

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

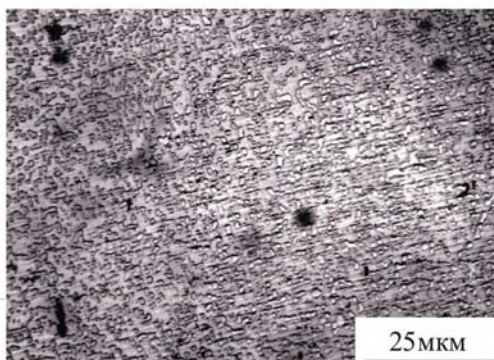
Структура і фізико-механічні властивості

Таблиця 1

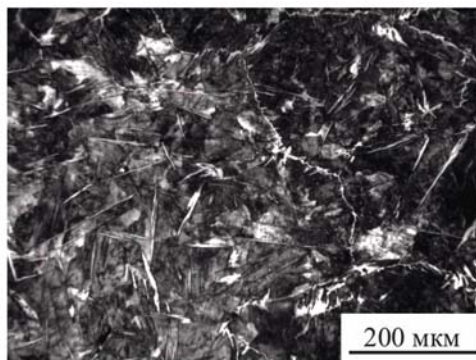
Хімічний склад та вихідний структурний стан сплавів

Сплав	Хімічний склад, % (мас. частка)									Вихідний структурний стан
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Al	S	P	
1	0,87	0,23	0,18	<0,15	0,18	-	-	<0,03	<0,03	Зернистий перліт
2	1,00	сл.	0,07	0,10	0,11	-	0,05	0,01	0,02	Перліт
3	1,78	0,11	0,10	0,09	0,07	0,10	0,25	0,01	0,01	Перліт + цементит
4	2,04	0,10	0,17	0,08	0,01	0,10	-	0,10	0,09	Перліт + ледебурит + цементит
5	2,20	0,10	0,15	0,07	0,01	0,10	0,12	0,01	0,09	Те саме
6	2,55	0,12	0,17	0,01	0,01	0,20	0,07	0,01	0,09	- " -
7	2,65	0,13	0,11	0,10	0,05	-	0,09	0,01	0,09	- " -

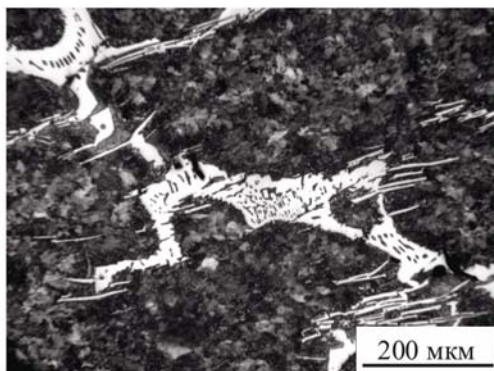
і показані на рис. 1. Дилатометричні дослідження сплавів виконували, використовуючи розроблений та вдосконалений в ІМФ НАНУ дилатометр, який дозволяє безпосередньо в процесі нагріву визначати відносно видовження зразка та коефіцієнт теплового розширення (КТР) [3]. Швидкість нагріву зразків в дилатометрі 10 – 20 К/хв. Чутливість приладу – $5 \cdot 10^{-5}$ см.



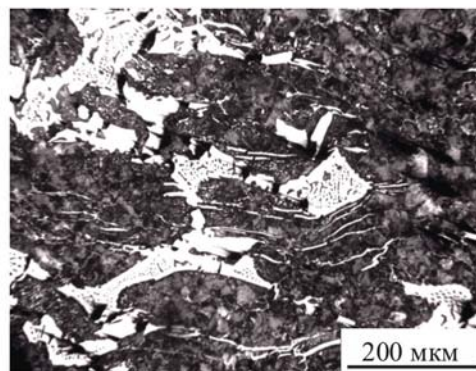
а



б



в



г

Рис. 1. Мікроструктури залізвуглецевих сплавів. а, б, в, г – вміст вуглецю 1,0, 1,78, 2,0 і 2,65 % відповідно.

На рис. 2 як приклад показано зміну довжини та КТР в процесі нагріву сплавів з 1,0 і 2,65 % С від 100 до 950 °С. Умовно в даному інтервалі можна виділити чотири області температур, в яких при нагріві сплавів спостерігаються певні особливості в поведінці КТР. В низькотемпературній області (100 – 350 °С) зміна лінійних розмірів зразків пов'язана з реалізацією магнітного перетворення цементитної складової сплавів [4]. Перехід феромагнітного цементиту в парамагнітний супроводжується характерним перегином на дилатометричній кривій $\Delta l/l = f(t)$ в околі точки Кюрі цементиту ($T_{\Theta} = 210$ °С), а також різкою зміною напрямку ходу залежностей КТР при зростанні температури. Підвищення температури від T_{Θ} до 350 °С зумовлює зростання КТР до рівня, практично однакового для всіх досліджуваних сплавів незалежно від вмісту в них вуглецю та їх структурного стану (рис. 3). Не зазнає значних змін значення КТР сплавів при подальшому нагріві до 650 °С. В наступній температурній області (650 – 750 °С) реалізується перліто-аустенітне перетворення, яке характеризується відчутним зменшенням довжини дилатометричних зразків сплавів. Внаслідок зменшення в сплавах об'єму перлітної складової величина дилатометричного ефекту $\Delta(\alpha \rightarrow \gamma)$ фазового переходу із зростанням вмісту вуглецю суттєво (майже в 5 разів) знижується від 0,001 для сталі з 0,87 % С до 0,00021 для сплаву з 2,65 % С. Зауважимо, що температури початку і закінчення $\alpha \rightarrow \gamma$ переходу досліджуваних сплавів практично співпадають. Внаслідок утворення в сплавах аустенітної фази КТР сплавів в момент завершення $\alpha \rightarrow \gamma$ переходу зростає приблизно в 2 рази порівняно з температурами, близькими до початку фазового перетворення. Причому, зі збільшенням вмісту вуглецю в сплавах значення КТР при 750 °С помітно зменшується.

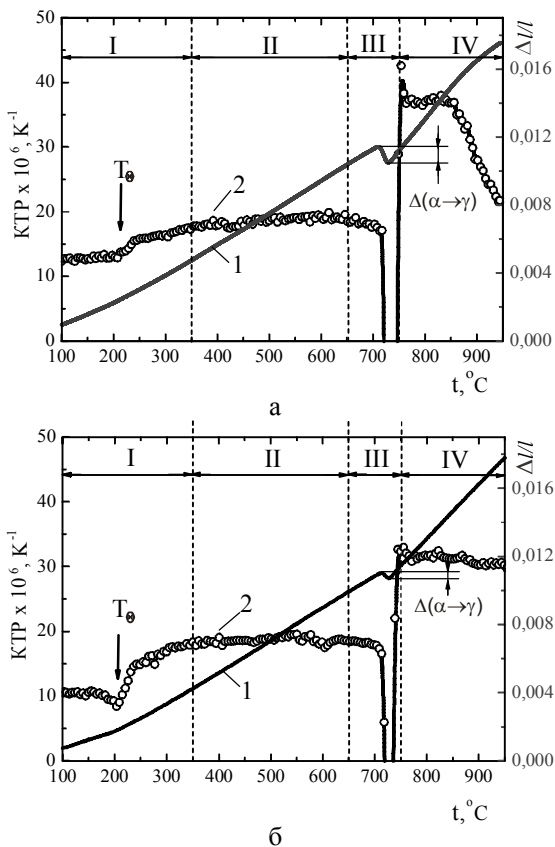


Рис. 2. Лінійне розширення $\Delta l/l$ (1) та коефіцієнт теплового розширення (2) сплавів з вмістом вуглецю 1,0 (а) і 2,65 % (б).

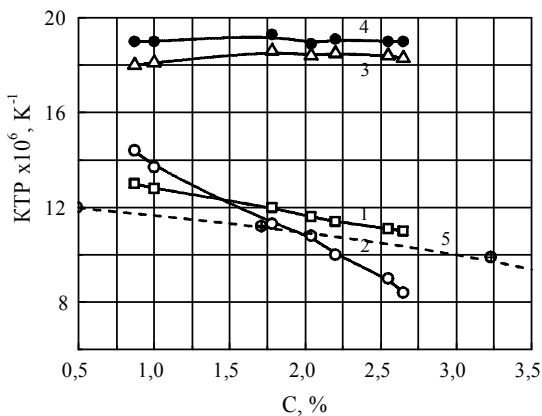


Рис. 3. Коефіцієнти теплового розширення сплавів при різних температурах нагріву. 1, 2, 3, 4 – температури нагріву відповідно 100, 200 (T_{Θ}), 350, 500 °С, 5 – дані [6].

Характер зміни КТР при нагріві вище 750 °С в температурній області подальшого утворення аустеніту визначається в значній мірі структурним станом сплавів, сформованим до моменту закінчення перліто-аустенітного перетворення. Особливо це стосується заевтектоїдних сталей з вмістом вуглецю, близьким до евтектоїдного. Якщо для сталі з 0,87 % С нагрів вище 750 °С відразу викликає різке зменшення КТР, то для сталі з 1,0 % С зниження КТР відбувається, лише починаючи з 850 °С після часткової стабілізації його значень на рівні, досягнутому при 750 °С (табл. 2). Зниження значень КТР в даних випадках, ймовірно, пов'язане з подальшим утворенням нових порцій аустеніту і розчиненням залишкового цементиту, яке розпочинається при досягненні температур на лінії ES діаграми стану Fe – С і проходить із зменшенням об'єму. У випадку нагріву в даному інтервалі температур сплавів з вищим вмістом вуглецю (1,78 – 2,65 %) подібних дилатометричних ефектів, пов'язаних з падінням значень КТР, не спостерігається (рис. 2), що може свідчити про відсутність розриву між температурами завершення перліто-аустенітного перетворення і початком подальшого інтенсивного утворення аустеніту. Відсутність помітних змін КТР при нагріві в температурній області існування аустенітної фази спостерігали також автори [5], досліджуючи особливості теплового розширення сірих чавунів з різним вмістом кремнію (1,67 – 2,64 %). В нашому випадку помітна тільки тенденція до зниження КТР із зростанням концентрації вуглецю в сплавах (табл. 2).

Таблиця 2
Коефіцієнти теплового розширення сплавів ($\times 10^6, K^{-1}$) за різних температур нагріву

Сплав	С, %	Температура, °С							
		100	T_0	350	500	650	750	850	950
1	0,87	13,0	14,4	18,0	19,0	18,8	36,2	24,9	22,3
2	1,00	12,8	13,7	18,1	19,0	18,6	36,0	36,8	19,5
3	1,78	12,0	11,3	18,6	19,3	19,5	35,6	36,6	34,0
4	2,04	11,6	10,8	18,4	18,9	19,6	35,0	36,5	38,0
5	2,20	11,4	10,0	18,5	19,1	19,4	31,9	30,0	32,7
6	2,55	11,1	9,0	18,4	19,0	18,3	33,0	31,5	29,9
7	2,65	11,0	8,4	18,3	19,0	17,7	32,9	31,5	29,7

Таким чином, одержані результати свідчать, що найнижчі значення КТР характерні для сплавів з вмістом вуглецю більше 1,5 %, нагрітих в область температур, близьких до точки Кюрі цементиту. КТР заевтектоїдних сталей з 0,87 і 1,0 % вуглецю в таких умовах нагріву залишаються більшими, ніж при 100 °С. Така поведінка КТР пов'язана з особливостями впливу кількості феромагнітної цементитної фази, зокрема, на величину мимовільної магнітострикції, зумовленої падінням її намагніченості при підвищенні температури. Тому при нагріві до теплове видовження зразків сплавів частково компенсується їх скороченням внаслідок магнітострикції цементиту, що викликає поступове зменшення КТР при підході до даної температури. Крім того, потрібно враховувати, що коефіцієнти термічного розширення цементиту ($\alpha = (6,0 - 6,5) \times 10^{-6} K^{-1}$) та графіту ($\alpha = (1,4 - 1,7) \times 10^{-6} K^{-1}$) менші, ніж фериту ($\alpha = (12 - 16) \times 10^{-6} K^{-1}$). Через це збільшення кількості цементиту із зростанням вмісту вуглецю викликає зниження значень КТР сплавів в області температур 100 – 210 °С (рис. 3, табл. 2). Так, наприклад, при підвищенні в сплавах вмісту вуглецю від 0,87 до 2,65 % їх КТР при 100 °С зменшується від $14 \times 10^{-6} K^{-1}$ до $10 \times 10^{-6} K^{-1}$. Подібним чином зменшується КТР сплавів при температурі. Тому при недостатній кількості цементитної

фази, як це має місце в заевтектоїдних сталях, величина КТР визначається, в основному, об'ємними властивостями інших фазових складових, що містяться в сплавах.

Визначальний вплив кількості цементиту практично зникає після нагріву вище T_0 , про що свідчить близькість значень КТР сплавів з різним вмістом вуглецю, нагрітих до 350 і 500 °С (рис. 3).

Вплив вмісту вуглецю (0,19 – 4,31 %) на зміну КТР чистих залізобуглецевих сплавів при різних температурах нагріву (20 – 700 °С) вивчали автори [6]. Структурний стан зразків сплавів для дилатометричних досліджень (ферито-цементитна суміш) з стехіометричним вмістом вуглецю формувалася шляхом довготривалого (10 годин) відпалу відливок при 500 °С. Зміну КТР при температурах (20 – 100 °С) існування феромагнітного цементиту відображено на рис. 3 пунктирною лінією (крива 5). При порівнянні цих даних з одержаними нами (крива 1, рис. 3) видно, що значення КТР сплавів після додаткового відпалу дещо менші, ніж в досліджених нами сплавах, хоча темп зниження КТР з ростом вмісту вуглецю в сплавах практично однаковий в обох випадках. Ймовірно, що цьому сприяє зниження рівня залишкових напружень в процесі відпалу та часткова сфероїдизація частинок цементиту. Разом з тим, КТР сплавів при температурі магнітного перетворення цементиту для сплавів з вмістом вуглецю, більшим ~ 2,0 %, продовжують залишатись найнижчими.

Таким чином, найбільш значні зміни КТР при нагріві залізобуглецевих сплавів відбуваються в температурних областях, де мають місце: магнітне перетворення цементиту (100 – 300 °С), перліто-аустенітне перетворення (700 – 730 °С) і подальше утворення аустенітної фази (вище 770 °С). Зростання вмісту вуглецю в залізобуглецевих сплавах сприяє зменшенню КТР, переважно, в інтервалі температур 100 – 210 °С. Зменшення КТР при нагріві вище 100 °С властиве сплавам з вмістом вуглецю більше 1,5 %. Найменші значення КТР спостерігаються в області температур магнітного перетворення цементиту. Нагрів залізобуглецевих сплавів з 0,87 – 1,0 % С вище температури закінчення перліто-аустенітного перетворення викликає значне зменшення КТР, що не властиво для сплавів з більш високим вмістом вуглецю.

Одержані результати мають певне практичне значення, так як дозволяють оптимізувати хімічний склад сплавів по вуглецю, до яких ставляться вимоги високої твердості і зносостійкості в поєднанні з низьким коефіцієнтом термічного розширення.

Література

1. Афанасьев В.К., Кузнецова Е.В., Сочнев А.В. Линейное расширение чугунов. // Известия вузов. Черн. металлургия. – 2005. – № 8. – С. 36 – 40.
2. Остапович В.В. Изделия из булата. // Рынок металла. – 1999. – № 6. – С. 29 – 31.
3. Лариков Л.Н., Черепин В.Т., Гуревич М.Е. Автоматизация контроля и исследование металлов. – Киев: Техника, 1971. – 335 с.
4. Ткаченко Ф.К., Майструк А.Я. О термическом расширении цементита // Известия вузов. Черн. металлургия. – 1965. – № 6. – С. 118 – 122.
5. Sunnerkrantz P.A., Fredriksson H. The effect of the structure and the heating and cooling rate on the thermal expansion of cast iron. // Phys. Met. Cast. Iron. Proc. 3 Int. Symp., Stockholm, Aug. 29 – 31, 1984. – P. 365 – 374.
6. Kagava A., Okamoto T., Matsumoto H. Young's modulus and thermal expansion of pure iron-cementite alloy castings // Acta metallurgica. – 1987. – 35, 4. – P. 797.

Одержано 12.08.10

В. В. Остапович, Н. А. Бондаревская, Ю. А. Гарасим
Тепловое расширение железоуглеродистых сплавов

Резюме

Исследовано влияние содержания углерода (0,87 – 2,65 %) в железоуглеродистых сплавах на изменение коэффициента теплового расширения в интервале температур 100 – 950 °С. Установлено, что минимальные значения коэффициента теплового расширения наблюдаются в сплавах с содержанием углерода более 1,5 % в области температуры магнитного перехода цементита (210 °С). В интервале температур 350 – 650 °С значения коэффициента теплового расширения сплавов с разным содержанием углерода остаются практически неизменными.

V. V. Ostapovich, N. A. Bondarevskaya, Yu. A. Garasym

The thermal expansion of iron – carbon alloys

Summary

The effect of carbon content (0,87– 2,65 %) in iron-carbon alloys to the variation of the modified coefficient of thermal expansion in the temperature range of 100 – 950 °C. It is established that the minimum values of coefficient of thermal expansion are observed at the alloys with carbon content more than 1,5 % at the magnetic transition temperature of cementite (210 °C). In the temperature range of 350 – 650 °C coefficient of thermal expansion values of the alloys with different carbon contents remain almost unchanged.

УДК 669.017:621.774:621.746

Особливості формування структури трубних заготовок, виготовлених зі зливка та безперервнолитого металу

Г. В. Левченко, доктор технічних наук
Т. В. Грицай, кандидат технічних наук
О. Є. Нефедьєва

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпропетровськ

Розглянуті особливості формування структури трубних заготовок, виготовлених зі зливка й безперервнолитого металу. Показано, що трубна заготовка з безперервнолитого металу характеризується більш дисперсною будовою дендритної та зеренної структури в порівнянні із заготовкою зі зливка, і ця залежність зберігається після наступної деформаційної та термічної обробки.

Розливка сталі в зливки, особливо у великі, характеризується значною хімічною неоднорідністю литого металу, яка мало змінюється при наступній гарячій пластичній деформації [1]. Також широко освоюється технологія виробництва прокату