

Температурно-деформаційні стани сплавів з пам'яттю форми на основі заліза

А. М. Титенко, кандидат фізико-математичних наук

Л. Д. Демченко*, кандидат технічних наук

О. М. Бабій, Ю. Б. Скірта*

Інститут магнетизму НАН та МОН України, Київ

*Національний технічний університет України «КПІ», Київ

Розглянуто механічні та електричні властивості функціональних сплавів на основі Fe – Ni – Co – Ti з ефектом пам'яті форми. Аналізуються причини, які сприяють досягненню великих надпружних деформацій та високих значень реактивних напружень в сплавах цієї системи. Експериментально досліджено появу диференційної термоелектрорушійної сили в процесі мартенситного перетворення. Встановлена кореляція між температурними залежностями диференційної термоелектрорушійної сили та електроопору дослідженого сплаву.

Функціональні матеріали використовуються в різних галузях науки і техніки для вирішення широкого спектру завдань шляхом використання їх функціональних характеристик, а не конструкційних можливостей, до яких належать і матеріали з ефектом пам'яті форми (ЕПФ). При цьому нерідко поведінка конструкцій із запропонованих сплавів залежить не тільки від температури, але і від виду деформаційно-напруженого стану.

Метою даної роботи є вивчення особливостей поведінки термомеханічних і термоелектричних властивостей (таких як ЕПФ, виникнення сигналів термоелектрорушійної сили (термо.р.с.), надпружність, генерація реактивних напружень), які зумовлені мартенситними перетвореннями (МП) в сплавах на основі Fe – Ni – Co – Ti.

Матеріалом для досліджень обрано сплав Fe – 37,0 Co – 15,2 Ni – 8,0 Ti – 6,17 Cu (мас. частка, %) після термообробки (гартування від 1150 °C та відпал при 500 °C протягом 3 год), який має наступні температури МП: $M_s = 5$ °C, $M_f = 100$ °C, $A_s = 80$ °C, $A_f = 45$ °C, $T_c - M_s = 205$ °C, $\Delta T = 1/2(A_f - M_f) = 50$ °C, $T_c = 200$ °C (де M_s і M_f – температури початку і кінця прямого МП, A_s і A_f – температури початку і кінця зворотнього МП, ΔT – гистерезис МП, T_c – температура Кюрі).

Відомо, що при дотриманні ряду умов у сплавах Fe – Ni – Co – Ti можна реалізувати термопружний характер $\gamma \rightarrow \alpha$ МП [1]. Основним моментом, що визначає наявність і зворотність $\alpha \rightarrow \gamma$ МП, є утворення когерентних часток γ' -фази, однорідно розподілених в об'ємі аустенітної матриці. Необхідними умовами, що забезпечують надпружні деформації (НД), є невелика величина об'ємних змін $\Delta V_{A \rightarrow M}$ при переході $A \rightarrow M$ (A – аустеніт, M – мартенсит) при МП, наявність зсувної компоненти деформації і високої границі плинності σ_T матричної фази [2]. Високе значення σ_T сприяє збереженню когерентності часток під час руху міжфазних границь $A - M$. Ефект НД проявляється як в аустенітній, так і мартенситній фазах.

Дослідження термопружного мартенситу і надпружних деформацій було проведено при одноосному розтягу зразків сплаву Fe – 37,0 Co – 15,2 Ni – 8,0 Ti – 6,17 Cu в аустенітному стані (рис. 1 а). При досягненні деякої критичної величини напруження

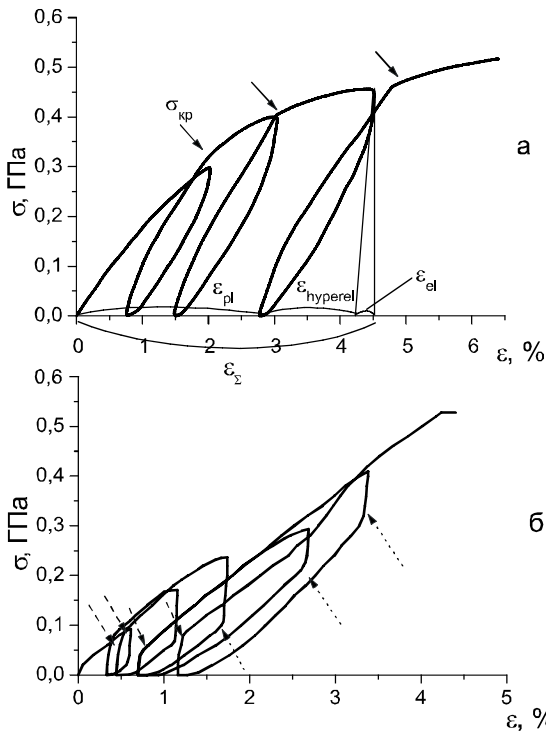


Рис. 1. Залежності напруження σ від деформації ε , отримані при випробуванні зразків при температурах $T = 523 \text{ K}$ (а) і $T = 77 \text{ K}$ (б) (стрілками вказано утворення мартенситу при напруженні).

$\sigma_{кр}$ відбувається відхилення від лінійного ходу залежності $\sigma - \varepsilon$ (напруження – деформація), що відповідає утворенню мартенситу напруження. У першому циклі навантаження утворенню мартенситу передують пластична деформація матеріалу і, як результат, мала величина НД. З кожним наступним циклом навантаження частка НД збільшується. При зовнішніх впливах у результаті зсувних деформацій відбувається утворення мартенситних кристалів, переважно орієнтованих у напрямку зусилля, яке прикладається за рахунок менш сприятливих. В процесі одновісного розтягу сплаву діаграма деформування приймає вигляд такий, як показано на рис. 1 а, при цьому сама деформація складається з наступних складових: $\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{hyp} + \varepsilon_{pl}$, де ε_{Σ} – сумарна деформація, ε_{el} – пружна деформація, ε_{hyp} – надпружна деформація, ε_{pl} – залишкова пластична деформація.

Зі збільшенням часу відпалу γ -аустеніту за умови збереження когерентності виділених частинок γ' -фази з аустенітною γ -матрицею та зі збільшенням вмісту міді, а також при навантаженні в мартенситному стані, НД сплавів Fe – Ni – Co – Ti збільшуються за рахунок переорієнтації мартенситних двійників [3]. Максимальна величина вимірної в цьому випадку надпружної деформації у феромагнітних сплавах Fe – Ni – Co – Ti складає 4,45 % (рис. 1 б).

Функціональні можливості приладів, що використовують сплави з ЕПФ, залежать не тільки від величини зворотньої деформації, але й від величини механічного напруження при відновленні форми σ_R , яке має назву *реактивного напруження*. Таке реактивне напруження σ_R для сплавів Ti – Ni і Fe – Mn – Si було знайдено в роботі [3]. Показано, що σ_R для різних сплавів може змінюватися в широких межах.

Для дослідження реактивних напружень σ_R зразків сплаву в повністю стисненому стані нами запропоновано метод використання послідовності частково стиснених станів під час відновлення форми зразка. Для цього було застосовано наступну схему вимірів (рис. 2):

а) зразки досліджуваного сплаву в аустенітному стані пружно деформували під дією постійного одновісного розтягуючого навантаження ($\sigma_1 = 0,4 \text{ ГПа}$), яке викликало пружну деформацію ε_{el} ;

б) розтягнуті зразки охолоджували до 77 K під дією того ж навантаження для отримання деформації пластичності перетворення ε_p , яка характеризує ЕПФ. Далі зразки отримували ще більшу деформацію ε_L в результаті додаткового навантаження

σ_2 . Таким чином, досягали сумарної деформації $\epsilon_{cl} + \epsilon_{tr} + \epsilon_L \approx 3\%$. Задану величину реактивного напруження $\sigma_R = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ при 77 K встановлювали додатковим навантаженням (розвантаженням) $\pm \sigma_3$, що супроводжується деформацією ϵ_M ;

в) потім зразки нагрівали до температури, яка перевищує температуру закінчення зворотного МП ($T > A_f$), при цьому відбувалася генерація реактивних напружень σ_R та відповідний запис температурних залежностей відновлюваної деформації ϵ_R .

Отримана з експерименту залежність σ_R від ϵ_R показана на рис. 3, крива 1. Екстраполюючи цю криву до нульового рівня $\epsilon_R = 0$ (повністю стиснений стан) було обчислено реактивне напруження, яке становило $\sigma_R^m \approx 1$ ГПа. Встановлено, що п'ятикратне термоцикування через інтервал МП викликає зростання реактивних напружень майже до 1,2 ГПа (рис. 3, крива 2).

Дослідження термоелектричних явищ.

Відомо, що поява сигналів термoe.p.c. можлива в однорідному матеріалі незмінного хімічного складу при зміні його кристалічної ґратки внаслідок оборотних фазових переходів. Така поведінка властива, наприклад, сплавам на основі Fe – Ni з вибуховою кінетикою утворення мартенситу або під впливом гідростатичного тиску під час фазового переходу [4, 5]. Фазовий перехід 1-го роду протікає шляхом зародження і зростання нової фази в межах вихідної і супроводжується виділенням або поглинанням прихованої теплоти |Q|.

Диференційну термoe.p.c. зразків досліджуваного сплаву вимірювали по відношенню до міді. Температуру контролювали двома термопарами мідь – константан, розташованими на кінцях зразка. В якості вимірювача напруги використовували 8-канальний модуль АЦП ICP-CONi-7018 фірми ICPDAS.

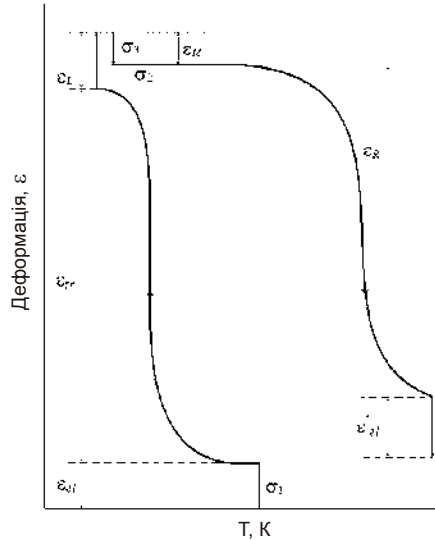


Рис. 2. Схематична крива залежності деформація (ϵ) – температура (T) для експерименту з термоцикування у частково стисненому стані.

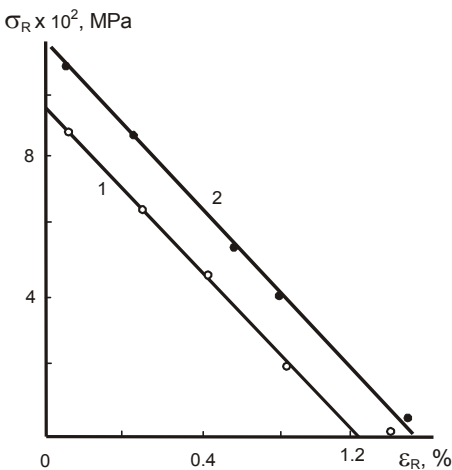


Рис. 3. Залежність реактивних напружень σ_R від ϵ_R . 1 – після одного циклу нагріву-охолодження, 2 – після п'ятикратного термоцикування.

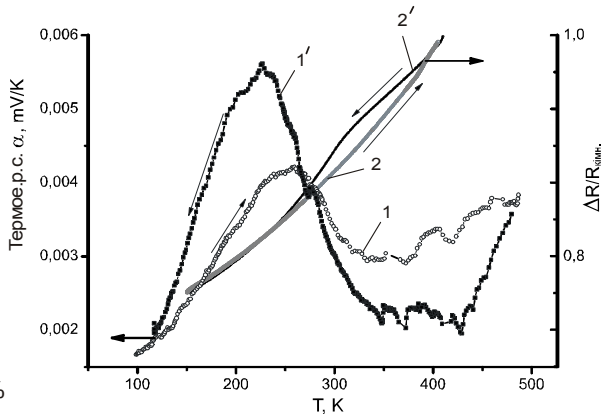


Рис. 4. Температурні залежності диференційної термoe.p.c. (1, 1') і електроопору (2, 2'). Стрілками вказано нагрів (1, 2) – охолодження (1', 2').

Крива температурної залежності електроопору відносно кімнатної ($R_{\text{кімн.}}$) температури $\Delta R/R_{\text{кімн.}}$ має характер, типовий для металевих провідників (рис. 4). При досягненні температури M відбувається зменшення електроопору ρ в результаті МП. При нагріванні відбувається зворотне перетворення.

Залежності електричних сигналів термoe.p.c. ($\alpha = f(T)$, $\alpha = U/T$, де U – напруга, T_1 і T_2 – температури на кінцях зразка) представлені на рис. 4. Максимум сигналу термoe.p.c. припадає на середину інтервалу МП, що відповідає максимальному градієнту температур в результаті максимального тепловиділення і тертя міжфазних границь А – М при МП. При прямому переході ця величина має більшу амплітуду, яка складає 0,0055 мВ/К, ніж при зворотньому – 0,0043 мВ/К.

Висновки Сплави системи Fe – Ni – Co – Ti при дотриманні певних умов термічної обробки (гартування та відпал) здатні збільшувати значення надпружної деформації, генерувати значні реактивні напруження та індукувати сигнали термо-ерс. Головним чинником, що визначає досягнення високих реактивних напружень і надпружності, є старіння сплаву в аустенітному стані, що призводить до зміцнення не лише аустеніту, але й мартенситу. Виділені під час старіння когерентні вclusions γ' -фази успадковуються мартенситом і призводять до тетрагонального викривлення ґратки мартенситу. Висока тетрагональність мартенситу сприяє збереженню когерентного зв'язку між мартенситною і аустенітною ґратками в процесі зворотнього перетворення, в результаті чого і досягаються вказані ефекти.

Література

1. Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю. Сплавы с эффектом памяти формы. – М.: Металлургия, 1990. – 224 с.
2. Гунько Л. П., Такзей Г. А., Титенко А. Н. Сверхупругость сплавов Fe – Ni – Co – Ti с термоупругим мартенситом. // ФММ. – 2001. – 91, № 6. – С. 95 – 99.
3. Лихачев В. А., Кузьмин С. Л., Каменцева З. П. Эффект памяти формы. – Ленинград: ЛГУ, 1987. – 216 с.
4. Коваль Ю. Н., Молин А. И. Возникновение электродвижущей силы в сплавах Fe – Ni при $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращениях. // ФММ. – 1980. – 50, № 2.
5. Robin M., Lormand G., Gobin P.F. Etude amplification electronique rapide de la propagation de la martensite dans un alliage Fer-Nickel. // J. de Phys. – 1977. – 11. – P. 669 – 674.

Одержано 04.03.11

А. Н. Титенко, Л. Д. Демченко, О. М. Бабий, Ю. Б. Скирта

Температурно-деформационные состояния сплавов с памятью формы на основе железа

Резюме

Рассмотрены механические и электрические свойства функциональных сплавов на основе Fe – Ni – Co – Ti с эффектом памяти формы. Анализируются причины, которые способствуют увеличению сверхупругой деформации и высоких значений реактивных напряжений в сплавах этой системы. Экспериментально исследовано появление дифференциальной термо-эдс в процессе мартенситного превращения. Установлена корреляция между температурными зависимостями дифференциальной термо-эдс и электросопротивления исследуемого сплава.

A. N. Titenko, L. D. Demchenko, O. M. Babiy, Y. B. Skirta

Temperature-strain states of iron-based shape memory alloys as a reaction on complicated external thermomechanical effects

Summary

The mechanical and electrical properties of functional Fe – Ni – Co – Ti-based alloys with shape memory effect have been examined. The reasons that contribute to an increase in superelastic deformation and an achievement of high values of reactive stresses in this system alloys have been analysed. The differential thermal emf behaviour in the martensite transformation process was studied. The correlation between the temperature dependence of the differential thermal emf and electrical resistance in the investigated alloy has been established.

УДК 669.162:536.413.2

Теплове розширення залізовуглецевих сплавів

В. В. Остапович*, Н. О. Бондаревська
Ю. А. Гарасим, кандидат технічних наук

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ
*НТЦ «Булат НВР», Київ

Досліджено вплив вмісту вуглецю (0,87 – 2,65 %) в залізовуглецевих сплавах на зміну коефіцієнта теплового розширення в інтервалі температур 100 – 950 °С. Встановлено, що мінімальні значення коефіцієнта теплового розширення спостерігаються в сплавах з вмістом вуглецю більше 1,5 % в околі температури магнітного переходу цементиту (210 °С). В інтервалі температур 350 – 650 °С значення коефіцієнта теплового розширення сплавів з різним вмістом вуглецю залишаються практично незмінними.

Виконані в останній час дослідження фізичних і механічних властивостей залізовуглецевих сплавів з високим (більше 1,0 %) вмістом вуглецю засвідчили перспективність використання їх як конструкційних матеріалів з особливим комплексом механічних і фізичних властивостей. Так, наприклад, згідно висновків, зроблених авторами [1], звичайний доменний чавун після спеціальної циклічної термічної обробки може бути гідним конкурентом прецизійним інварним Fe – Ni сплавам. Разом з тим, незважаючи на давнє і широке застосування залізовуглецевих сплавів в практиці, на сьогодні бракує систематичних і достовірних даних про характеристики їх теплового розширення.

Досліджували особливості теплового розширення заевтектоїдних сталей з вмістом вуглецю 0,87, 1,0, 1,78 % та доевтектичних чавунів з вмістом вуглецю 2,04, 2,20, 2,55, 2,65 % С. Виготовлення сплавів здійснювалось згідно з технологіями, розробленими в НТЦ «Булат НВР» [2]. Мікроструктуру сплавів виявляли шляхом хімічного травлення 3 %-ним спиртовим розчином азотної кислоти. Хімічний склад досліджуваних сплавів та їх типова структура у вихідному стані приведені в табл. 1