

Л.Ф.Головко, проф., докт. техн. наук,

Київський національний технічний університет України «КПІ»

О.Й. Мажейка, проф., канд. техн. наук, С.І.Маркович, доц., канд. техн. наук

Кіровоградський національний технічний університет

Лазерне наплавлення та термомеханічна обробка композиційних матеріалів з пам'яттю форми

В статті викладені положення концепції лазерного наплавлення композиційних покриттів з пам'яттю форми, досліджено особливості структуроутворення і властивостей матеріалів з поверхнево-модифікованим шаром із сплаву з пам'яттю форми на основі TiNi, сформованим при лазерній дії. Розроблено технологічний процес поверхневого модифікування з поетапною термічною обробкою і термомеханічним тренуванням шляхом поверхневої пластичної деформації з обтисканням або обкаткою композиційні матеріали, інтерметаліди, лазер, випромінювання, мартенсит, зносостійкість

Матеріали з пам'яттю форми (МПФ) були відкриті в кінці 60-х років цього століття. Вже через 10 років (кінець 70-х - початок 80-х) з'явилася безліч повідомлень в наукових журналах, що описують різні можливості їх застосування. В даний час для МПФ визначені функціональні властивості: одно- і двосторонній ефект пам'яті, псевдо- або супер еластичність, висока заглушаюча здатність [1].

Значний внесок до дослідження МПФ і розширення областей їх використання внесли ряд учених: С.П.Беляєв, С.В. Добаткін, Ю.Н. Коваль, В.Г. Курдюмов, В.А. Ліхачев, С.М. Вейман, Я. Ван-Хумбек, Д.І. Лі, С. Міязаки, К. Ооцука та ін. [2,3].

Такі матеріали проявляючи високі еластичні властивості, здатні змінювати свою форму при зміні температури і не руйнуватися в умовах знакозмінного навантаження. Для інтерметалідів TiNi з складом, близьким до евтектичного, характерний перехід від кубічної (аустенітної фази) до моноклінної (мартенситної) фази при кімнатній температурі. Такі перетворення зазвичай відбуваються в сплавах при високій напрузі, але в результаті наявності ефекту пам'яті або супер еластичності перетворення можуть відбуватися і при низькій напрузі. Аустенітні сплави TiNi проявляють супер еластичну поведінку при механічних навантаженнях і розтягуванні (8%), викликаних мартенситним перетворенням. При розвантаженні мартенсит стає нестабільним і переходить в аустеніт, з компенсацією всієї макроскопічної напруги [2,3].

Мартенситне перетворення – поліморфне перетворення, при якому зміна взаємного розташування складових кристал атомів відбувається шляхом їх впорядкованого переміщення, причому відносні зсуви сусідніх атомів малі в порівнянні з міжатомною відстанню.

Недавні дослідження TiNi-сплавів показали, що супер еластична поведінка приводить до підвищення зносостійкості. Псевдо еластична поведінка зменшує область пружного контакту під час ковзання. Зменшення області пружного контакту між двома ковзаючими частинами збільшує зносостійкість матеріалу.

Сплави з пам'яттю форми отримують шляхом сплаву індивідуальних компонентів. Розплав швидко охолоджують і проводять високотемпературну обробку [3].

Не зважаючи на те, що використання МПФ в машинобудуванні має великі перспективи, застосовувати сплав TiNi як конструкційний матеріал економічно недоцільно через високу вартість самого матеріалу. В зв'язку з цим актуальним завданням є створення ресурсозберігаючих технологій шляхом поверхневого модифікування МПФ на основі нікеліду титану і дослідження структурно-механічних і функціональних властивостей отримуваних композицій.

Для машинобудування інтерес представляють масивні поверхневі шари із сплаву TiNi, що здатні забезпечити функціональні властивості і працювати в складних умовах навантаження. Але не зважаючи на значний об'єм досліджень структури, властивостей і застосувань TiNi-сплавів, фізико-механічні характеристики покриттів з цих матеріалів залишаються маловивченими.

Метою роботи було дослідження особливостей структуроутворення і властивостей матеріалів з поверхнево-модифікованим шаром із сплаву з пам'яттю форми на основі TiNi, сформованим при лазерній дії, з метою забезпечення функціонально-механічних властивостей деталей.

Аналіз відомих способів управління структурою і властивостями сплавів системи Ti-Ni дозволив розробити основну методику забезпечення функціонально-механічних властивостей TiNi-шарів. Зіставлення можливостей різних методів формування покриттів із спеціальними властивостями указує на переваги способу структурної організації поверхневих шарів сплаву TiNi при лазерній дії.

Теоретична модель. Як модель композиції «сталь-сплав TiNi» був прийнятий двошаровий матеріал: для TiNi-покриття реалізовувалася теплофізична модель тонкої пластини, для сталевих основи - напів нескінченного тіла. У одновимірній постановці поле температур описується системою диференціальних рівнянь теплопровідності. Основоположні рівняння теплопередачі були скоректовані згідно уявленням про геометрію зони плавлення з урахуванням положення фронту кристалізації $h(\tau)$ і рішення відшукували за відповідних граничних умов:

– зона 1 (рідкий розплав):

$$\frac{1}{a_1} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \text{ при } \tau > 0, h(\tau) \leq z \leq \infty, \quad (1)$$

$$\text{при } z = h(\tau) \quad T_2(0, \tau) = T_{12}(0, \tau);$$

– зона 1-2 (твердий розчин):

$$\frac{1}{a_{12}} \cdot \frac{\partial T_{12}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_{12}}{\partial z^2} \text{ при } \tau > 0, 0 \leq z \leq h(\tau), \quad (2)$$

$$\text{при } z = h(\tau) \quad \lambda_{12} \cdot \frac{\partial T_{12}}{\partial z} - \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} = \rho \cdot L \cdot \frac{dh}{d\tau}, \quad (3)$$

$$\lambda_{12} = \lambda_{1П} = V_{1П} \cdot N_k \cdot 2 \ln(\lambda_{1C}); \quad (4)$$

– зона 2 (основа):

$$\frac{1}{a_2} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \text{ при } \tau > 0, -\infty \leq z \leq 0, \quad (5)$$

де T_1, T_{12}, T_2 – температури;

a_1, a_{12}, a_2 и $\lambda_1, \lambda_{12}, \lambda_2$ – температуро- і теплопровідності зон 1, 1-2, 2;

ρ - щільність сплаву;

L – прихована теплота кристалізації;

N_k и $V_{1П}$ – координаційне число и об'ємна фракція часток порошку ПН55Т45.

Теплофізичні характеристики інтерполювалися згідно з довідковими даними. Для знаходження розподілу температури по глибині використовували метод інтегральних перетворень Фур'є. При розрахунку за допомогою програми MathCAD отримані температурні залежності на різній глибині шару TiNi (0,15 мм) і сталевій основі (30ХГСА). На стадії охолодження рішення по вигляду симетрично з нагрівом.

Розподіл поля температур (рис. 1) дозволив оцінити температурні умови формування TiNi - покриття і заздалегідь оцінити його товщину.

Методика проведення експериментів. Лазерне наплавлення проводилося пошарово на стандартних сталевих зразках прямокутного (10 × 5 мм, сталі 40Х та сталі 12Х18Н9Т) і круглого ($\varnothing$ 10 мм, сталь 30ХГСА) поперечного перетину в

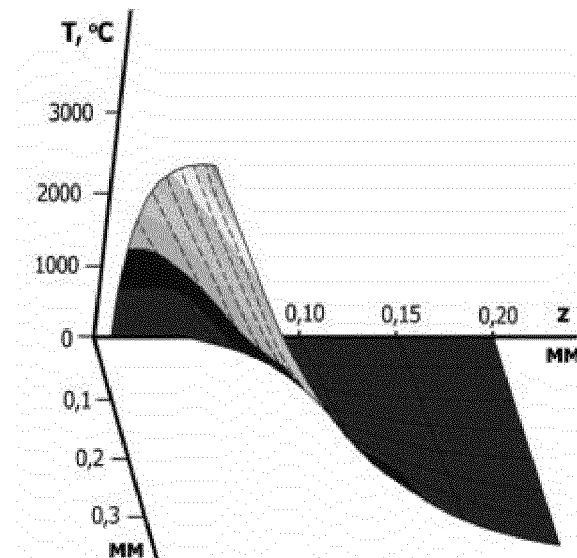


Рисунок 1 – Теплове поле по глибині шару z , мм, сплаву TiNi і площі плями нагріву 0,4 мм²

імпульсному режимі на модернізованій установці Квант-18 (АІГ, λ =1,06 мкм) в захисному середовищі аргону. Для наплавлення використовували порошковий нікелід титана еквіатомного складу (ПН55Т45, НВО «Тулачермет», розмір фракцій – 50-150 мкм), а також чистий нікель (ПНК1-ВЛ7) у вигляді проміжних тонких підшарів в з'єднанні сталь-TiNi. Після формування TiNi-покриття його піддавали поетапному повному термомеханічному циклу (ТМЦ) обробки. Термообробка (відпал в інертному середовищі) проводився в електропечі опору з мікропроцесорним регулятором температури ЕКПС V-50. Термомеханічне тренування здійснювалося методом поверхневої пластичної деформації (ППД) по двох схемах: методом обкатки циліндрових поверхонь і обтискання плоских поверхонь. Дослідження проводилися в умовах кімнатних і низьких температур. Обкатку проводили за допомогою спеціального трьох роликового пристосування, що встановлюється в супорті токарного верстата 1А616.

Металографічні дослідження проводилися на мікроскопах ІМЦ-100, МІМ-8, Neofot-21 (Carl Zeiss Jena) і растровому скануючому мікроскопі JSM-840 (JEOL).

Рентгенофазовий аналіз – на дифрактометрах TUR M62 і Дрон-3 (у $\text{Cu-K}\alpha$ випромінюванні), хімічний, – на дифракційному стилоскопі СЛ-13 і мікроаналізаторі мікроскопа JSM-840, дюрOMETричний – на приладі ПМТ-3. Товщина шару TiNi контролювалася магнітними ультразвуковими товщиномірами МТ-2007, МПТ-01.

Результати експериментів. При імпульсній лазерній обробці, на відміну від інших методів, отримання інтерметалідного TiNi-покриття на будь-яких сталях можливе і без

матриці, що пов'язує. Для забезпечення якісного з'єднання використовували адгезійні підшари чистого нікелю ($\delta=0,05$ мм).

Формований TiNi-шар зазнає трансформацію первинного складу в межах $\sim 1\%$ у зв'язку з деякою летючістю титану при наплавленні (складає 50,8-51 ваг.% Ni). Характер розподілу хімічних елементів по товщині шару показаний на рис. 2, зміст Ti і Ni на межі знижується до 20%.

В результаті обробки експериментальних даних за допомогою статистичного регресійного аналізу в середовищі SPSS Statistica 6.0 отримані математичні моделі процесу лазерного наплавлення сплаву TiNi. Проведена оптимізація товщини

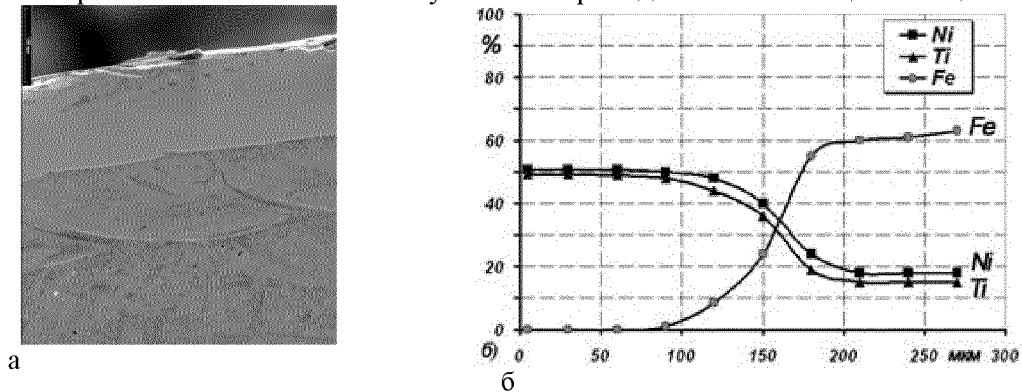


Рисунок 2 – Мікроструктура сталі 30ХГСА з TiNi-слоєм – а), $\times 500$. Характер розподілу основних елементів по товщині TiNi-слоя – б)

покриття, що наноситься, лінійної і кутової швидкості обробки, діаметру плями сфокусованого лазерного випромінювання, його щільності і тривалості.

Визначені оптимальні режими, що приводять до формування TiNi-покриття товщиною $\delta = 0,12-0,50$ мм и твердістю, що досягає 8-9 ГПа. Шари B2-сплавів TiNi мають ультра мікрокристалічну будову з розміром зерна, що змінюється по глибині від 0,2-0,7 мкм, і їх щільністю $\sim (0,356-0,589) \cdot 10^9 \text{ мм}^{-2}$ (рис.3). Основний фазовий склад – аустенітна B2-фаза, побічні фази (не більше 5%) – інтерметалідна η -фаза TiNi_3 , оксиди титана.

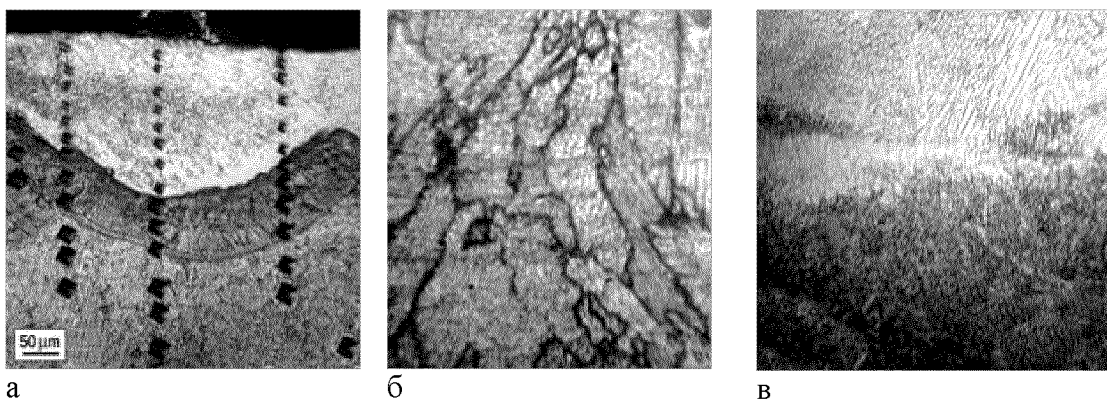


Рисунок 3 – Мікроструктура сталі 12Х18Н9Т з TiNi-шаром (а), $\times 400$, і перехідного шару (б), $\times 800$. Прикордонна зона лазерного наплавлення TiNi на сталь 30ХГСА, $\times 2420$ (в)

Для TiNi - шару характерна направлена кристалізація структури, над дрібне зерно, укрій складна травимість. Ширина перехідної зони складає $0,05 \div 0,1$ мм, структура граничного шару складається з переважно крупних зерен, витягнутих по напрямку відведення тепла (рис.3).

При послідовному циклі термомеханічного тренування (при ППД з охолодженням до криогенних температур) попередня деформація по товщині шару не перевищувала 10%, сталеві основа деформувалась в пружній області. Цілеспрямоване ППД в комбінації з температурою формує ефект оборотної пам'яті форми. При порівнянні локального обтискання шару ($\sigma=280-600$ МПа) і обкатки ($P=100\div 500$ Н) якнайкращі характеристики стабільності структури по глибині спостерігаються після трьох зворотно-поступальних проходів трьома роликками при зусиллі 100 Н і деформацією на величину $\varepsilon=8$ і 10%. Після ППД спостерігається рівномірне подрібнення структури (не більше 0,1-0,2 мкм з щільністю $\sim 0,7109 \cdot \text{мм}^{-2}$), яскраво виражена анізотропія форми. Основний фазовий склад сплаву Ti-51ваг. % Ni складає: фаза B2 – $\sim 94,5 \div 95$ %, B19' – $\sim 5 \div 5,5$ %.

Циклічну довговічність сталі з TiNi - шаром після лазерного наплавлення згідно запропонованому механізму (нехтуючи тиском шарів σ_v) можна визначити відповідно до рівняння :

$$N^p = \frac{\alpha \cdot Q}{\sigma_1 \cdot \varepsilon_{\text{pal}} \cdot (1 + \nu \cdot \mu)}, \quad (6)$$

де σ_1 і ε_{pal} - амплітуди головної напруги і пластичної деформації;

μ - коефіцієнт Пуассона;

$\nu = \sigma_2 / \sigma_1$ - відношення амплітуд головної напруги.

Підвищення циклічної довговічності обумовлене зменшенням роботи пружно-пластичної деформації. Реальним методом дії на стан структури є комбінована обробка, що включає в різних варіантах ТО і ППД.

Експериментальне підтвердження цьому було отримано вже на етапі термообробки: довговічність підвищується до початкової, а після циклу обробки з ППД сталей з TiNi-покриттями на одному і тому ж рівні амплітуди деформації ε_a при мало цикловому навантаженні і при сумісній дії з реверсивним тертям – зростає відповідно в 2 і 1,5 разу.

На етапі лазерного наплавлення висока зносостійкість TiNi - шарів зв'язана, в основному, з високою твердістю поверхні. При подальшому стабілізуючому відпалі і в сукупності відпалу з ППД стимулюється зростання релаксаційних здібностей TiNi, що обумовлює свого роду адаптацію до умов тертя. В результаті остаточного формування комплексу функціонально-механічних властивостей, інтенсивність зношування покриття в 4 рази менша, ніж сталі.

Висновки. Отримано чисельне рішення теплової задачі імпульсного лазерного наплавлення нікеліду титану на сталь, що характеризує температурні умови організації структури TiNi - покриття.

Розроблені статистичні моделі технологічних параметрів процесу лазерного наплавлення нікеліду титану, що дозволяють оптимізувати структурно-механічні властивості та забезпечують формування ультра мікрокристалевих шарів B2-сплавів TiNi.

Для отриманого матеріалу розроблений технологічний процес поверхневого модифікування з поетапною термічною обробкою і термомеханічним тренуванням шляхом поверхневої пластичної деформації з обтисканням або обкаткою, що дозволяє використовувати ефекти пам'яті форми поверхневого шару сплаву TiNi.

Список літератури

- 1 J Van Humbeeck / Materials Science and Engineering A273-275 (1999) 143-148.
- 2 R. Vaichyanathan et al. / Acta mater. Vol47 №12, pp.3353-3366, 1999.
- 3 J. Uchil et al. / Physica B 253 (1998) 83-89.
4. Бледнова Ж.М., Чаевский М.И, Будревич Д.Г., Степаненко М.А. Использование порошков никелида титана для получения поверхностных слоев, обеспечивающих функциональные свойства деталей // Новые перспективные материалы и технологии их получения: Сб. науч. тр. Междунар. конф. – Волгоград: ВГТУ, 2004. –Т.1.– С.170-171.

Л.Головко, А. Мажейка, С.Маркович

Лазерное наплавление и термомеханическая обработка композиционных материалов с памятью формы

В статье изложены положения концепции лазерного наплавления композиционных покрытий с памятью формы, исследованы особенности структурообразования и свойств материалов с поверхностно модифицированным слоем из сплава с памятью формы на основе TiNi, сформированным при лазерном действии. Разработан технологический процесс поверхностного модифицирования с поэтапной термической обработкой и термомеханической тренировкой путем поверхностной пластической деформации с обжатием или обкаткой.

L.Golovko, A. Mazheyka, S.Markovich

The laser causing and thermo mechanical treatment of composition materials with memory of form

In the articles the expounded positions of conception of the laser causing of composition coverages are with memory of form, the features of gelation and properties of materials are investigational with the superficially modified layer from an alloy with memory of form on the basis of TiNi, formed at a laser action. The technological process of the superficial retrofitting is developed with stage-by-stage heat treatment and thermo mechanical training by a superficial flowage with a preload or rolling.

Одержано 22.09.09