

УДК 669.788

ВПЛИВ ДОМІШОК ВТІЛЕННЯ (H_2, C) НА ПРОЦЕСИ МАГНІТНОГО І АТОМНОГО ВПОРЯДКУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІНВАРНОГО СПЛАВУ Н36

Наговська І.В., Федоров В.В.

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів,

Прокоп'юк В.А., Бачинський Ю.Г.

Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка, м. Тернопіль

Досліджено вплив водню на параметри магнітного та атомного впорядкування у легуваному вуглецем (до 0,3 мас. %) сплаві Н36. Встановлено, що легування вуглецем (0,26 мас. %) призводить до зростання температури точки Кюрі T_C на 30 К, яка за наводнювання зменшується на 8...10 К. Показано, що розчинений водень збільшує ступінь дальнього атомного порядку структури FeNi на 25 % за незмінності температури точки Курнакова T_K . При цьому присутність атомів водню інтенсифікує дифузійну рухливість атомів вуглецю і за його вмісту 0,17 мас. % вони впорядковуються по міжвузлях кристалічної ґратки. За цієї концентрації встановлена максимальна температура (500 К) існування мінімального значення ТКЛР $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ у сплаві Н36. Показано, що поєднання легування вуглецем та термообробки у водні на атомне впорядкування дозволяє покращити міцнісні властивості сплаву Н36 – при 293 К σ_s зростає на 40 %.

Ключові слова: водень, вуглець, інвар, магнітне і атомне впорядкування, електроопір.

Постановка проблеми і мета роботи. Застосування водню як технологічного середовища у процесі обробки функціональних матеріалів на основі d–перехідних металів ґрунтується на закономірностях його впливу на існуючі в них магнітні і поліморфні перетворення та процеси атомного впорядкування [1–3]. Одночасно ці процеси проявляються у сплавах системи Fe–Ni, які завдяки цьому володіють низкою цінних фізичних властивостей, що дозволяє вибрати їх як модельний об'єкт досліджень. Такий вибір дає можливість вивчити вплив водню на атомне впорядкування і на вузлах, і у міжвузлях кристалічної ґратки, а також встановити взаємозв'язок між атомним і магнітним впорядкуванням. Особливий інтерес дослідників викликають залізонікелеві сплави інварної області концентрацій (30...45 % Ni), які характеризуються теплофізичною аномалією – низьким значенням температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) в інтервалі 73...373 К [4]. Ця аномалія пояснюється тим, що в області існування феромагнетизму теплове стискування кристалічної ґратки під час охолодження компенсується її розширенням внаслідок виникнення у сплаві спонтанної магнітострикції. Іншою важливою характеристикою таких сплавів є «інварне зміцнення» – різке зростання межі міцності після фазового переходу парамагнетик – феромагнетик. Обидві ці аномалії суттєво залежать від умов термічної обробки і вмісту домішок втілення, зокрема вуглецю. В першому випадку необхідно враховувати можливість утворення впорядкованих атомних структур, які впливають на температурний інтервал існування феромагнетизму, в другому – домішки втілення викликають зміну магнітних характеристик [1]. Отже, комбінуючи відповідну термообробку у водні з процентним вмістом вуглецю, можна покращити експлуатаційні характеристики інварних сплавів.

Відомо [5], що обов'язковою умовою існування феромагнетизму в металах є наявність обмінної електронної взаємодії, позитивний знак якої досягається лише в певних інтервалах температур і значень параметра ґратки. Змінюючи їх величину шляхом легування або термообробки, можна впливати на спонтанну намагніченість сплавів і розширити температурні межі застосування інвару як матеріалу з мінімальним ТКЛР. За критерій оцінки зміни магнітних властивостей вибрали температуру точки Кюрі T_C , в якій ефективна обмінна енергія рівна тепловій енергії, що надається зразкам при нагріванні. Кінетику атомного впорядкування оцінювали за зміною температури Курнакова T_K та ступеня дальнього атомного порядку. Об'єктом дослідження вибрали інварний сплав Н36 (Fe – осн., Ni – 35,7, Mn – 0,50, Si – 0,26, C – 0,01, S – 0,005, P – 0,001).

Мета роботи – визначити закономірності та фізичний механізм впливу водню і вуглецю на параметри магнітного і атомного впорядкування, ТКЛР та «інварне зміцнення» у сплаві НЗ6, враховуючи взаємовплив втілених атомів водню і вуглецю.

Методики проведення експериментів. Досліджуваний сплав НЗ6 виплавляли у високочастотній індукційній печі і насичували вуглецем (до 0,3 мас.%), добавляючи у тигель графіт з наступною розливкою металу. Перед вимірюваннями зразки після 30 хв. відпалу при 1173 К загартовували у воді.

Процеси магнітного та атомного впорядкування вивчали методом електропровідності на змінному струмі з використанням автоматичного компенсатора [6], який дозволяє отримувати неперервні залежності зміни електроопору від температури в широкому діапазоні частот вимірювального струму (до 200 кГц). Вибір цього методу зумовлений тим, що електроопір зразків на змінному струмі 50 Гц може служити індикатором формування впорядкованих атомних структур [7], а для дослідження параметрів феромагнітного перетворення вивчали аномалію (максимум) електроопору, яка з'являється в околі температури точки Кюрі за вимірюванні на змінному струмі звукового діапазону частот (5...25 кГц) [8].

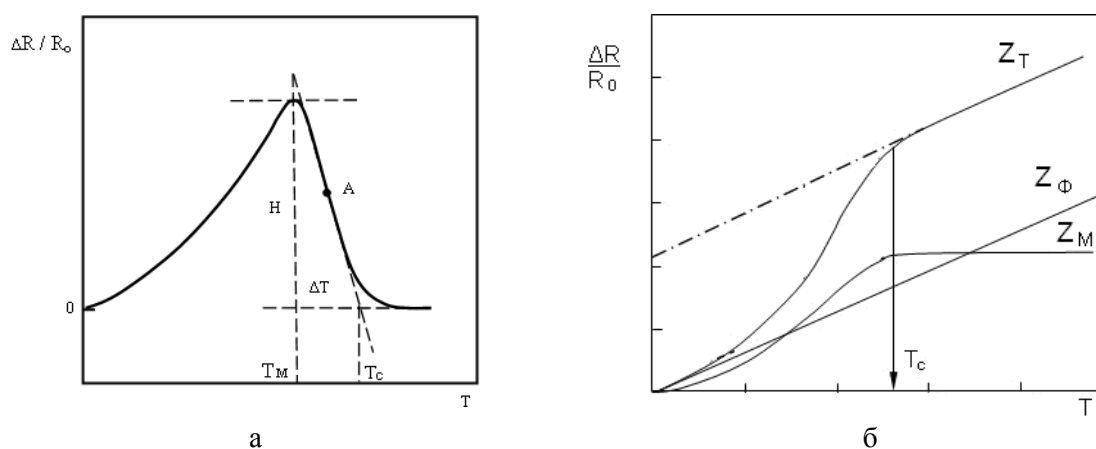


Рис. 1 – Структурно-чутливі параметри аномалії електроопору феромагнетиків змінному струму частотою 15 кГц [8] (а) і розділення повного електроопору феромагнетиків Z_T на фононну Z_ϕ і магнітну Z_M складові [9] (б)

Для інтерпретації отриманих результатів використовували наступні параметри аномалії (рис. 1а):

- висота максимуму електроопору H , яка є різницею його значень у початковій та кінцевій точках феромагнітного перетворення і пропорційна поверхневій магнітній проникливості матеріалу;
- температура феромагнітного перетворення T_C , яку визначали як точку перетину дотичної, проведеної на ділянці найбільш різкого спаду електроопору, і екстрапольованої з парамагнітної області залежності $\Delta R / R_0$;
- різниця температур ΔT максимуму аномалії T_M і точки Кюрі T_C , що характеризує структурну однорідність досліджуваного матеріалу (збіг цих температур відповідав би монокристалу).

Для дослідження впливу водню на дифузійну рухливість атомів вуглецю у сплаві НЗ6 проводили розділення температурних залежностей повного електроопору ρ_T на фононну ρ_ϕ та магнітну складові ρ_M за наступною методикою [9]. Згідно правила Маттіссена, повний електроопір можна записати у вигляді суми:

$$\rho_m = \rho_0 + \rho_\phi + \rho_m, \quad (1)$$

тут ρ_0 – залишковий опір, зумовлений розсіянням електронів провідності на домішках, який можна знайти екстраполяцією температурної залежності ρ_T до $T = 0$ К.

Фононна частка електроопору ρ_{ϕ} зумовлена тепловим рухом атомів і з великою точністю за температур менших точки Кюрі T_C описується інтерполяційною формулою Грюнайзена:

$$\rho_{\phi} = A(T/\Theta)^5 \cdot \int_0^{\Theta/T} y^5 (e^y - 1)^{-1} (1 - e^{-y})^{-1} dy, \quad (2)$$

де Θ – температура Дебая, A – постійна для даного металу.

Оскільки за температур вище точки Кюрі магнітна складова електроопору не залежить від температури, а формула (2) скорочується до $AT/4\Theta$, то повний високотемпературний електроопір феромагнетиків запишеться у вигляді:

$$\rho_m = \rho_0 + \rho_m + AT/4\Theta, \quad (3)$$

де ρ_0 і ρ_m постійні.

Це дозволяє за кутовим коефіцієнтом $d\rho/dT$ при високих температурах з рівняння прямої (3) розрахувати $A/4\Theta$, а за низькотемпературним електроопором визначити ρ_0 . Таким чином, графічно віднявши суму фононного і залишкового опорів як функцію температури від повного електроопору, можна отримати температурну залежність зміни його магнітної складової. На рис. 1б показаний типовий приклад розділення температурної залежності повного електроопору феромагнетика на фононну Z_{ϕ} і магнітну Z_M складові ($Z = \Delta R / R_0$).

Вимірювання електроопору проводили в інтервалі температур 293...573 К у вакуумі (10^3 Па) і водні (0,1 МПа). Зміну параметра кристалічної ґратки після науглечування сплаву НЗ6 визначали на рентгенівській установці ДРОН 3М (FeK $_{\alpha}$ – випромінювання), а ТКЛР вимірювали високотемпературним дилатометром. Вплив домішок втілення на міцнісні властивості досліджували на установці ИМАШ (20–75), згідно методики, описаної в [10].

Вплив водню та вуглецю на параметри магнітного впорядкування сплаву НЗ6. Отримані температурні залежності відносної зміни електроопору зразків з різним вмістом вуглецю характеризуються гістерезисом під час нагріву і охолодження (рис. 2а). Визначені на їх основі температури Кюрі наведені в табл.1 і однозначно вказують на ріст температури феромагнітного перетворення зі збільшенням вмісту вуглецю у сплаві, що є наслідком зростання ефективної обмінної взаємодії. З ростом концентрації вуглецю ефект від впливу водню, який полягає у зменшенні температури Кюрі [1], посилюється, що можна пояснити антиферомагнітною взаємодією розчинених атомів водню з атомами компонентів сплаву.

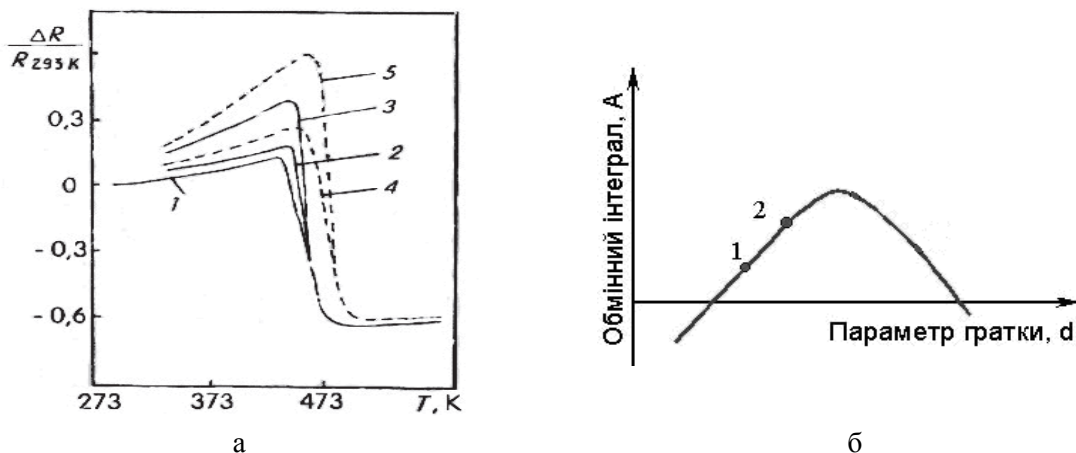


Рис. 2 – Температурна зміна електроопору сплаву НЗ6 за нагріву (1) та охолодження у вакуумі (2, 4) та водні (3, 5) (1...3 вміст вуглецю 0,01 мас. %; 4, 5 – 0,17 мас. %) (а) і вплив параметра ґратки на величину ефективної обмінної взаємодії у феромагнетиках [5] (б)

Зростання температури точки Кюрі за науглечування пояснено тим [5], що обов'язковою умовою існування феромагнетизму в металах є наявність позитивного знаку обмінної електронної взаємодії, який досягається лише в певному інтервалі значень параметра ґратки (рис. 2б). Таким чином, змінюючи його величину шляхом легування, можна впливати на магнітні властивості сплавів. Наприклад, за науглечування очевидно має місце перехід з точки 1 в точку 2 (рис. 2б, ліва гілка кривої A(d) відповідає d-перехідним металам і їх сплавам), що підтверджено експериментально отриманим зростанням параметра ґратки сплаву Н36 (рис. 3а, крива 1).

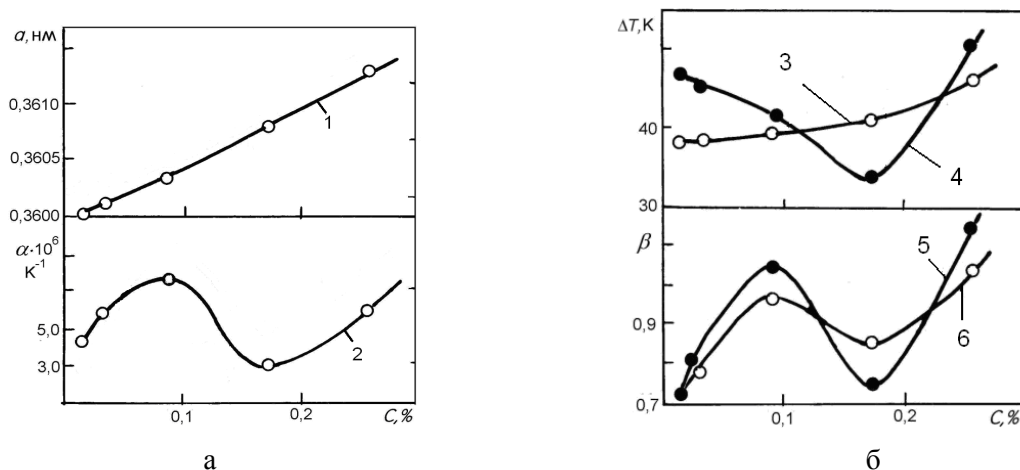


Рис. 3 – Вплив легування вуглецем на параметр ґратки **a** (1) і ТКЛР α (2) (а) та параметр структурної однорідності ΔT (3,4) та коефіцієнта впливу термічної обробки β (5, 6) сплаву Н36 у вакуумі (3, 5) і водні (4, 6) (б)

На основі проведених досліджень можна припустити, що науглечування сплаву Н36 повинно розширити температурну область існування низьких значень ТКЛР прямо пропорційно вмісту вуглецю. Однак безпосередні вимірювання (табл. 2) не підтвердили це припущення. Встановлено, що максимальне зростання верхньої температурної границі, де зберігається значення ТКЛР $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, має місце за концентрації вуглецю 0,17 мас.%. При цій же концентрації спостерігається мінімальне значення ТКЛР легованого вуглецем інвару визначене за температури 500 К (рис 3а, крива 2).

Таблиця 1 – Вплив вуглецю на точку Кюрі сплаву Н36

Вміст вуглецю, мас. %	Температура Кюрі, К			
	Нагрів		Охолодження	
	вакуум	водень	вакуум	водень
0,01	475	471	475	474
0,03	478	475	479	478
0,09	486	484	496	493
0,17	491	492	503	498
0,26	504	502	520	512

Таблиця 2 – Вплив вуглецю на температурну межу існування мінімального ТКЛР

Вміст вуглецю, мас. %	0,01	0,03	0,09	0,17	0,26
$T_{г.}, K$	470	455	420	500	445

Збільшення у водні висоти максимуму електроопору H (рис. 2а, криві 3, 5) зумовлене, на нашу думку, прискоренням релаксації гартувальних та магніострикційних напружень, а також зменшенням поверхневого магнетизму під час хемосорбції атомів водню. При дослідженні концентраційної залежності зміни параметра ΔT у водні встановлено появу мінімуму при вмісті вуглецю 0,17 мас.%. (рис. 3б, крива 4), що вказує на покращення структурної однорідності сплаву Н36, очевидно, внаслідок впорядкування атомів вуглецю в γ -твердому розчині інвару і пришвидшення цього процесу розчиненням воднем.

Аналогічний результат отримали при вивченні взаємозв'язку між дифузійною рухливістю атомів вуглецю і ТКЛР. Для цього провели ізотермічні відпали загартованих зразків легованого інвару при 393 К протягом 20 год. у вакуумі та водні і дослідили зміну коефіцієнту впливу термічної обробки $\beta = (\alpha_T - \alpha_3) / \alpha_3$, де α_T і α_3 – ТКЛР відпалених і загартованих зразків. Як бачимо (рис. 3б, крива 5), ТКЛР відпалених у вакуумі зразків зростає пропорційно вмісту втіленого вуглецю до його концентрації 0,09 мас.%, далі на залежності спостерігається мінімум. У присутності водню дифузійні процеси у сплаві Н36 стають інтенсивніші, що підтверджується ростом β при 0,9 та 0,26 мас.% С (крива 6). Однак при 0,17 мас.% С ТКЛР, порівняно з вакуумом, зменшується. Отриманий результат також можна пояснити, виходячи з того, що за вказаної концентрації вуглецю відбувається впорядкування його атомів по міжвузлях кристалічної ґратки і цей процес пришвидшується воднем. Крім того, провели розділення температурних залежностей електроопору на вуглечених зразків сплаву Н36 на магнітну і фононну складові (рис. 1б). З отриманих результатів витікає (рис. 4а), що зі збільшенням вмісту вуглецю магнітна складова електроопору (крива 2) монотонно зростає пропорційно росту параметра ґратки за навулечування (крива 1), а фононна (крива 3) проходить через мінімум, якісно змінюючись, як і ТКЛР (крива 4). Такий характер отриманих залежностей однозначно вказує на те, що причину появи оптимальної концентрації вуглецю (0,17 мас.%), яка покращує експлуатаційні властивості інвару, слід шукати не у зміні електронної структури сплаву Н36 під час легування, а в процесах, які відбуваються на атомному рівні і зумовлені дифузією та впорядкуванням атомів вуглецю по міжвузлях кристалічної ґратки.

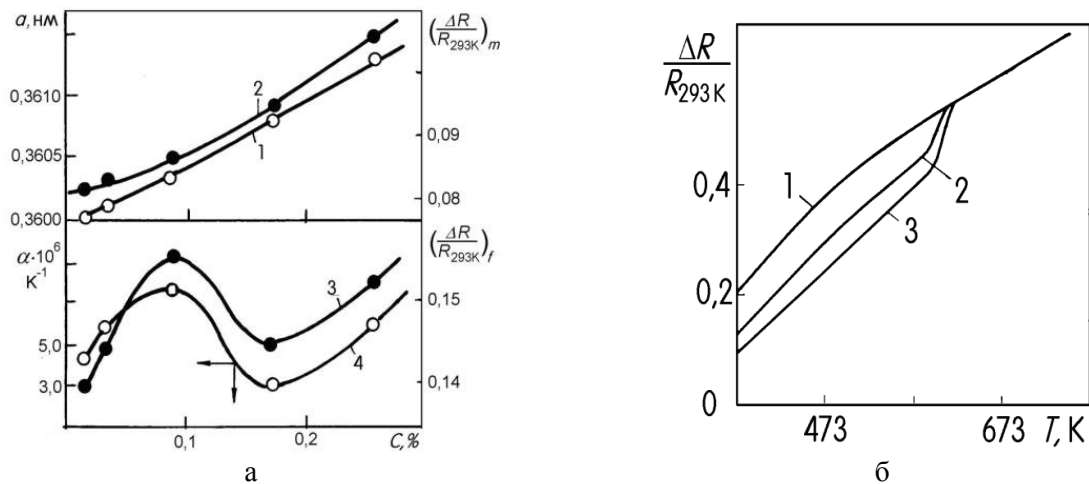


Рис. 4 – Вплив вуглецю на параметр ґратки a (1), ТКЛР α (4), магнітну (2) і фононну (3) складові електроопору (а) і температурні залежності електроопору сплаву Н36 у вакуумі (1), водні (2) та легованого вуглецем 0,26 мас.% (3) (б)

Вплив водню та вуглецю на параметри атомного впорядкування сплаву Н36.

Оскільки існує тісний зв'язок між процесами атомного впорядкування на вузлах та в міжвузлях кристалічної ґратки, вивчали вплив домішок втілення на кінетику формування впорядкованих атомних надструктур у сплаві Н36. В інварній області концентрацій системи Fe-Ni однозначно встановлено утворення впорядкованої надструктури FeNi з критичною температурою Курнакова T_k біля 600 К та мікрообластей ближнього атомного порядку типу Fe₃Ni [11].

Теоретичне вивчення впливу домішок втілення на процес їх формування показало [12], що в їх присутності температура Курнакова повинна зростати і описується формулою

$$T_{kc} = T_k + \frac{1 + 3\tau_0}{K} \cdot \frac{\omega_{ABC}^2}{W} \cdot C_C, \quad (4)$$

де параметр τ_0 залежить тільки від складу сплаву, ω_{ABC} – енергія зв’язку втілених атомів з атомами на вузлах, W – енергія впорядкування, C_c – концентрація домішки, K – постійна Больцмана.

Таким чином, якщо відомі експериментальні дані про залежність T_k від вмісту домішки, то, виходячи з формули (4), можна розрахувати енергії впорядкування і міжатомної взаємодії в сплаві:

$$W = -\frac{k \cdot T_k}{C_A(1-C_A)(1+\tau_0)}, \quad \omega_{ABC}^2 = \frac{k(T_{kc} - T_k) \cdot |W|}{C_c(1+3\tau_0)}. \quad (5)$$

Вплив наводнювання на кінетику формування надструктури FeNi вивчали, порівнюючи температурні залежності електроопору після термообробки у вакуумі ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па) та водні ($P_{H_2} = 10^5$ Па). Встановлено (рис. 4б), що відпал зразків сплаву НЗ6 у вакуумі при 573 К протягом 30 год. не змінює монотонного характеру залежності $R(T)$ (крива 1). Перші ознаки утворення впорядкованої структури у зразках вихідного сплаву НЗ6 (різке зменшення електроопору) спостерігаються після 6 год. відпалу у водні (крива 2). При чому зі збільшенням часу відпалу у водні до 30 год. температура Курнакова залишається незмінною, що можна пояснити його малою концентрацією Н/Ме = $(5 \dots 8) \cdot 10^{-4}$, а також тим, що водень взаємодіє з компонентами сплаву (Fe, Ni) антиферомагнітно.

За аналогічної обробки зразків сплаву НЗ6, легованих 0,26 мас.% вуглецю також утворюється надструктура FeNi (крива 3), але її температура Курнакова T_k на 12...15 К вища. При цьому має місце підвищення ступеня дальнього атомного порядку η , на що вказує більше зниження електроопору в результаті впорядкування, величина якого пропорційна η^2 [13]. Розрахунки за формулами (5) показали, що енергія атомного впорядкування у сплаві НЗ6 складає $W = -3,35 \cdot 10^{-20}$ Дж, а результуюча енергія міжатомної взаємодії для вуглецю $\omega_{FeNiC} = -4,45 \cdot 10^{-20}$ Дж.

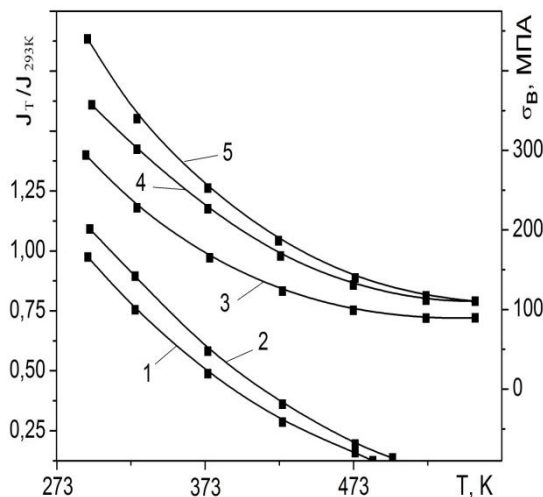


Рис. 5 – Температурні залежності намагніченості (1, 2) і межі міцності (3–5) сплаву НЗ6 у вихідному стані (1, 3) та легованого 0,17 мас. % С до (2, 4) та після (5) водневої обробки на атомне впорядкування

Крім того, у феромагнітних сплавах, що впорядковуються, існує зв’язок між енергією атомного впорядкування, спонтанною намагніченістю і температурами Кюрі та Курнакова [12]. Причому взаємозв’язок між температурою Кюрі T_C і ступенем дальнього атомного порядку η виражається співвідношенням:

$$T_C = 2(3R + \alpha \cdot \eta^2) / K_B, \quad (6)$$

де $\alpha = 2J_{AB} - J_{AA} - J_{BB}$, $R = a^2J_{AA} + b^2J_{BB} + 2abJ_{AB}$ – параметри, що характеризують обмінну взаємодію в бінарному сплаві АВ, а і b – атомні концентрації компонентів, K_B – стала Больцмана. Знаючи зміну T_C під час впорядкування, можна оцінити зміну ступеня

дальнього атомного порядку η . Вимірювання температурних залежностей електроопору дозволило встановити, що T_C після водневої термообробки на впорядкування (відпал при 600 К, 30 год. з наступною дегазацією) підвищується на 20 ± 3 К. Враховуючи, що обмінні інтеграли $J_{Fe-Fe} = -9$ МеВ, $J_{Ni-Ni} = 52$ МеВ, $J_{Fe-Ni} = 39$ МеВ [12], на основі співвідношення (6) розрахували, що, не зважаючи на незмінність температури Курнакова, під впливом розчиненого водню концентрацією $H/Me = (5...8) \cdot 10^{-4}$ величина η у сплаві НЗ6 зростає майже на 25 %.

Вплив водню та вуглецю на «інварне зміцнення» сплаву НЗ6. Однією з найважливіших фізико-механічних характеристик інварних сплавів є «інварне зміцнення» – різке зростання межі міцності після охолодження нижче температури точки Кюрі. Під час дослідження впливу домішок втілення на «інварне зміцнення» сплаву НЗ6 (Fe – осн., Ni – 35,7, Mn – 0,50, Si – 0,26, C – 0,01, S – 0,005, P – 0,001) встановлено (рис. 1), що межа міцності σ_b після навуглечування зростає (криві 3, 4) пропорційно зміні намагніченості (криві 1, 2). Фізичний механізм цього процесу полягає у наступному. З охолодженням нижче точки Кюрі T_C в інварних сплавах формується неоднорідна магнітна структура, в якій присутні флуктуації спінової густини, викликані утворенням сегрегацій атомів заліза (1...3 нм). При цьому їх результуючий магнітний момент не збігається з напрямком намагніченості в зразку. В області існування феромагнетизму об'єм ГЦК-гратки інвару збільшується внаслідок появи спонтанної магнітострикції. Це призводить до виникнення значних структурних напружень навколо сегрегацій атомів заліза і зростання σ_b сплаву. Крім того, через магнітну неоднорідність інвару феромагнітне перетворення в ньому відбувається не в точці Кюрі, а розтягнуте за температурою. Тому з віддаленням від T_C кількість спотворених структурних мікрообластей у феромагнітній матриці зростатиме пропорційно росту намагніченості при охолодженні, що і викликає ефект «інварного зміцнення». Пластичність зразків при цьому майже не змінюється ($\delta=20$ %).

Легування вуглецем, збільшуючи параметр гратки інвару, посилює ефективну обмінну взаємодію у сплаві і інтенсифікує зростання σ_b . Оскільки склад компонентів у сплаві НЗ6 не відповідає стехіометричному для надструктури FeNi, то за її формування об'ємна частка збагачених залізом мікрообластей зростатиме, посилюючи магнітну неоднорідність інвару. Експериментальна перевірка цього припущення показала (рис. 1, криві 3 і 5), що порівняно з вихідним сплавом НЗ6 впорядкований легований сплав за температури 293 К додатково зміцнюється на 40 %.

Висновки. Легування вуглецем (0,26 мас.%) сплаву НЗ6 призводить до зростання температури точки Кюрі T_C порівняно з вихідним сплавом на 30 ± 3 К. За наявності розчиненого водню ефект зменшується на 8...10 К, що пояснюється антиферомагнітною взаємодією атомів водню з атомами Fe і Ni.

Показано, що T_C після водневої термообробки на атомне впорядкування сплаву НЗ6 підвищується на 20 ± 3 К. Це дозволило розрахувати, що за концентрації $H/Me = (5...8) \cdot 10^{-4}$ ступінь дальнього атомного порядку структури FeNi зростає майже на 25 % за незмінності температури точки Курнакова T_K . На відміну від водню, легування вуглецем (0,26 мас.%) збільшує T_K на 12...15 К, що дозволило встановити енергію міжатомної взаємодії атомів C з компонентами сплаву НЗ6 – $\omega_{FeNiC} = -4,45 \cdot 10^{-20}$ Дж.

Розчинений водень пришвидшує дифузійну рухливість атомів вуглецю і за його вмісту 0,17 мас.% вони впорядковуються по міжвузлях кристалічної гратки. Саме за цієї концентрації вуглецю встановлена максимальна температура (500 К) існування мінімального значення ТКЛР $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у сплаві НЗ6.

Поєднання легування вуглецем та термообробки у водні, яка стимулює процеси формування атомних впорядкованих структур, дозволяє покращити міцнісні властивості інварних сплавів («інварне зміцнення») – при 293 К σ_b сплаву НЗ6 зростає на 40 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Похмурський В. І. Вплив водню на дифузійні процеси в металах / В. І. Похмурський, В. В. Федоров. – Львів : ФМІ НАНУ, 1998. – 207 с.
2. Федоров В. В. Застосування водню в термічній обробці металів і сплавів / В. В. Федоров // Фізико–хімічна механіка матеріалів : зб. наукових праць під. ред. В. В. Панасюка. – Львів : НАН України, Фіз.-мех. ін.-т ім. Г. В. Карпенка, 2010. – С. 372-392.
3. Федоров В. В. Вплив водню на фазовий склад та фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів / В. В. Федоров // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 2. – С. 67-76.
5. Захаров А. И. Прецезионные сплавы с упругими, тепловыми и электрическими аномалиями / А. И. Захаров, Е. Х. Захаров, Л. Л. Жуков // Металлургия: стали, сплавы, процессы. – М. : Металлургия, 1982. – С. 136-144.
6. Вонсовский С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М. : Наука, 1971. – 1024 с.
7. Приборы и устройства для измерения, контроля и автоматизации производственных процессов. – К. : Наук. думка, 1976. – 58 с.
8. Федоров В. В. Влияние водорода на процессы атомного упорядочения в сплавах на основе переходных металлов / В. В. Федоров, П. Н. Антонец, Ю. Д. Никифоров. – Львов, 1988. – 53 с.
9. Применение метода электропроводности для исследования термостабильности систем «металл–покрытие» / В. И. Похмурский, В. В. Федоров, О. Р. Соколовский и др. // Физ.-хим. механика материалов – 1986. – № 2. – С. 73-75.
10. Федоров В. В. Влияние водорода на магнитную и фононную составляющие относительного изменения электросопротивления никеля и железа / В. В. Федоров, В. М. Сидоренко // Физ.-хим. механика материалов. – 1978. – № 2. – С. 118-120.
11. Максимович Г. Г. Микромеханические исследования свойств металлов и сплавов / Г. Г. Максимович. – К. : Наук. думка, 1974. – 240 с.
12. Алиев С. С. Низкотемпературные фазовые превращения в железоникелевых сплавах при облучении электронами / С. С. Алиев, П. Л. Грузин, А. З. Меньшиков и др. // Металлофизика. – 1985. – № 5. – С. 80-86.
13. Смирнов А. А. Теория сплавов внедрения / А. А. Смирнов. – М. : Наука, 1979. – 365 с.
14. Смирнов А. А. Теория электросопротивления сплавов / А. А. Смирнов. – К. : Изд-во АН УССР, 1960. – 48 с.
15. Влияние магнитного упорядочения на свойства аустенитных сплавов / В. В. Сагарадзе, Н. Д. Земцова, Е. И. Старченко и др. // Физика металлов и металловед. – 1983. – № 1. – С. 113-124.

Наговская И.В., Федоров В.В., Прокопюк В.А., Бачинский Ю.Г. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ВНЕДРЕНИЯ (H₂C) НА ПРОЦЕССЫ МАГНИТНОГО И АТОМНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНВАРНОГО СПЛАВА НЗ6

Исследовано влияние водорода на параметры магнитного и атомного упорядочения в легированном углеродом (до 0,3 мас. %) сплаве НЗ6. Установлено, что легирование углеродом (0,26 мас.%) приводит к увеличению температуры точки Кюри T_C на 30 К, которая при наводороживании уменьшается на 8...10 К. Показано, что растворенный водород увеличивает степень дальнего атомного порядка структуры FeNi на 25 % при неизменности температуры точки Курнакова T_K. При этом присутствие атомов водорода интенсифицирует диффузионную подвижность атомов углерода и при его содержании 0,17 мас. % они упорядочиваются по междуузлиях кристаллической решетки. При этой концентрации установлена максимальная температура (500 К) существования минимального значения ТКЛР $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в сплаве НЗ6. Показано, что совмещение легирования углеродом и термообработки в водороде на атомное упорядочение позволяет улучшить прочностные свойства сплава НЗ6 при 293 К σ_0 на 40 %.

Ключевые слова: водород, углерод, инвар, магнитное и атомное упорядочение, электросопротивление.

Nagovska I.V., Fedorov V.V., Prokopiuk V.A., Bachynskiy Yu.H. EFFECT OF IMPURITIES EMBODIMENT (H₂, C) ON THE PROCESSES OF MAGNETIC AND ATOMIC ORDERING AND PERFORMANCE INVAR N36 ALLOY

The influence of hydrogen on the magnetic parameters and atomic ordering in alloy doped with carbon N36 (0.3 wt. %) was studied. It was established that doping with carbon (0.26 wt. %) leads to an increase in Curie temperature T_C by 30 K, which is reduced by hydrogenation to 8...10 K. It is shown that dissolved hydrogen increases the long-range atomic order structure of FeNi by 25 % under immutability of Kurnakov point temperature T_K . Presence of hydrogen atoms intensifies diffusion mobility of carbon atoms and under its content 0.17 wt. % they are arranged in the interstices of the crystal lattice. Under this concentration maximum temperature (500 K) was established for the existence of minimum TCLE $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ in the N36 alloy. It is shown that the combination of carbon doping and heat treatment in hydrogen for atomic ordering allows to improve the strength properties of the alloy N36) – at 293 K σ_B increases by 40 %.

Keywords: hydrogen, carbon, invar, magnetic and atomic ordering, electrical resistance.

© Наговська І.В., Федоров В.В., Прокоп'юк В.А., Бачинський Ю.Г.

Статтю прийнято
до редакції 22.09.14