

Прогнозування розчинення карбідів цементитного типу в заевтектоїдних сталях

Афтанділянц Є. Г., доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, aftyev@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5864-9855>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

В статті на основі даних літератури розглянуто процес розчинення карбідів при перетворенні перліту в аустеніт у вуглецевій евтектоїдній сталі. Показано, що в інтервалі температур 760-880 °C розчинність карбідів у 50-1000 разів менша ніж у заевтектоїдних сталях, що пов'язано, зі збільшенням відстані дифузії вуглецю задля досягнення рівноважного стану.

На сьогоднішній день відсутня інформація про математичні моделі, що описують кінетику розчинення карбідів заевтектоїдних сталей в залежності від швидкості дифузії вуглецю та розмірів зерна аустеніту.

Метою роботи є вивчення закономірності розчинення карбідів заевтектоїдних сталей в аустеніті при нагріванні та розробка математичної моделі кінетики їх розчинення.

Встановлена кількісна залежність розміру зерна аустеніту заевтектоїдних сталей від вмісту вуглецю, хрому, кремнію та температури нагріву та показано, що найбільш значний вплив близько 45% надає температура. Вплив хрому становить 25 %, вуглецю – 17 %, а кремнію – 13 %.

Розроблена модель впливу вуглецю, хрому та температури на коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті в інтервалі температур від 1000 до 1200 °C, при вмісті в сталі від 0,92 до 1,83 % вуглецю та від 1,06 до 2,66 % хрому, що з ймовірністю 95 %, коефіцієнтом кореляції 0,998 та середньою помилкою апроксимації 0,21 % описує процес дифузії.

В результаті проведених досліджень встановлено, що розчинення карбідів в аустеніті заевтектоїдних сталей при нагріванні визначається швидкістю дифузії вуглецю, розмірами зерна аустеніту, часом та температурою процесу.

Розроблено математичну модель кінетики розчинення карбідів в аустеніті заевтектоїдних сталей при нагріванні з урахуванням впливу хімічного складу та температури сталі на дифузійну рухливість вуглецю та розмір зерна аустеніту. Порівняння розрахункових та експериментальних значень часу розчинення карбідів цементитного типу в аустеніті показує, що між ними існує тісний кореляційний зв'язок, з ймовірністю 95 %, коефіцієнтом кореляції 0,974 та похибкою 4,5 %.

Матеріали статті можуть бути використані науковцями для подальших досліджень та практиками у виборі матеріалів для виготовлення інструментів.

Ключові слова: сталь, хімічний склад, температура, дифузія, зерно, аустеніт, розчинення.

Структура заевтектоїдних сталей у рівноважному стані складається з перліту та карбідів, які виділяються, в основному, по межах зерен. При нагріванні заевтектоїдних сталей вище температури початку перлітного перетворення відбувається перетворення фериту на аустеніт і розчинення в ньому карбідів.

Аналіз кінетики ізотермічного утворення аустеніту в вуглецевої евтектоїдної сталі, наведеної в роботі [1], показує, що час розчинення цементиту в процесі перетворення перліту в аустеніт становить від 580 до 0,3с в інтервалі температур від 760 до 880 °С, відповідно. Для заевтектоїдних сталей час розчинення карбідів, в аналогічному інтервалі температур, збільшується в 50-1000 разів [2].

Збільшення часу розчинення карбідів у заевтектоїдних сталях пов'язане із збільшенням відстані дифузії вуглецю для досягнення рівноважного стану. При розчиненні карбідів перліту дифузія вуглецю відбувається на половині відстані між пластинами цементиту, яка відповідно до роботи [3] змінюється від 0,5 до 1 мікрона при невеликому переохолодженні та від 0,1 до 0,2 мікрона при значному переохолодженні та практично не залежить від розмірів аустенітного зерна. У разі розчинення надлишкових карбідів заевтектоїдних сталей рівноважний стан досягається при дифузії вуглецю на величину радіусу зерна аустеніту, який може змінюватися від 2 до 500 мікрон та рівноважному вмісті вуглецю в обсязі зерна, який визначається лінією SE діаграми залізо-вуглець.

Аналіз літературних даних показує, що на сьогоднішній день відсутня інформація про математичні моделі, що описують кінетику розчинення карбідів заевтектоїдних сталей в залежності від швидкості дифузії вуглецю і розмірів зерна аустеніту.

Метою роботи є вивчення закономірності розчинення карбідів заевтектоїдних сталей в аустеніті при нагріванні та розробка математичної моделі кінетики їх розчинення.

Відомо [4], що при неоднорідній концентрації i -го елемента в напівнескінченній пластині його перерозподіл відбувається по наступній залежності

$$\frac{C_n - C_x}{C_n - C_o} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}}\right), \quad (1)$$

де C_n – концентрація i -го елемента на поверхні пластини; C_o – вихідна концентрація i -го елемента в пластині; C_x – концентрація i -го елемента на відстані x від поверхні; τ – час процесу; D – коефіцієнт дифузії i -го елемента в пластині; $\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}}\right)$ – функція помилок Гауса.

Використовуючи табличні значення функції помилок Гауса, що приведені в роботі [4], шляхом кореляційного аналізу визначили, що значення функції помилок з вірогідністю 99,9 % і коефіцієнтом кореляції $r = 0,9997$ можна апроксимувати наступною формулою

$$\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}}\right) \approx 0,02 \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{D \cdot \tau}}\right)^3 - 0,2845 \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{D \cdot \tau}}\right)^2 + 1,3198 \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{D \cdot \tau}}\right), \quad (2)$$

З урахуванням формули 1 рівняння 2 можна записати в наступному вигляді

$$\frac{C_n - C_x}{C_n - C_o} \approx 0,02 \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{D_c \cdot \tau}} \right)^3 - 0,2845 \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{D_c \cdot \tau}} \right)^2 + 1,3198 \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{D_c \cdot \tau}} \right), \quad (3)$$

Приймаємо, що C_n – вміст вуглецю на межі зерна ($C_n = 6,67\%$); C_o – рівноважний вміст вуглецю в аустеніті, який визначається лінією SE діаграми залізо – вуглець, залежно від вмісту вуглецю в сталі та температури нагрівання; C_x – вміст вуглецю на відстані x від межі зерна; τ – час дифузії; D_c – коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті сталі.

Умови повного розчинення карбідів реалізуються тоді, коли в центрі зерна аустеніту ($x = R$ (радіус зерна аустеніту)) вміст вуглецю досягає рівноважного значення ($C_x = C_o$). У цьому випадку формула (3) набуває наступного вигляду

За експериментальними даними роботи [5], визначили залежність розміру зерна аустеніту (D_a , мікрон) заевтектоїдних сталей від вмісту вуглецю ($C = 0,9-1,2\%$), хрому ($Cr \leq 1,5\%$), кремнію ($Si \leq 1,4\%$), температури нагрівання ($t = 800-1100\text{ }^\circ\text{C}$) та витримки від 10 хв до 1 год.

$$1,3198 \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{D_c \cdot \tau}} \right) - 0,2845 \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{D_c \cdot \tau}} \right)^2 + 0,02 \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{D_c \cdot \tau}} \right)^3 = 1, \quad (4)$$

Результати проведеного регресійного аналізу показали, що з ймовірністю 95 %, коефіцієнтом кореляції $R = 0,956$ та середньою помилкою апроксимації $\delta = 2,7\%$ аналітична залежність має наступний вигляд

$$D_a = -4,61 \cdot 10^{-4} + 8,17 \cdot 10^{-7} \cdot t - 1,46 \cdot 10^{-4} \cdot C - 3,49 \cdot 10^{-5} \cdot Cr - 2,83 \cdot 10^{-5} \cdot Si, \quad (5)$$

Оцінка ефективності впливу факторів, за критерієм Стьюдента (t_{st}), на розмір зерна аустеніту показує, що найбільш значний вплив близько 45 % надає температура ($t_{st} = 7,3$). Вплив хрому становить 25 % ($t_{st} = -4,1$), вуглецю – 17 % ($t_{st} = -2,8$), кремнію – 13 % ($t_{st} = -2,0$).

Закономірність впливу хімічного складу та температури на коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті (D_c) визначали за експериментальними даними, наведеними в роботі [6]. Проведені розрахунки показали, що в інтервалі температур від 1000 до 1200 $^\circ\text{C}$, при вмісті в сталі від 0,92 до 1,83 % вуглецю і від 1,06 до 2,66 % хрому коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті (D_c) з ймовірністю 95 %, коефіцієнтом кореляції $R = 0,998$ та середньою помилкою апроксимації $\delta = 0,21\%$ визначається наступною залежністю

$$\ln(D_c) = -33,957 + 9,39 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,388 \cdot C - 0,733 \cdot Cr, \quad (6)$$

Для перевірки достовірності встановлених закономірностей розраховували за формулою (4) час розчинення карбідів цементитного типу в сталі, що містить 1% вуглецю та 1 % хрому в інтервалі температур від 960 до

Фазові перетворення

1100 °C (табл. 1) та порівняли з експериментальними даними, наведеними в роботі [2] (рис. 1).

Таблиця 1

Результати розрахунків коефіцієнтів дифузії вуглецю в аустеніті (D_c), радіусу зерна аустеніту (R) та час розчинення карбідів (τ) в аустеніті сталі з 1 % C і 1 % Cr

Table 1

The results of calculations of carbon diffusion coefficients in austenite (D_c), austenite grain radius (R) and carbide dissolution time (t) in austenite steel with 1 % C and 1 % Cr

Температура, °C	D_c , м ² /с	R , м	t , с
960	$1,04 \times 10^{-11}$	$7,09 \times 10^{-5}$	620
1000	$1,51 \times 10^{-11}$	$8,73 \times 10^{-5}$	570
1060	$2,66 \times 10^{-11}$	$1,12 \times 10^{-4}$	535
1100	$3,87 \times 10^{-11}$	$1,28 \times 10^{-4}$	480

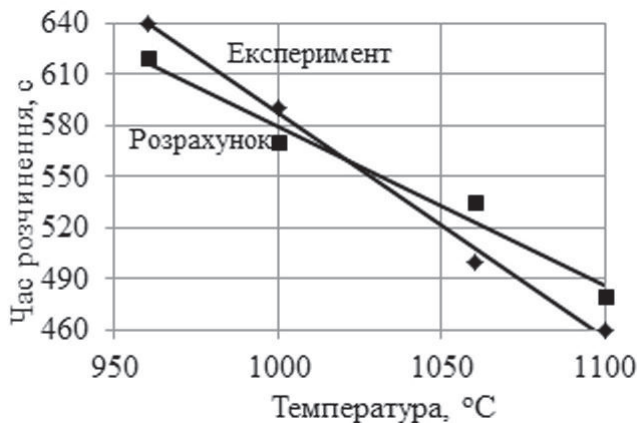


Рис. 1. Кореляція розрахункового та експериментального часу розчинення карбідів цементитного типу в аустеніті сталі, що містить 1 % C і 1 % Cr.

Fig. 1. Correlation of calculated and experimental time of dissolution cementite-type carbides in austenite of steel containing 1 % C and 1 % Cr.

Порівняння розрахункових та експериментальних значень часу розчинення карбідів цементитного типу в аустеніті заєвтектоїдних сталей показує, що між ними існує тісний кореляційний зв'язок із коефіцієнтом кореляції 0,974 та похибкою 4,5 %.

Враховуючи, що сталь із 1 % C та 1 % Cr містить 15 % карбідів цементитного типу, визначено вплив температури нагріву (t), в інтервалі від 960 до 1100 °C, на швидкість розчинення карбідів в аустеніті (V_c , %/с), який відповідає наступній залежності.

$$V_c = 4,7 \cdot 10^{-5} \cdot t - 0,021, \quad R = 0,981. \quad (7)$$

Результати розрахунків за рівнянням (7) показано на рис. 2.

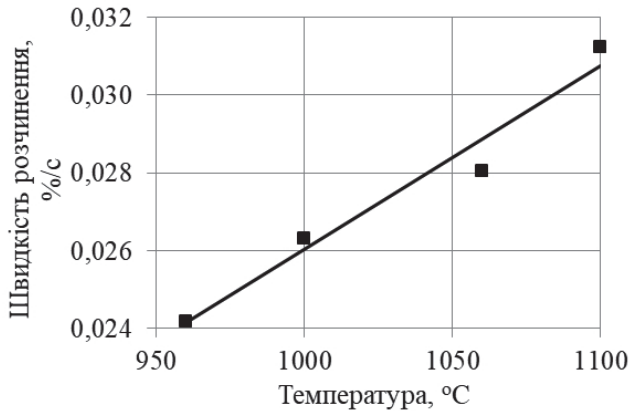


Рис. 2. Вплив температури нагрівання на швидкість розчинення карбідів цементитного типу в аустеніті сталі, що містить 1 % С і 1 % Cr.

Fig. 2. The influence of heating temperature on the dissolution rate of cementite-type carbides in austenite of steel containing 1 % C and 1 % Cr.

Дані наведені на рис. 2 показують, що при збільшенні температури нагрівання з 960 до 1100 °C швидкість розчинення карбідів цементитного типу в аустеніті сталі, що містить 1 % С та 1 % Cr, збільшується на 30 %.

Результати проведених досліджень показують, що розчинення карбідів в аустеніті заевтектійних сталей при нагріванні визначається швидкістю дифузії вуглецю, розмірами зерна аустеніту, часом та температурою процесу.

Розроблено математичну модель кінетики розчинення карбідів заевтектійних сталей в аустеніті при нагріванні з урахуванням впливу хімічного складу та температури сталі на дифузійну рухливість вуглецю та розмір зерна аустеніту.

Література

1. Садовский В. Д. Превращения при нагреве стали. Структурная наследственность // Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. в 3-х т. / Под ред. Бернштейна Л. Л., Рахштадта А. Г. – М.: Металлургия, 1983. – Т. 2. – С. 368.
2. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 359 с.
3. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращение аустенита при охлаждении (мартенситное, перлитное, промежуточное) и отпуск закаленной стали // Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. в 3-х т. / Под ред. Бернштейна Л. Л., Рахштадта А. Г. – М.: Металлургия, 1983. – Т.2 – С. 368.
4. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
5. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1983. – 584 с.
6. Лариков Л. Н., Исайчев В. И. Структура и свойства металлов и сплавов. Диффузия в металлах и сплавах. – Киев: Наукова думка, 1987. – 510 с.

References

1. Sadovskiy, V. D. (1983). *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stali: Osnovy termicheskoy obrabotki* [Metal science and heat treatment of steel]. In L. L. Bernshtein & A. G. Rakhstadt (Eds.), *Spravochnoye izdaniye v 3-kh tomakh* (Vol. 2, p. 368). Metallurgiya. [In Russian].
2. Lakhtin, Yu. M. (1983). *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. Metallurgiya. [In Russian].
3. Kurdymov, G. V., Utevskiy, L. M., & Entin, R. I. (1983). *Prevrashcheniye austenita pri okhlazhdenii (martensitnoye, perlitnoye, promezhutochnoye) i otpusk zakalennykh stali* [Austenite transformations during cooling (martensitic, pearlitic, intermediate) and tempering of hardened steel]. In L. L. Bernshtein & A. G. Rakhstadt (Eds.), *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stali: Osnovy termicheskoy obrabotki* (Vol. 2, p. 368). Metallurgiya. [In Russian].
4. Van Vleck, L. (1975). *Teoreticheskoye i prikladnoye materialovedeniye* [Theoretical and applied materials science]. Atomizdat. [In Russian].
5. Geller, Yu. A. (1983). *Instrumental'nyye stali* [Tool steels]. Metallurgiya. [In Russian].
6. Larikov, L. N., & Isaychev, V. I. (1987). *Struktura i svoystva metallov i splavov. Diffuziya v metallakh i splavakh* [Structure and properties of metals and alloys. Diffusion in metals and alloys]. Naukova Dumka. [In Russian].

Одержано 06.11.24

Prediction of dissolution of cementite type carbides in hypereutectoid steels

Ye. G. Aftandiliants, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, aftyev@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5864-9855>

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Summary

Analysis of the literature review shows that the dissolution time of carbides, during the transformation of pearlite into austenite, in carbon eutectoid steel, in the temperature range from 760 to 880 °C, is in 50-1000 times less than in hypereutectoid steels, which is associated with an increase carbon diffusion distances to reach an equilibrium state.

To date, there is no information about mathematical models that describe the kinetics of dissolution in carbides of hypereutectoid steels depending on the rate of carbon diffusion and austenite grain size.

The aim of the work is to study the regularity of carbide dissolution in austenite of hypereutectoid steels during heating and to develop a mathematical model of their dissolution kinetics.

The quantitative dependence of the austenite grain size of hypereutectoid steels of the carbon, chromium, silicon content and the heating temperature was established, and it was shown that the most significant effect of about 45% is exerted by temperature. The influence of chromium is 25 %, carbon – 17 %, and silicon – 13 %.

A model of the influence of carbon, chromium and temperature on the diffusion coefficient of carbon in austenite in the temperature range from 1000 to 1200 °C, with a steel content of 0.92 to 1.83 % carbon and 1.06 to 2.66 % chromium, was developed,

which with a probability of 95 %, a correlation coefficient of 0.998 and an average approximation error of 0.21 % describes the diffusion process.

As a result of the research, it was established that the dissolution of carbides in austenite of hypereutectoid steels during heating is determined by the rate of carbon diffusion, austenite grain sizes, time and temperature of the process.

A mathematical model of the kinetics of dissolution of carbides in austenite of hypereutectoid steels during heating was developed, taking into account the influence of the chemical composition and temperature of the steel on the diffusion mobility of carbon and the size of the austenite grain. A comparison of the calculated and experimental values of the dissolution time of cementite-type carbides in austenite shows that there is a close correlation between them, with a probability of 95 %, a correlation coefficient of 0.974 and a error of 4.5 %.

The materials of the article can be used by scientists for further research and practitioners in the selection of materials for making tools.

Keywords: steel, chemical composition, temperature, diffusion, grain, austenite, dissolution.

Metalozn. obrobka met. 2025, vol. 31 (113), 20-30
<https://doi.org/10.15407/mom2025.01.020>

УДК 621:664: 669.01(075)

Залежність кількості аустеніту від температури при нагріванні загартованої штампової сталі 4ХЗН5МЗФ

Радченко О. К., доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
arradch@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2802-0874>

Сидорчук О. М., кандидат технічних наук, старший дослідник,
sedoroleg@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0026-7525>

Федоран Ю. О., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
yfedoran@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5300-1217>

Аскеров М. Г., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
mukafat_ask@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6611-2732>

Гогаєв К. О., член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, завідувач відділу, gogaev@ipms.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0042-1759>

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, Україна

У роботі використано результати проведеного раніше високотемпературного Х-променевого фазового аналізу загартованої штампової сталі 4ХЗН5МЗФ одержаної методом електрошлакового кокільного лиття. Було побудовано експоненціальну безмодельну