

## ПАРАМЕТРИ КОНТАКТНОГО ПЛАВЛЕННЯ В СИСТЕМІ Fe–C У ДИФУЗІЙНОМУ НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Досліджено контактне плавлення (КП) в системі Fe–C<sub>тр.</sub> (вуглець), а саме визначено залежності пересування фронтів рідкої фази під час плавлення від часу та температури, а також визначено енергію активації процесу КП. Досліджень з КП в системі Fe–C небагато, що є досить невиправданним з погляду розповсюдженості залізобуглецевих сплавів та застосування контактного зварювання у промисловості. Пояснити таку поведінку дослідників можна складністю проведення експериментів за достатньо високої температури та існуванням стабільної (Fe–C<sub>тр.</sub>) та метастабільної (Fe–Fe<sub>3</sub>C) систем. У більшості ці дослідження носять описовий характер та не мають математичних моделей. Для спрощення процесу моделювання запропоновано взяти сталь тільки з вмістом Fe та C<sub>тр.</sub> (вуглецю).*

*Чисельно визначені параметри контактного плавлення у дифузійному нестационарному режимі (за якого отримана рідка фаза не видаляється із зони контакту) в системі Fe–C<sub>тр.</sub>, знайдені залежності пересування фронтів рідкої фази та енергія активації процесу.*

*Для створення математичної моделі контактного плавлення на основі законів дифузійного масоперееносу, спочатку апроксимовано лінії ліквідусу (BC і CD) та солідусу (BE) стабільної системи Fe–C<sub>тр.</sub>*

*На основі законів дифузії в аустеніті та у рідкому залізобуглецевому сплаві отримана система двох нелінійних рівнянь з інтегральними функціями. Ця система чисельно розв'язана за допомогою прикладної математичної програми Maple, в результаті чого отримано параметри, які визначають швидкість пересування рідкої фази в залежності від температури процесу та початкового вмісту вуглецю у залізі.*

*Визначено, що товщина прошарку рідкої фази в ізотермічних умовах зростає за параболічним законом і визначається співвідношенням коефіцієнтів дифузії компонентів системи.*

*Отримані коефіцієнти, що визначають швидкість зростання маси рідкої фази за різних температур, апроксимовано за допомогою прикладної програми Data Fit, саме як залежність Арреніуса, результатом чого стало визначення параметра та енергії активації контактного плавлення в системі Fe–C<sub>тр.</sub>*

**Ключові слова:** контактне плавлення, евтектика, залізо, графіт, енергія активації, вуглець.

### Вступ

Резерви розширення застосування традиційних матеріалів на основі легованих сталей та чавунів є досить обмежені, що пов'язано зі зменшенням у природі запасів нікелю, молібдену, міді, титану й інших елементів. Тому проблема створення шаруватих композицій, які б містили мінімум легувальних елементів, мали б високі механічні властивості є одним зі шляхів вирішення проблем щодо зменшення витрат металів, підвищення якості та довговічності машин.

Широкі можливості зі створення таких матеріалів надає використання явища контактного плавлення (КП) у системі Fe–C.

У ВНТУ розробляються технології, які дозволяють отримувати композиційні матеріали типу сталь–білий чавун [1], [2]. Перспективними є технології отримання зносостійких шарів з використанням явища КП. Суть цього явища полягає у виникненні рідкої фази в точці контакту двох твердих речовин, які становлять систему з евтектикою, у разі нагрівання їх до температури, нижчої температур плавлення цих речовин.

Робіт, які б чисельно досліджували параметри КП, не так багато, в особливості для компонентів з високою температурою евтектичного перетворення. У частині цих робіт досліджується процес КП в стаціонарному режимі (за умови, що рідкий прошарок в місці контакту має сталу величину завдяки постійному відводу рідкої фази зовнішнім зусиллям стискання тіл, що беруть участь у КП) [3]–[5]. Під час утворення рідкої фази в дослідженнях [1], [2] товщина рідкого прошарку не

була сталою величиною. Цей прошарок збільшується з часом внаслідок розчинення в рідкій фазі контактуючих з нею твердих фаз до повного розчинення однієї з цих твердих фаз (нестационарний процес). Саме такий процес досліджується в роботах [6], автори яких за швидкість КП беруть швидкість пересування в рідині точки з евтектичною концентрацією. В такому разі зникає можливість слідкувати за пересуванням фронтів розподілу рідини з кожною із контактуючих твердих фаз.

*Метою дослідження* є розробка наукових основ визначення параметрів КП, а саме визначення залежностей пересування фронтів рідкої фази під час плавлення в залежності від часу та температури, та визначення енергії активації КП.

*Методом дослідження* процесу КП є створення математичної моделі КП за допомогою відомих законів масопереносу. Розв'язання математичних задач за допомогою комп'ютерної техніки, прикладних математичних програм Maple, Data Fit та стандартних електронних таблиць Excel.

### Дослідження КП в системі Fe–C

За основу побудови математичної моделі КП сталі з вуглецевим матеріалом взято модель КП для нестационарного дифузійного режиму між вуглецевим матеріалом та залізом [7].

КП сталі, чи заліза з вуглецевим матеріалом можна представити як дифузійний перенос вуглецю через рідину в аустеніт. В літературних джерелах зустрічаються дані, що вуглець може перебувати в рівновазі з цементитом і КП заліза з вуглецевим матеріалом відбувається через проміжну фазу — цементит [8]. Але це неможливо. Рівновага між вуглецевим матеріалом та цементитом неможлива в системі Fe–C, а також в системах Fe–C–легувальний елемент, в яких останній підвищує коефіцієнт активності вуглецю (наприклад силіцій). Така рівновага можлива лише в потрібному сплаві, в якому

легувальний елемент знижує коефіцієнт активності вуглецю (наприклад, під впливом *Mn, Cr, V*) [9].

Для побудови моделі вважалось, що сталь не містить окрім феруму та вуглецю ніяких хімічних елементів. Тому для побудови математичної моделі використано діаграму стану Fe–C (рис. 1) [9]–[11]. Відомо, що в графіті може розчинитися залізо [12], але достовірних даних про залежність цієї розчинності від температури немає, крім того, розчинність ця відносно мала, тому нею знехтувано.

Для описування залежності розчинності вуглецю в аустеніті та рідині від температури використано математичні залежності, отримані в роботі [9].

Аустенітний солідус — у формі

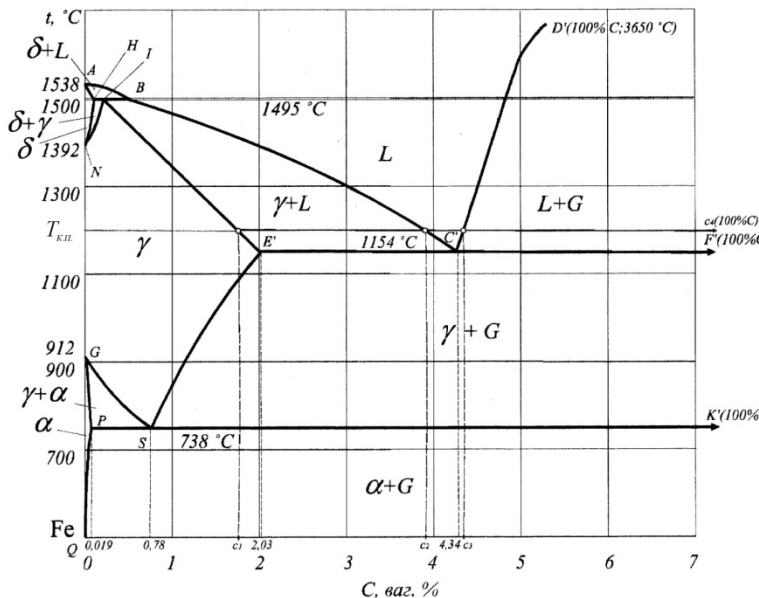


Рис. 1. Діаграма Fe–C (вуглецевий матеріал)

прямої, що проходить через дві точки *I* та *E*

$$c_1 = \frac{5,4572814 - 3,0299343 \cdot 10^{-3} \cdot T}{16,294585 - 2,378282871 \cdot 10^{-3} \cdot T}, \quad (1)$$

де *T* — температура в градусах Кельвіна; *c*<sub>1</sub> — в атомних частках.

Залежність концентрації аустенітного ліквідусу

$$c_2 = \frac{-7,252632 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 1,6932364 \cdot 10^{-2} \cdot T - 6,9699775}{-5,6928103 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 1,3290725 \cdot 10^{-2} \cdot T + 6,540054}. \quad (2)$$

Залежність графітного ліквідусу відповідно до [13]–[15]

$$c_3 = \frac{4,3141808 \cdot 10^{-1} + 1,396175 \cdot 10^{-3} \cdot T}{12,349633 + 1,0959 \cdot 10^{-3} \cdot T}. \quad (3)$$

Наведені залежності призначені для моделювання процесу КП між вуглецевим матеріалом та  $\gamma$ -твердим розчином вуглецю в залізі в усьому інтервалі температур, коли це можливо (1154...1499 °C).

Зобразимо на наведеній діаграмі (рис. 1) коноду, яка відповідає температурі КП ( $T_{кн.}$ ). Для опису процесу використаємо такі позначення:

- $c_{Fe}^C$  — концентрація феруму в графіті;  $c_{Fe}^L$  — концентрація феруму в рідині;
- $c_C^{Fe}$  — концентрація вуглецю в аустеніті;  $D_C$  — коефіцієнт дифузії вуглецю в аустеніті;
- $c_{Fe}$  — концентрація феруму в аустеніті;  $D$  — коефіцієнт взаємної дифузії в рідині.
- $c_C$  — концентрація вуглецю в графіті;

Величини концентрації компонентів у всіх трьох фазах повинні задовольняти тотожностям

$$c_{Fe} + c_C^{Fe} \equiv 1; c_C \equiv 1; c_{Fe}^C \equiv 0; c_{Fe}^L + c_C^L \equiv 1. \quad (4)$$

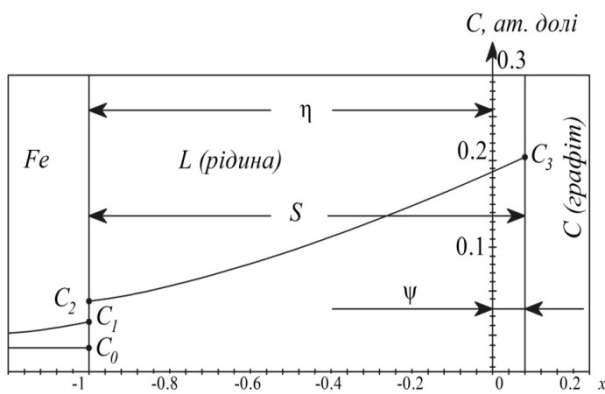


Рис. 2. Схема процесу КП та розподіл концентрації вуглецю в фазах: Fe, L (рідина), C (вуглець)

Для спрощення задачі нехтуємо залежністю коефіцієнта дифузії від концентрації. Застосуємо відому підстановку Больцмана

$$\lambda(c) = \frac{x}{\sqrt{\tau}}. \quad (6)$$

Тоді, з урахуванням рівностей

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{dc}{d\lambda} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial \tau} = -\frac{dc}{d\lambda} \cdot \frac{x}{2\tau^{3/2}}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{dc}{d\lambda} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{dc}{d\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau}} \right) = \frac{d^2 c}{d\lambda^2} \cdot \frac{1}{\tau} \quad (8)$$

диференційне рівняння в частинних похідних (7) перетворюється в звичайне диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 c}{d\lambda^2} + \frac{\lambda}{2D} \cdot \frac{dc}{d\lambda} = 0. \quad (9)$$

Розв'язок рівняння (7) знаходився у вигляді

$$c(x, \tau) = \bar{a} + \bar{b} \cdot \Phi \left( \frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right), \quad (10)$$

де  $\bar{a}$  і  $\bar{b}$  — сталі, які визначаються із граничних умов; функція похибок  $\Phi(z)$  дорівнює

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-\theta^2} d\theta. \quad (11)$$

Таким чином, розподіл концентрацій відповідно в аустеніті та рідині

$$c(x, \tau) = c_C^{Fe} = 1 - a + b \cdot \Phi \left( \frac{x}{2\sqrt{D_C \cdot \tau}} \right), \quad D = D_C, \quad -\infty \leq x \leq -\eta; \quad (12)$$

$$c(x, \tau) = c_C^L = a_1 + b_1 \cdot \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}}\right), \quad -\eta \leq x \leq \psi. \quad (13)$$

Коефіцієнти  $a$ ,  $a_1$ ,  $b$ ,  $b_1$  потрібно визначити.

На межах розділу фаз  $x = \psi$  та  $x = -\eta$  маємо сталі значення концентрацій незалежно від часу. З урахуванням (12), (13) це можливо тільки за умовою, що закон пересування меж між залізом і рідиною та між вуглецевим матеріалом і рідиною відповідно описується рівняннями

$$\eta = 2\beta\sqrt{\tau}; \quad (14)$$

$$\psi = 2\alpha\sqrt{\tau}, \quad (15)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  — сталі, які потрібно визначити.

З граничної умови

$$c_C^{Fe} \Big|_{x=-\infty} = c_0, \quad (16)$$

де  $c_0$  — вміст вуглецю в сталі.

З урахуванням (12), (4) та рівностей  $\Phi(-x) = -\Phi(x)$ ,  $\Phi(\infty) = 1$ , маємо

$$a + b = 1 - c_0. \quad (17)$$

З граничної умови

$$c_C^{Fe} \Big|_{x=-\eta} = c_1, \quad (18)$$

з урахуванням (14) та рівності (17), випливає

$$a + b \cdot \Phi\left(\frac{\beta}{\sqrt{D_C}}\right) = 1 - c_1. \quad (19)$$

Розв'язавши системи двох лінійних рівнянь (17) та (19), отримаємо:

$$a = \frac{1 - c_1 - \Phi\left(\frac{\beta}{\sqrt{D_C}}\right) \cdot (1 - c_0)}{1 - \Phi\left(\frac{\beta}{\sqrt{D_C}}\right)}; \quad (20)$$

$$b = \frac{c_1 - c_0}{1 - \Phi\left(\frac{\beta}{\sqrt{D_C}}\right)}. \quad (21)$$

За аналогією, з урахуванням граничних умов для рідкої фази

$$c_C^L \Big|_{x=-\eta} = c_2, \quad c_C^L \Big|_{x=\psi} = c_3 \quad (22)$$

та рівнянь (13)—(15) матимемо:

$$a_1 = \frac{c_2 \Phi\left(\frac{\alpha}{\sqrt{D}}\right) + c_3 \Phi\left(\frac{\beta}{\sqrt{D}}\right)}{\Phi\left(\frac{\alpha}{\sqrt{D}}\right) + \Phi\left(\frac{\beta}{\sqrt{D}}\right)}; \quad (23)$$

$$b_1 = \frac{c_3 - c_2}{\Phi\left(\frac{\alpha}{\sqrt{D}}\right) + \Phi\left(\frac{\beta}{\sqrt{D}}\right)}. \quad (24)$$

Для знаходження значень коефіцієнтів  $\alpha$  і  $\beta$  запишемо умови на рухомих границях

$$n^L D \frac{\partial c_C^L}{\partial x} \Big|_{x=-\eta} + n^{Fe} D_C \frac{\partial c_C^{Fe}}{\partial x} \Big|_{x=-\eta} = n^{Fe} \cdot \frac{d\eta}{d\tau} (c_2 - c_1); \quad (25)$$

$$n^L D \frac{\partial c_C^L}{\partial x} \Big|_{x=\psi} = n^C \frac{d\psi}{dt} (1 - c_3), \quad (26)$$

де  $n^{Fe}$ ,  $n^C$ ,  $n^L$  — кількість частинок в одиниці об'єму відповідної фази.

З урахуванням рівностей

$$\frac{\partial c_C^L}{\partial x} \Big|_{x=-\eta=-2\beta\sqrt{\tau}} = \frac{+b_1}{\sqrt{\pi D \tau}} e^{-\frac{\beta^2}{D}}; \quad \frac{\partial c_C^{Fe}}{\partial x} \Big|_{x=-\eta=-2\beta\sqrt{\tau}} = \frac{-b}{\sqrt{\pi D_C \tau}} e^{-\frac{\beta^2}{D_C}} \quad (27)$$

та співвідношень (21), (24) рівняння (25), (26) набудуть вигляду системи двох нелінійних рівнянь

$$\sqrt{\frac{D}{\pi}} \cdot n^L \frac{c_3 - c_2}{\Phi\left(\frac{\alpha}{\sqrt{D}}\right) + \Phi\left(\frac{\beta}{\sqrt{D}}\right)} \cdot e^{-\frac{\beta^2}{D}} - \sqrt{\frac{D_C}{\pi}} \cdot n^{Fe} \frac{c_1 - c_0}{1 - \Phi\left(\frac{\beta}{\sqrt{D_C}}\right)} e^{-\frac{\beta^2}{D_C}} = n^{Fe} \beta (c_2 - c_1); \quad (28)$$

$$\sqrt{\frac{D}{\pi}} \cdot n^L \frac{c_3 - c_2}{\Phi\left(\frac{\alpha}{\sqrt{D}}\right) + \Phi\left(\frac{\beta}{\sqrt{D}}\right)} e^{-\frac{\alpha^2}{D}} = n^C \alpha (1 - c_3). \quad (29)$$

Для розв'язання системи рівнянь (28) та (29) за різних значень температури необхідно мати значення  $D$  та  $D_C$ . З урахуванням припущення про незалежність коефіцієнтів дифузії від концентрації, температурну залежність коефіцієнта дифузії можна визначити за допомогою напівемпіричної залежності Арреніуса

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right), \quad (30)$$

де  $D_0$  — фактор дифузії;  $E$  — енергія активації;  $R$  — універсальна газова стала.

Так для рідини (розплаву Fe–C) за даними [18], [19]:  $D_0 = 2,212 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $E = 53172 \text{ Дж/г} \cdot \text{атом}$ .

Для аустеніта в інтервалі температур 925...1250 °C за даними [13], [14]:

$$D_0 = 0,486 \text{ см}^2/\text{с}, \quad E = 153237 \text{ Дж/г} \cdot \text{атом}.$$

Продовживши залежність (3) коефіцієнта дифузії вуглецю в аустеніті до вищих температур (до 1499 °C), отримаємо такі залежності:

$$D_C = 0,486 \cdot \exp\left(-\frac{18431,19}{T}\right) [\text{см}^2/\text{с}]; \quad (31)$$

$$D = 2,212 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(-\frac{6395,52}{T}\right) [\text{см}^2/\text{с}]. \quad (32)$$

Кількість атомів в одиниці об'єму можна знайти за формулою

$$n = \frac{N_A \cdot \rho}{A}, \quad (33)$$

де  $N_A$  — число Авогадро;  $\rho$  — густина;  $A$  — атомна маса.

Для графіту, за даними [20],  $A_C = 12,011 \text{ ат. од.}$ ;  $\rho_C = 1,9...2,3 \text{ г/см}^3$ . Приймаємо середнє значення  $\rho_C = 2,1 \text{ г/см}^3$ . Тоді  $n^C = 1,0530527 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ .

Для заліза, за даними [20],  $A_{Fe} = 55,847 \text{ ат. од.}$ ;  $\rho_{Fe} = 7,874 \text{ г/см}^3$ . Тоді  $n^{Fe} = 8,4919129 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ .

Кількість атомів в одиниці об'єму рідини (розплаву Fe–C) знайдемо для сплаву з евтектичною концентрацією:  $c_C^e = 0,174$  ат. долі (4,34 % wag.).

$$\text{Отже, } n^L = c_C^e \cdot n^C + (1 - c_C^e)n^{\text{Fe}} = 1,0176465 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}.$$

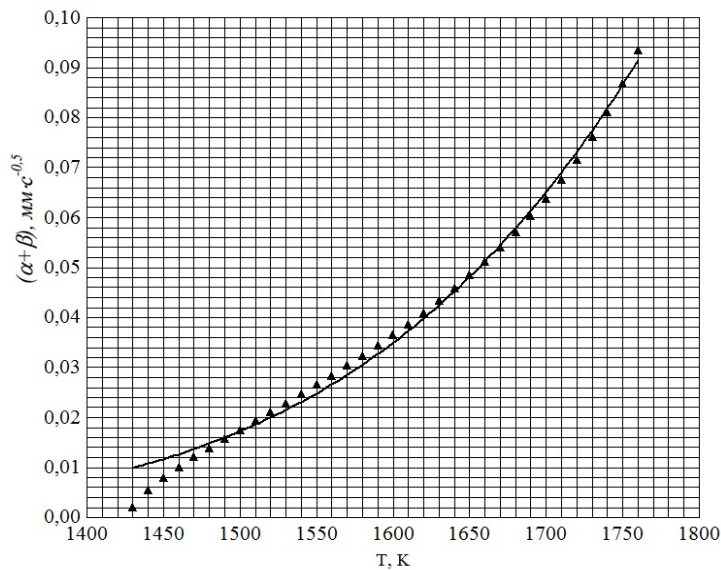


Рис. 4. Залежність коефіцієнта зростання прошарку рідкої фази на границі залізо–графіт  $(\alpha + \beta)$  від температури КП —  $T$ :  
 ▲▲ — результати, отримані розв'язанням системи рівнянь (28) та (29)  
 — — залежність, апроксимована функцією  $(\alpha + \beta) = a_0 \cdot \exp\left(-\frac{b}{T}\right)$

тві дифузії компонентів. Визначимо для цього процесу енергію активації КП.

З метою визначення енергії активації КП заліза з вуглецем апроксимацію суми коефіцієнтів  $(\alpha + \beta)$  від температури здійснювали, використовуючи прикладну програму *Data Fit*, за залежністю  $(\alpha + \beta) = a_0 \exp\left(-\frac{b}{T}\right)$ , яка відповідає залежності Арреніуса. Після розрахунку значення енергії активації знаходимо як добуток  $b \cdot R$ , де  $R$  — універсальна газова стала.

Таким чином:

- енергія активації КП заліза з вуглецевим матеріалом  $E = 140865,8 \pm 7575,7$  Дж/г · атом;
- фактор КП  $a_0 = 1387,514 \pm 749,881$  см<sup>2</sup>/с.

## Висновки

Створено математичну модель контактного плавлення, яка описує залежності пересування фронтів рідкої фази, розподілу вуглецю в сталі в залежності від температури, часу та первинному вмісту вуглецю в сталі. З використанням результатів, отриманих за допомогою цієї моделі, визначено енергію активації та фактор контактного плавлення в системі Fe–C.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. A. Zhukov, A. V. Bondarenko, and A. Yu. Ossadchuk, "New Methods of Joining Carbonaceous Materials to the Surface of Steel," *Joining sciences*, № 4, pp. 188-193, 1993.
- [2] В. Г. Сывынюк, А. А. Жуков, и А. М. Заречный, «Электроконтактное легирование поверхностей стальных деталей волокнистым углеродным материалом,» *Сварочное производство*, № 4, с. 11-14, 1987.
- [3] Л. К. Савицкая, «Расчет скорости контактного плавления эвтектических систем,» *Известия высших учебных заведений. Физика*, № 6, с. 132-138, 1962.
- [4] К. А. Гетажеев, и П. А. Савинцев, «К расчету скорости контактного плавления,» *Физическая химия поверхностных явлений при высоких температурах*, Київ: Наукова думка, с. 194-196, 1972.
- [5] Ю. С. Долгов, и Ю. В. Сидохин, *Вопросы формирования паяного шва*. М.: Машиностроение, 1973, 136 с.
- [6] М. И. Пашечко, В. М. Голубец, и М. В. Чернец, *Формирование и фрикционная стойкость эвтектических покрытий*, Киев, Україна: Наук. думка. 1993, с. 343.

- [7] V. I. Savulyak, A. Yu. Ossadchuk, and V. V. Savulyak, "Contact melting of unalloyed steel with graphite in diffusive unstationary mode," *Buletinul Institutului Politehnic din Iași. secția știința și ingineria materialelor*, № 3, pp. 85-91, 2008.
- [8] С. В. Лашко, и Н. Ф. Лашко, *Пайка металлов*. М.: Машиностроение, 1988, 376 с.
- [9] А. А. Жуков, «Система Fe-Fe<sub>3</sub>C,» *Литейное производство*, № 2, с. 38-39, 1997.
- [10] A. A. Zhukov, and A. Yu. Ossadchuk, "The iron-carbon phase diagram. New data and technologies. In. Heat Treatment and technology of surface coatings," in *7-th International Congress Materials of the MOTO*. Moscow, № 2, p. 157-166, 1990.
- [11] P. Gustafson, "A thermodynamic evaluation of Fe-C system," *Scand. J. Met*, № 5, pp. 259-267, 1985.
- [12] А. А. Вертман, и А. М. Самарин, «Свойства расплавов железа,» М.: Наука, 1966, 280 с.
- [13] А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, и А. М. Братковский, *Физические величины: Справочник*. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
- [14] М. А. Кристал, *Механизм диффузии в железных сплавах*. М.: Metallurgy, 1972, 400 с.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.04.2022ї

**Осадчук Андрій Андрійович** — аспірант кафедри галузевого машинобудування, e-mail: os.andrey2@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет

**A. A. Osadchuk**<sup>1</sup>

## Contact Melting Parameters in the System of Fe–C in Diffusion Non-Stationary Mode

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

The article is devoted to the study of contact melting (CM) in the system Fe–C<sub>tp</sub> (carbon), namely, determining the dependence of the movement of the fronts of the liquid phase during melting as a function of time and temperature, and determining the activation energy of CM. There are few studies on CM in the Fe–C system, which is quite unjustified in terms of the prevalence of ferrocen alloys. This "uninteresting" interest of researchers can be explained by the complexity of conducting experiments at a sufficiently high temperature and the existence of stable (Fe–C<sub>tp</sub>) and metastable (Fe–Fe<sub>3</sub>C) systems. Most of these studies are descriptive and do not have mathematical models. For easier modeling, it was proposed to take steel only with the content of Fe and C<sub>tp</sub> (carbon).

In this work, an attempt is made to numerically determine the parameters of contact melting in the diffusion nonstationary mode (in which the obtained liquid phase is not removed from the contact zone) in the Fe–C<sub>tp</sub> system.

For the mathematical model of contact melting based on the laws of diffusion mass transfer, the liquidus (BC and CD) and solidus (BE) lines of the stable Fe–C<sub>tp</sub> system were first approximated.

Systems of two nonlinear equations with integral functions were obtained on the basis of diffusion laws in austenite and liquid iron-carbon alloy. This system was numerically solved using the Maple applied mathematical program, which resulted in parameters that are responsible for the speed of movement of the liquid phase depending on the process temperature and the initial carbon content in iron.

It was determined that the thickness of the liquid phase layer under isothermal conditions increases according to the parabolic law and is determined by the ratio of the diffusion coefficients of the components.

The obtained coefficients determining the growth rate of the liquid phase at different temperatures were approximated depending on the temperature using the Data Fit application program, namely the Arrhenius dependence, which resulted in determining the parameter and activation energy of contact melting in the Fe–C<sub>tp</sub> system.

**Keywords:** contact melting, eutectic, iron, graphite, activation energy, carbon.

**Osadchuk Andriy A.** — Post-Graduate Student of the Chair of Industrial Engineering, e-mail: os.andrey2@gmail.com