

16. Okazaki, Y. Development of high performance metal catalyst support for cleaning automobile exhaust gases [Text] / Y. Okazaki, M. Fukaya, S. Konya // Nippon Steel Technical Report. – 1996. – №70 – P. 23 – 30.
17. Jatkar, A. D. New catalyst support structure for automotive catalytic converters [Text] / A. D. Jatkar // SAE Special Publications. – 1997. – №1260 – P. 149 – 155.
18. Egbert, S. J. Lox Automotive exhaust treatment [Text] / S. J. Lox Egbert // Handbook of Heterogeneous Catalysis. – 2008. – № 1 – С. 2274 – 2345.
19. Zamaro, J. M. ZSM5 growth on a FeCrAl steel support. Coating characteristics upon the catalytic behavior in the NO<sub>x</sub> SCR [Text] // J. M. Zamaro, M. A. Ulla, E. E. Miro // Microporous and Mesoporous Materials. – 2008. – №115. – P. 113 – 122.
20. Luthera, M. Forced periodic temperature cycling of chemical reactions in microstructure devices [Text] // M. Luthera, J. J. Brandnera, L. Kiwi-Minsker // Chemical Engineering Science. – 2008. – № 63. – P. 4955 – 4961.
21. Окисление СО на оксиде меди, нанесенном на металлическую фольгу [Текст] / А. Н. Субботин, Б. С. Гудков, М. П. Воробьева // Катализ в промышленности. – 2005. – №5. – С. 48 – 51.
22. Giornelli, T. Preparation and characterization of VO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> catalytic coatings on stainless steel plates for structured catalytic reactors [Text] / T. Giornelli, A. Lofberg, E. Bordes-Richard // Applied Catalysis A: General. – 2006. – №305 – P. 197 – 203.
23. Kołodziej, A. Structured catalyst carrier for selective oxidation of hydrocarbons: modelling and testing [Text] / A. Kołodziej, W. Krajewski, J. Łojewska // Catalysis Today. – 2004. – Vol. 91-92. – P. 59 – 65.
24. Lofberg, A. Catalytic coatings for structured supports and reactors: VO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> catalyst coated on stainless steel in the oxidative dehydrogenation of propane [Text] / A. Lofberg, T. Giornelli, S. Paul, E. Bordes-Richard // Applied Catalysis A: General. – 2011. – № 391. – P. 43 – 51.
25. Meille, V. Review on methods to deposit catalysts on structured surfaces [Text] / Valerie Meille // Applied Catalysis A: General. – 2006. – №315 – P. 1 – 17.
26. Kizling, M. B. A review of the use of plasma techniques in catalyst preparation and catalytic reactions [Text] / M. B. Kizling, S. G. Järås // Applied Catalysis A: General. – 1996. – № 147. – P. 1 – 21.
27. Liu, C.-J. Catalyst preparation using plasma technologies [Text] / C.-J. Liu, G. Vissokov, B. W.-L. Jang // Catalysis Today. – 2002. – № 72. – P. 173 – 184.
28. Dudognon, J. Grazing incidence X-ray diffraction spectra analysis of expanded austenite for implanted stainless steel [Text] / J. Dudognon, M. Vayer, A. Pineau, R. Erre // Surface & Coating Technology. – 2008. – Vol. 202, № 20 – P. 5048 – 5054.
29. Dudognon, J. Mo and Ag ion implantation in austenitic, ferritic and duplex stainless steels: A comparative study [Text] / J. Dudognon, M. Vayer, A. Pineau, R. Erre // Surface & Coating Technology – 2008. – Vol. 203 – P. 180 – 185.
30. Dudognon, J. Modelling of grazing incidence X-ray diffraction spectra from Mo-implanted stainless steel. Comparison with experimental data [Text] / J. Dudognon, M. Vayer, A. Pineau, R. Erre // Surface & Coating Technology – 2006. – Vol. 200 – P. 5058 – 5066.
31. Гончаров, В. В. Синтез и теплофизические свойства образцов из стали 12Х18Н10Т после ионной имплантации алюминия [Текст] / В. В. Гончаров, В. А. Зажигалов // Modern science: researches, ideas, results, technologies. – 2011. – №2(7) – С. 178 – 182.
32. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками : ГОСТ 21318-75. – [Чинний від 1975-12-02]. – М. : Гос. комитет стандартов Совета министров СССР, 1975. – 24 с.

Поступила в редакцию 21.11.13

М. М. Бережний, д-р техн. наук  
В. А. Чубенко, канд. техн. наук  
А. А. Хіноцька  
С. О. Мацішин

ДВНЗ «Криворізький  
національний університет»  
м. Кривий Ріг, Україна  
e-mail: [sergej.macyshin@inbox.ru](mailto:sergej.macyshin@inbox.ru)

**Ключові слова:** дослідження, розширення, нагрівання, сплав, залізо, вуглець, температура плавлення, питомий об'єм

### Введення

Впровадження науково-технічних досягнень у виробництво є визначальним чинником розвитку продуктивних сил, невід'ємного підвищення ефективності виробництва. Цей процес безпосередньо

## ТЕПЛОВА ДЕФОРМАЦІЯ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ДІАГРАМУ СТАНУ Fe – C

УДК 621.771

**Анотація.** Виконано узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень теплового розширення сплавів заліза з вуглецем при нагріванні до температури плавлення. Визначено температурні залежності питомого об'єму і густини залізвуглецевих сплавів. Виявлені залежності між питомим об'ємом і параметром кристалічної решітки. виправлені і доповнені температурні залежності питомого об'єму і густини сталі та параметр кристалічної решітки заліза.

© М. М. Бережний, В. А. Чубенко, А. А. Хіноцька, С. О. Мацішин, 2013

впливає передусім на формування й підтримування високого рівня техніко-технологічної бази виробництва, забезпечуючи неухильне зростання продуктивності суспільної праці [1 – 3].

### Постановка проблеми

Сучасний стан діаграми залізо-вуглець значно відрізняється від того, яким його уявляли в середині XIX ст. На сьогоднішні дні завдяки цій діаграмі ми маємо можливість визначати склад та структуру сплавів при різних температурах; температури початку та кінця кристалізації; користуючись правилом відрізків можемо визначити кількість фаз у відсотках та концентрацію фаз для конкретно взятої температури [1 – 3]. Сьогодні розроблені сучасні методи дослідження структури залізо-вуглецевих сплавів та оцінки їх властивостей [4].

### Формулювання цілей статті

Основною метою статті є дослідження зміни питомого об'єму і густини залізобуглецевих сплавів, оскільки це є проблема актуальна тому, що це дозволить впливати на процеси деформації при нагріванні металів з метою поліпшення їх якості.

### Експериментальні дані та їх обробка

Тепловою деформацією твердого тіла називаємо його розширення при нагріванні. Залежності величин лінійного та об'ємного розширення при нагріванні сталевих тіл від температури відомі [5 – 7]

$$l_t = l_0 (1 + 117 \cdot 10^{-7} t + 4,7 \cdot 10^{-9} t^2),$$

де  $l_t$  – довжина тіла при температурі  $t^\circ\text{C}$ ;  $l_0$  – довжина тіла при температурі  $t = 0^\circ\text{C}$ .

Коефіцієнт лінійного розширення

$$\alpha = \frac{l_t - l_0}{t \cdot l_0},$$

Для сталевих виробів цей коефіцієнт

$$\alpha_t = (117 + 0,047t) \cdot 10^{-7},$$

Відносна деформація при нагріванні змінюється пропорційно квадрату температури

$$\varepsilon = \frac{l_t - l_0}{l_0} = (117 + 0,047t) \cdot 10^{-7} t = \alpha_t t.$$

Об'ємне розширення сталюого тіла при нагріванні дорівнює [4 – 6]:

$$V_t = V_0 (1 + \beta t),$$

де  $V_t$  – об'єм тіла при температурі  $t^\circ\text{C}$ ;  $V_0$  – об'єм тіла при температурі  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення тіла.

Для ізотермічного тіла

$$\beta_t = \alpha (3\alpha_t t + \alpha_t t^2),$$

Зокрема для сталі:

$$\beta_t = (351 + 0,141t) \cdot 10^{-7}.$$

Згідно з рівнянням (3) та (7) при температурі плавлення сталі (заліза) 1535°C на макрорівні лінійний коефіцієнт розширення та відносної деформації відповідно дорівнюють  $189,146 \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup> та 2,9 %; об'ємні коефіцієнти розширення та відносної деформації відповідно дорівнюють  $567,435 \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup> та 8,7 % (рис. 1).

На мікрорівні збільшення температури від 0°C до 1400°C аустеніту приводить до прямолінійного збільшення параметра кристалічної решітки з  $3,56 \cdot 10^{-10}$  м до  $3,69 \cdot 10^{-10}$  м [8].

При цьому коефіцієнт лінійного розширення

$$\alpha_t = \frac{(3,69 - 3,56) \cdot 10^{-10}}{1400 \cdot 3,56 \cdot 10^{-10}} = 26,1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{град}$$

Прирівнявши параметр аустеніту до ребра багатогранника, наприклад, ікосаедра, визначимо діаметри еквівалентних куль – зерен сталі.

Вихідний діаметр

$$d_g = \sqrt{2,76 \cdot (3,56 \cdot 10^{-10})^2} = 5,91 \cdot 10^{-10} \text{ м,}$$

$$d_g = \sqrt[3]{4,16 \cdot (3,56 \cdot 10^{-10})^3} = 5,73 \cdot 10^{-10} \text{ м,}$$

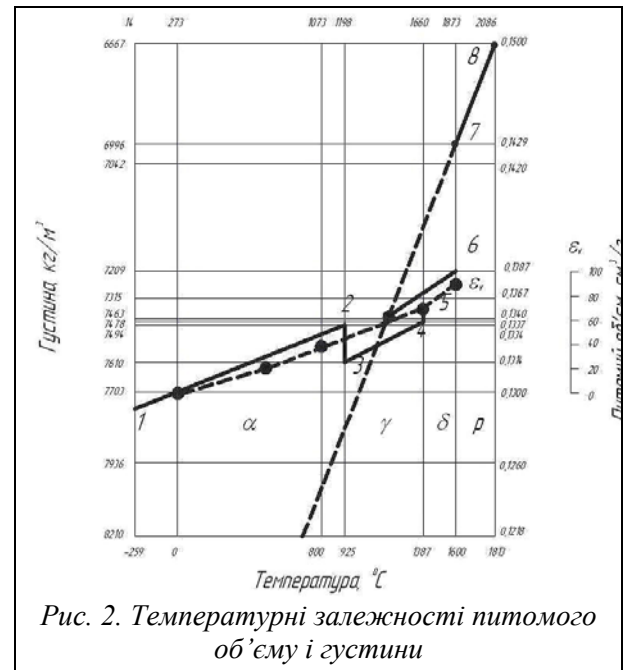
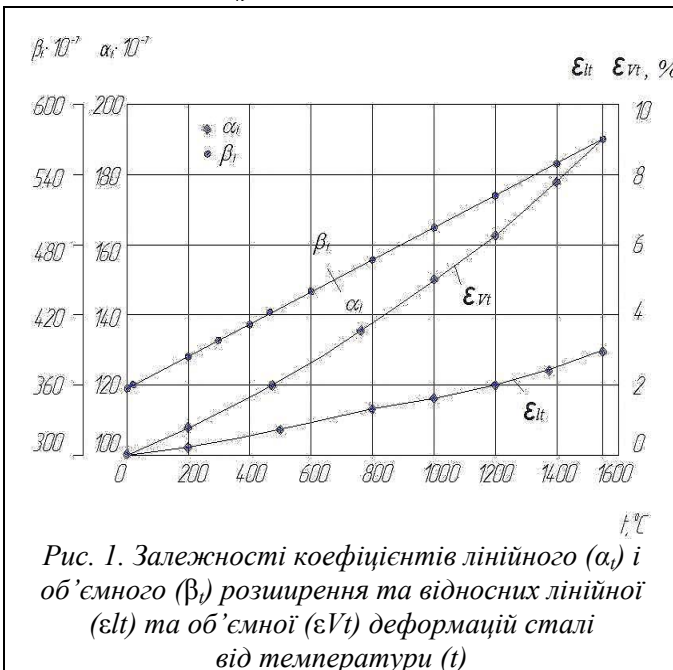
Середній  $d_g = 5,82 \cdot 10^{-10}$  м.

Кінцевий діаметр

$$d_k = \sqrt{2,76 \cdot (3,69 \cdot 10^{-10})^2} = 6,13 \cdot 10^{-10} \text{ м,}$$

$$d_k = \sqrt[3]{4,16 \cdot (3,69 \cdot 10^{-10})^3} = 5,94 \cdot 10^{-10} \text{ м,}$$

Середній  $d_k = 6,035 \cdot 10^{-10}$  м.



Коефіцієнт об'ємного розширення  $\beta_t$  та відносної об'ємної деформації відповідно

$$\beta_t = \frac{0,5236 \cdot (6,035 \cdot 10^{-10})^3 - 0,5236 \cdot 5,82 \cdot (10^{-10})^3}{0,5236 \cdot (5,82 \cdot 10^{-10})^3 \cdot 1400} = 7,94 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1},$$

$$\epsilon_{Vt} = \frac{0,5236 \cdot (6,035 \cdot 10^{-10})^3 - 0,5236 \cdot (5,82 \cdot 10^{-10})^3}{0,5236 \cdot (5,82 \cdot 10^{-10})^3} = 3,694 \text{ \%}$$

Виправлені і доповнені кривою  $\varepsilon_v$  з рис. 1 температурні залежності питомого об'єму і густини сталі [9, 10] (рис. 2) та параметра кристалічної решітки заліза (рис. 3) виявились близькими між собою. Це визначено з рівнянь питомого об'єму від температури [8 – 10].

$$V_t^{\alpha, \delta-Fe} = 6,5 \cdot 10^{-6} \cdot t + 0,125;$$

$$V_t^{\gamma-Fe} = 5,4 \cdot 10^{-6} \cdot t + 0,1255;$$

і параметр кристалічної решітки

$$\alpha_t^{\alpha, \delta-Fe} = 46,13 \cdot 10^{-6} \cdot t + 2,86;$$

$$\alpha_t^{\gamma-Fe} = 76,923t + 3,57;$$

Визначено залежність питомого об'єму  $V_t$  від параметра кристалічної решітки  $a_t$ , рис. 4.

$$V_t^{\alpha, \delta-Fe} = 0,141 \cdot a_t^{\alpha, \delta-Fe} - 0,278;$$

$$V_t^{\gamma-Fe} = 0,07 \cdot a_t^{\gamma-Fe} + 0,125;$$

На рис. 4 мінімальні та максимальні значення параметра кристалічної решітки відповідно для  $\alpha$  і  $\gamma$  – заліза дорівнюють (рис. 3)  $\alpha_{\alpha-Fe}^{\min} = 2,86 \text{ \AA}$ ,  $a_{\alpha-Fe}^{\max} = 2,91 \text{ \AA}$ ,  $a_{\gamma-Fe}^{\min} = 3,64 \text{ \AA}$ ,  $a_{\gamma-Fe}^{\max} = 3,677 \text{ \AA}$ .

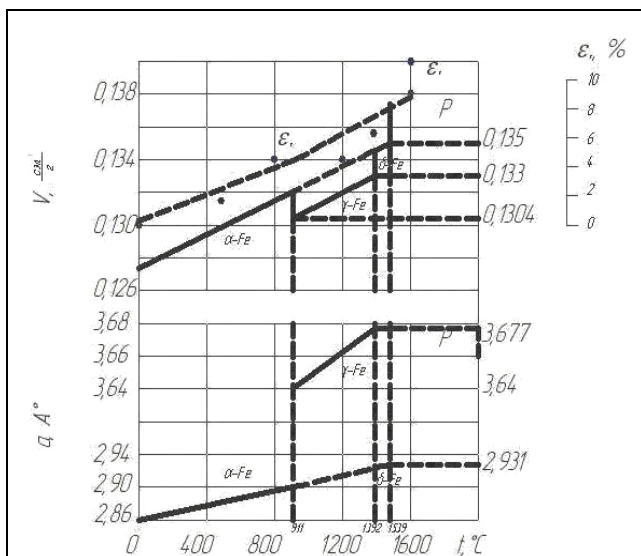


Рис. 3. Залежності питомого об'єму ( $V$ ) та параметра кристалічної решітки модифікацій заліза ( $\alpha$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -Fe) від температури; P – рідина

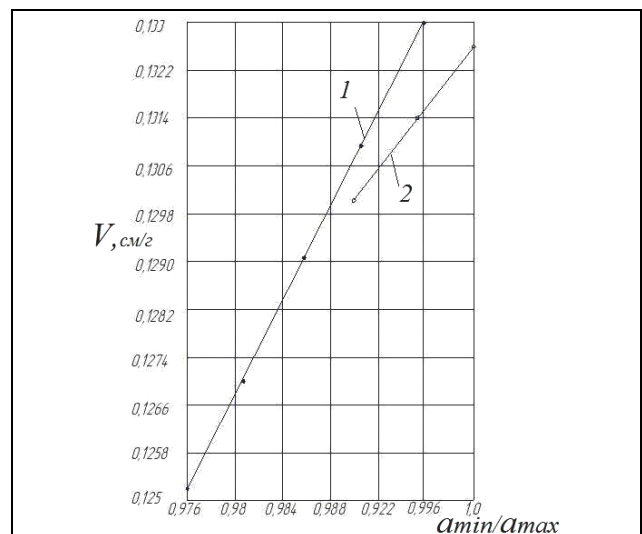


Рис. 4. Залежності питомого об'єму заліза від параметрів кристалічної решітки для різних модифікацій: 1 –  $\alpha$ ,  $\delta$  – Fe; 2 –  $\gamma$  – Fe;

$$V_{\gamma-Fe} = 0,07 \cdot a_{\gamma-Fe} - 0,125;$$

$$V_{\alpha, \delta-Fe} = 0,141 \cdot a_{\alpha, \delta-Fe} - 0,278$$

На розширення сплавів «залізо – вуглець» впливає не тільки їх температура, але також і вміст вуглецю [8]. Враховуючи незалежність дії температури та вмісту вуглецю, можна об'єднати ці впливи і отримати рівняння за даними А. А. Гуляєва [8] та інших [11]

$$a_t^{\gamma-Fe} = 0,356 + 2,35 \cdot 10^{-3} \cdot [c]_{\gamma-Fe} + 0,865 \cdot 10^{-5} t,$$

де  $[c]_{\gamma-Fe}$  – вміст вуглецю в аустеніті в % мас;  $t$  – температура аустеніту в  $^{\circ}\text{C}$ .

Згідно з цим рівнянням максимальне значення параметра решітки аустеніту набуває при температурі 1147°C та вмісту вуглецю 2,14 % масового вмісту ( $a_{t}^{\gamma-Fe} = 0,371 \cdot 10^{-9}$  м (рис. 5)).

При мінімальній температурі існування  $\gamma$  – фази заліза 727° С і вмісту в ній вуглецю 0,8 % параметр решітки аустеніту дорівнює  $a_{727}^{\gamma-Fe} = 0,3642 \cdot 10^{-9}$  м. При відсутності вуглецю в залізі решітка аустеніту при 1495° С має розмір  $a_{1495}^{\gamma-Fe} = 0,369 \cdot 10^{-9}$  м, що менше максимального значення (рис. 5). На прикладі аустеніту можна дійти висновку, що вплив вмісту вуглецю на параметр решітки

фериту зневажливо малий, а в основному він залежить від температури.

$$a_{\gamma-Fe} = 0,356 + 2,35 \cdot 10^{-3} [c]_{\gamma-Fe} + 0,865 \cdot 10^{-5} \cdot t; \text{ де } [c]_{\gamma-Fe} \text{ в \% мас; } t - \text{ в } ^\circ\text{C}$$

### Висновок

При нагріванні до температури плавлення залізо розширюється на 6,3 %, сталь – на 6,7 %. Під час плавлення залізо збільшується в об'ємі на 2,2 %, сталь – на 3,03 %. Різниця між лінійними та об'ємними коефіцієнтами теплового розширення заліза і сталі пов'язана з впливом вмісту вуглецю в сталі на їх теплове розширення. Цим же пояснюється співвідношення довідникового коефіцієнта теплового розширення з таким коефіцієнтом сталі.

### Література

1. Бережний, М. М. Сучасний стан і перспективи металургії України [Текст] : зб. наук. пр. / М. М. Бережний, В. І. Міхеєва, В. А. Чубенко, В. П. Мовчан // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг. – 2003. – Вип. 1. – С. 44-46.
2. Бережний, М. М. Зміна об'єму та міцності металу при холодному прокатуванні залежно від ступеня деформації [Текст] : зб. наук. пр. / М. М. Бережний, В. А. Чубенко // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2007. – Вип. 16. – С. 81 – 84.
3. Бережний, М. М. Діаграма стану сплаву залізо-вуглець [Текст] : монографія / М. М. Бережний, С. О. Мацішин, А. А. Хіноцька. – Кривий Ріг, 2013. – 35 с.
4. Власовець, В. Вплив різних факторів на достовірність оцінок за магнітним параметром / В. Власовець // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – Т. 5, N 5(59). – С. 7-11. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/4551>
5. Кошкин Н. И. Справочник по элементарной физике [Текст] : изд. седьмое стереотипное/ Н. И. Кошкин, М. П. Ширкевич // . – М.: Наука, 1976. – 255 с.
6. Кухлинг, Х. Справочник по физике [Текст] : пер. с немец. – 2 – е изд/ Х. Кухлинг // . – М.: Мир, 1989. – 520 с.
7. Кузмичев, В. Е. Законы и формулы физики [Текст] / В. Е. Кухлинг. - К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
8. Гуляев А. П. Металловедение [Текст] : уч. для вузов; 6 – е изд., перераб. и доп / А. П. Гуляев. – М.: Металлургиздат, 1986. – 544 с.
9. Баптизмаський, В. І. Сталеплавильне виробництво: [Текст] : навч. посібник / В. І. Баптизмаський, В. М. Бойченко, О. Г. Величко та ін. – К.: ІЗМН, 1996. – 400 с.
10. Бялік, О. М. Металознавство: [Текст] : підр.; 2 – е вид., перероб і доп/ О. М. Бялік, В. С. Черненко, В. М. Писаренко, Ю. М. Москаленко. – К.: ІВЦ: Видавництво «Політехніка», 2003. – 384 с.
11. Бельченко, Г. И. Основы металлографии и пластической деформации стали [Текст] / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. — К.: Донецк: Вища школа. – Головное издательство, 1987. – 240 с.

Поступила в редакцию 13.11.13

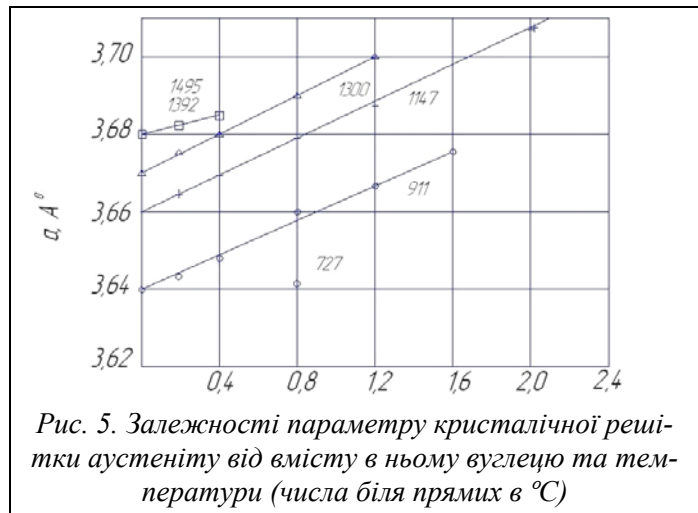


Рис. 5. Залежності параметру кристалічної решітки аустеніту від вмісту в ньому вуглецю та температури (числа біля прямих в °C)