kireeva I. V. Tension-compression asymmetry of the stress-strain response in aged single crystal and polycrystalline NiTi // Acta Materialia. 1999. Vol. 47, No. 4. P. 1203–1217.
12. Khalil-Allafi J., Dlouhy A., Eggeler G. Ni₄Ti₃-precipitation during aging of NiTi shape memory alloys and its influence on martensitic phase transformations // Acta Materialia. 2002. Vol. 50, No. 17. P. 4255–4274.
13. Li B., Rong L. J., Li Y. Y. Microstructure evolution and mechanical properties of NiTi shape memory alloys processed by severe plastic deformation // Materials Science and Engineering A. 2000. Vol. 438–440. P. 738–741.
14. Zhou S., Zhang Y., Wang D. Microstructure control and phase transformation behavior of NiTi alloys subjected to thermomechanical treatment // Journal of Alloys and Compounds. 2012. Vol. 509. P. 770–775.