

PACS numbers: 61.66.Dk, 61.72.Ff, 68.70.+w, 81.05.Bx, 81.30.Mh, 81.40.Cd, 81.40.Gh

Морфологія цементиту, сформованого в результаті розпаду аустеніту під час охолодження перегрітих заевтектоїдних криць

Ю. А. Гарасим, Н. О. Бондаревська

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна*

Досліджено мікроструктуру низьколегованих заевтектоїдних криць з різним вмістом Карбону (1,05, 1,28 та 1,78 мас.%) після нагріву їх до температур у 1150–1200°C і наступного охолодження з контрольованими швидкостями. Встановлено, що загальним для досліджуваних криць є виділення під час охолодження частинок вторинного цементиту по межах зерен колишнього гомогенного аустеніту. У внутрішніх об'ємах зерен аустеніту криці з 1,05 мас.% Карбону формується структура зернистого перліту, тоді як у криці з 1,28 мас.% Карбону — пластинчастого. В криці з вищим вмістом Карбону (1,78 мас.%) розпад аустеніту приводить до утворення структури з голкоподібними виділеннями Відманштеттвого цементиту. Одержані результати можуть бути використані для розробки оптимальних режимів охолодження криць перлітного класу після стикового зварювання для запобігання утворенню в зонах термічного впливу структури зернистого перліту з нижчими характеристиками міцності.

Ключові слова: заевтектоїдна криця, Відманштеттв цементит, морфологія, пластинчаста структура, глобулярна структура, сфероїдизація.

Corresponding author: Julian Andriyovych Harasym
E-mail: garasym @imp.kiev.ua

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: J. A. Harasym and N. O. Bondarevs'ka, Morphology of Cementite Formed as a Result of Austenite Decomposition During Cooling of Overheated Hypereutectoid Steels, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **47**, No. 3: 237–244 (2025).
DOI: [10.15407/mfint.47.03.0237](https://doi.org/10.15407/mfint.47.03.0237)

© Publisher PH “Akadempriodyka” of the NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>)

The microstructure of low-alloy hypereutectoid steels with different carbon content (1.05, 1.28 and 1.78 wt.%) after their heating to temperatures of 1150–1200°C and subsequent cooling at controlled rates is studied. As established, the segregation of particles of secondary cementite along the grain boundaries of former homogeneous austenite during cooling is common to the studied steels. In the inner volumes of austenite grains of steel with 1.05 wt.% carbon, a granular pearlite structure is formed, while, in steel with 1.28 wt.% carbon, a lamellar structure is formed. In steel with a higher carbon content (1.78 wt.%), the decomposition of austenite leads to the formation of a structure with needle-like precipitations of Widmanstätten cementite. The obtained results can be used in the development of optimal modes of cooling of pearlite grade steels after butt-welding to prevent the formation of a granular pearlite structure with lower strength characteristics in the thermally affected zones.

Key words: hypereutectoid steel, Widmanstätten cementite, morphology, lamellar structure, globular structure, spheroidization.

(Отримано 26 вересня 2024 р.; остаточн. варіант — 14 листопада 2024 р.)

1. ВСТУП

Механічні властивості термозміцнених вуглецевих низьколегованих криць контролюються не тільки об'ємним вмістом цементиту, але й його морфологією та характером розподілу в об'ємі [1]. В залежності від температурно-часових умов нагріву й охолодження в них може бути сформована структура з різною морфологією цементитних частинок. В процесі металургійного виробництва прокату з даних криць під час охолодження на повітрі, зазвичай, утворюється структура пластинчастого перліту. Змінити морфологію цементитних виділень у перліті з пластинчастої на глобулярну, що особливо важливо для інструментальних і підшипникових криць, оскільки це сприяє простоті їхніх пластичності, тріщиностійкості та зносостійкості, вдається додатковим термічним обробленням — сфероїдизаційним відпалом [2]. З метою скорочення тривалості даного термічного оброблення в рамках моделю «анормального» механізму розпаду аустеніту авторами [2, 3] розроблено ефективні схеми сфероїдизаційного оброблення, які дають змогу синхронізувати тривалість технологічних операцій гарячого вальцювання та відпалу. Формування глобулярного перліту за повільного охолодження криць відбувається в місцях розташування недорозчинених під час гомогенізації аустеніту цементитних частинок. В разі хемічної гомогенності аустеніту, за відсутності в ньому недорозчинених частинок цементиту, зародження глобулярного цементиту, на думку авторів [2], може здійснюватися на скупченнях дислокацій, які утворилися в процесі термоциклічного оброблення.

Відмінний механізм формування структури глобулярного перлі-

ту в процесі охолодження аустеніту у вуглецевих крицях (так званого «diversed eutectoid transformation» — DET), був розроблений авторами [4]. Згідно з ним, формування структури глобулярного перліту здійснюється, в основному, безпосередньо на рухливій міжфазній $\gamma \rightarrow \alpha$ -межі в процесі евтектоїдного перетворення аустеніту. Необхідною умовою реалізації такого механізму є наявність частинок цементиту діаметром $> 0,3 \text{ мкм}$ і швидкості повільного охолодження $\leq 30 \text{ К} \cdot \text{год}^{-1}$.

Перспективність використання швидкісних методів нагріву (наприклад, індукційного) в формуванні негетитного аустеніту показано авторами [5].

Аналіза результатів досліджень, наведених у літературі, свідчить, що питання щодо домінуючої ролі пластинчастого перліту в формуванні зернистого перліту залишаються дискусійними та потребують подальших досліджень [6]. Крім того, у аналізі процесів сфероїдизації цементиту не враховуються теплові ефекти, які виникають за $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення та можуть впливати на кінетику процесів [7, 8].

Залишаються нез'ясованими питання, пов'язані з впливом вмісту Карбону на розвиток процесів розпаду гомогенного аустеніту у перегрітих вуглецевих крицях з крупнозернистою вихідною структурою.

Мета даної роботи — дослідити морфологію частинок цементиту, утворених в результаті розпаду гомогенного аустеніту за неперервного охолодження перегрітих вуглецевих заевтектоїдних криць з різним вмістом Карбону (1,05–1,78 мас.%).

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліджували вуглецеві низьколеговані криці із заевтектоїдним вмістом Карбону — від 1,05 до 1,78 мас.%. Криці були витоплені індукційним методом у промислових умовах металургійних заводів. Вміст легувальних добавок (Mn, Si, Cu, Al) у крицях не перевищував 0,11 мас.%, а S і P — 0,01 мас.%. Шляхом гарячого вальцювання виливків з криць виготовляли листові полоси товщиною у 20–30 мм. Вихідна структура в гарячекатаних полосах криць — пластинчастий перліт з частинками надлишкового цементиту, які декорують межі зерен колишнього аустеніту. З листових полос механічним способом вирізали зразки розмірами $20 \times 20 \times 30 \text{ мм}$, які піддавалися термічному обробленню, що включало наступні операції (рис. 1):

- нагрів зразків криць до температури $t_{\text{н}} = 1150\text{--}1200^\circ\text{C}$ ($t_{\text{н}} = A_{\text{сн}} + 20\text{--}30^\circ\text{C}$ для криць з 1,78 мас.% C) з наступною витримкою у 1,5–2 години для формування у крицях хемічно гомогенного аустеніту;
- контрольоване охолодження нагрітих зразків до температури у 700°C зі швидкістю $V_{\text{ох.}} = 3,5\text{--}3 \text{ К} \cdot \text{хв.}^{-1}$, у подальшому — до 500°C зі

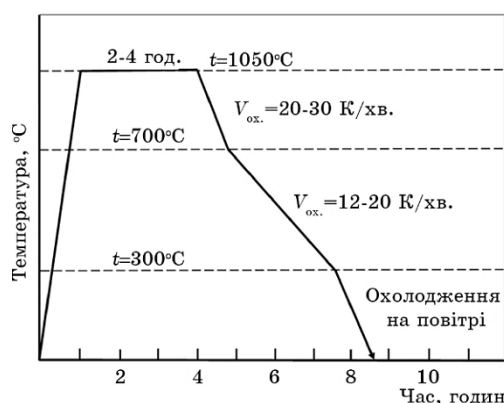


Рис. 1. Схема термічного оброблення криць.

Fig. 1. Scheme of heat treatment of steels.

швидкістю $V_{\text{ох.}} = 2-2,5 \text{ K} \cdot \text{хв.}^{-1}$, а до кімнатної температури — на повітрі.

Для запобігання окисненню та знеуглецюванню поверхні зразків термічне оброблення здійснювалось у вакуумній печі ($P \approx 10^{-2}$ атм).

Металографічні дослідження поверхні зразків криць, підготовлених за допомогою стандартних методик і прощавлених розчином пікринової кислоти з добавками поверхнево-активних речовин, здійснювалися за допомогою оптичного мікроскопу Neophot-32. Для обчислення розміру (середнього діаметра) частинок цементиту всередині зерен колишнього аустеніту використовувалося програмне забезпечення Image-Pro Plus.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Мікроструктури досліджуваних криць, що містять 1,05, 1,28 та 1,75% С Карбону, після відпалу за схемою рис. 1 показано на рис. 2. Видно, що у практично однакових умовах відпалу в крицях формуються структури, які відрізняються, зокрема, морфологією цементитних частинок. Загальним для криць з 1,05 і 1,28% С є те, що розпад аустеніту в них розпочинається з виділення надлишкового Карбону у вигляді цементитної сітки по межах зерен колишнього аустеніту. Внаслідок цього, концентрація Карбону в решті об'єму аустеніту з пониженням температури охолодження поступово зменшується до евтектоїдного значення (рис. 3). Тобто за евтектоїдної температури у крицях була сформована структура аустеніт+вторинний цементит на межах зерен колишнього аустеніту. З подальшим охолодженням відбувається розпад решти об'єму аустеніту з практич-

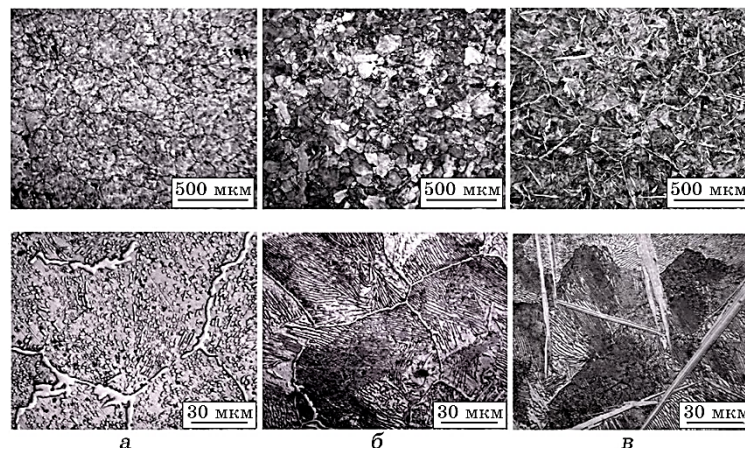


Рис. 2. Мікроструктури криць з вмістом Карбону у (мас.%) 1,05 (а), 1,28 (б) та 1,78 (в) після термічного оброблення.

Fig. 2. Microstructures of steels with carbon content (wt.%) of 1.05 (a), 1.28 (b) and 1.78 (c) after heat treatment.

но однаковим вмістом Карбону, близьким до евтектоїдного. Але, як свідчать результати металографічних досліджень, після охолодження криці з 1,05% С формується глобулярний перліт. Середній діаметр глобулярних цементитних частинок дорівнює $\approx 0,9$ мкм (рис. 4). Необхідно зауважити, що в структурі даної відпаленої криці спостерігається незначний вміст ($< 10\%$) цементитних частинок, які зберігають пластинчасту форму, що може свідчити про незавершеність процесів їхньої сфероїдизації.

У крицях з вищим вмістом Карбону (1,14, 1,28 і 1,4%) — пластинчастий перліт. Причина виникнення відмінності в морфології цементиту, на наш погляд, пов'язана з додатковим розігрівом криці під час розпаду аустеніту та розвитком процесів сфероїдизації пластинчастого перліту. Формування у криці з 1,05% С глобулярного перліту може свідчити про розвиток в процесі охолодження процесів сфероїдизації пластинчастого цементиту. Відомо, що процес розпаду аустеніту в заевтектоїдних крицях супроводжується виділенням тепла, внаслідок чого спостерігається розігрів криці, температура якого контролюється, в першу чергу, об'ємом аустенітної фази, що зазнає фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення. На можливість реалізації даної схеми перетворення пластинчастого цементиту в глобулярний в процесі охолодження заевтектоїдних криць вказується авторами [9]. Згідно з їхніми розрахунками, швидкість сфероїдизації збільшується з ростом температури нагріву за експоненціальним законом, що сприяє інтенсифікації дифузійних процесів перерозподілу Карбону та формуванню глобулярного цементиту за двоста-

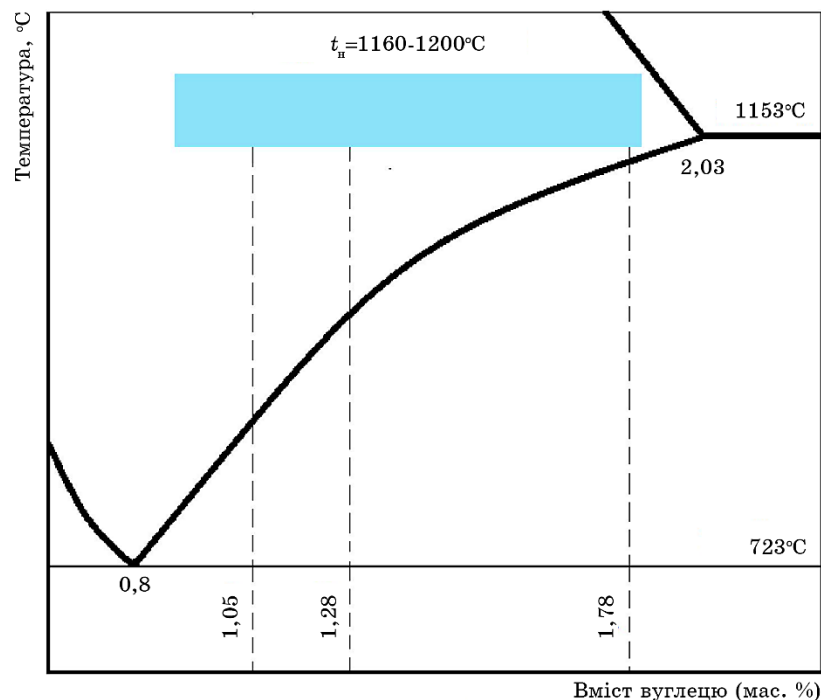


Рис. 3. Ділянка діаграми Fe-C із зазначеним положенням на ній досліджуваних криць.

Fig. 3. Section of the Fe-C diagram with the position of the studied steels on it.

дійною схемою. Спочатку в крицях утворюється пластинчастий перліт, який, внаслідок додаткового розігріву, що викликає розвиток сфероїдизаційних процесів, трансформується в глобулярний.

Із збільшенням вмісту Карбону в криці, а, значить, із зменшенням кількості аустенітної фази, що зазнає розпаду, виділеної теплової енергії недостатньо для розігріву криці. Внаслідок цього сфероїдизаційні процеси не розвиваються і пластинчаста форма цементиту залишається без змін, що і спостерігається за відпалу криць із вмістом Карбону більше 1,05%.

На відміну від криць з меншим (1,05 і 1,28%) вмістом Карбону в даних умовах відпалу в криці з 1,78% C формується структура, показана на рис. 3. В процесі охолодження від 1160°C внаслідок розпаду аустеніту відбувається виділення вторинного Відманштеттового цементиту не тільки по межах колишніх аустенітних зерен, а й у внутрішніх їхніх об'ємах. Середня товщина виділень цементиту — 2–5 мкм. Виділення мають ламінатну структуру та складаються з пластин цементиту товщиною $y \cong 0,3-0,5$ нм з різною кристалог-

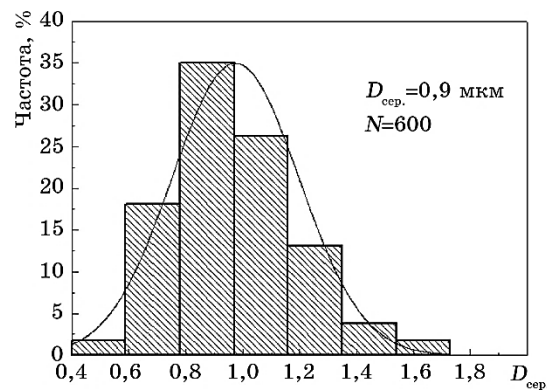


Рис. 4. Гістограма розподілу середнього діаметру глобул цементиту в термообробленій криці з 1,05% С.

Fig. 4. Histogram of the distribution of the average diameter of cementite globules in heat-treated steel with 1.05% C.

рафічною орієнтацією [10].

Необхідно зауважити, що, на відміну від Відманштеттового фериту в доевтектоїдних крицях, процеси формування Відманштеттового цементиту досліджено недостатньо повно. Вплив таких взаємозв'язаних чинників, як величина зерна аустеніту, швидкість охолодження, вміст Карбону, на формування Відманштеттових виділень (фериту, вторинного цементиту) докладно описано авторами [11]. Наявність у вуглецевих крицях виділень Відманштеттового цементиту тягне за собою погіршення пластичних характеристик криць, особливо в умовах динамічних навантажень. Вирішення проблеми впливу Відманштеттових виділень на розвиток процесів їхньої сфероїдизації потребує додаткових досліджень.

На підставі результатів дослідження морфології цементиту в заевтектоїдних вуглецевих крицях можуть бути надані рекомендації щодо режиму охолодження їх під час стикового зварювання залізничних рейок з метою запобігання формуванню в зоні термічного впливу структури зернистого перліту [12].

4. ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що вміст Карбону в заевтектоїдних вуглецевих крицях, а, відповідно, об'ємна доля аустеніту, що зазнає евтектоїдного $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення, здатні впливати на морфологію цементиту.
2. Показано, що в процесі охолодження криць, попередньо нагрітих до 1200–1150°C з витримкою у 2–3 години, до 700°C на межах зерен колишнього аустеніту відбувається виділення вторинного цементи-

ту, які декорують межі.

3. Формування зернистого перліту у внутрішніх об'ємах аустенітних зерен під час охолодження криці з 1,05% Карбону, можливо, пов'язане з розвитком процесів сфероїдизації пластинчастого цементиту, зумовлених додатковим підвищенням температури за рахунок теплового ефекту евтектоїдного розпаду аустеніту.

4. Допускаємо, що відсутність розвитку сфероїдизаційних процесів у крицях з більшим вмістом Карбону, а, відповідно, об'ємним вмістом аустеніту, пов'язана з недостатнім розігрівом криць.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. В. М. Счастливцев, А. А. Мирзаев, И. Л. Яковлева, *Перлит в углеродистых сталях* (Екатеринбург: 2006); V. M. Schastlivtsev, A. A. Mirzaev, and I. L. Yakovleva, *Perlit v Uglerodistykh Stalyakh* [Pearlite in Carbon Steels] (Ekaterinburg: 2006) (in Russian).
2. Н. Е. Долженков, *Теория и практика металлургии*, 2: 30 (2008); N. Ye. Dolzhenkov, *Teoriya i Praktika Metallurgii*, 2: 30 (2008) (in Russian).
3. В. В. Парусов, И. И. Долженков, В. И. Сухомлин, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 6: 6 (1985); V. V. Parusov, I. I. Dolzhenkov, and V. I. Sukhomlin, *Metal Science and Heat Treatment*, № 6: 6 (1985) (in Russian).
4. J. D. Verhoven and E. D. Gibson, *Metall. Mater. Trans. A*, 25, No. 4: 1180 (1998).
5. К. З. Шепеляковский, А. Г. Спектор, А. Н. Кузнецов, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 1: 62 (1978); K. Z. Shepelyakovsky, A. G. Spektor, and A. N. Kuznetsov, *Metal Science and Heat Treatment*, No. 1: 62 (1978) (in Russian).
6. А. А. Баранов, А. П. Геллер, В. Г. Конарев, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 6: 11 (1985); A. A. Baranov, A. P. Geller, and V. G. Konarev, *Metal Science and Heat Treatment*, No. 6: 11 (1985) (in Russian).
7. Л. Е. Попов, А. А. Попов, *Справочник термиста* (Москва: Металлургия: 1991); L. E. Popov and A. A. Popov, *Spravochnik Termista* [Heat-Treater's Handbook] (Moskva: Metallurgiya: 1991) (in Russian).
8. В. А. Лутенко, В. А. Маточкина, О. В. Лутенко, *Металлургическая и горнорудная промышленность*, № 4: 234 (2006); V. A. Lutsenko, V. A. Matochkina, and O. V. Lutsenko, *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost'*, № 4: 234 (2006) (in Russian).
9. В. В. Шкатов, А. П. Чернышов, *Физ. мет. металловед.*, № 10: 169 (1991); V. V. Shkatov and A. P. Chernyshov, *Fiz. Met. Metalloved.*, No. 10: 169 (1991) (in Russian).
10. I. A. Bataev, A. A. Bataev, V. G. Burov, Ya. S. Lizunkova, and E. E. Zakharevich, *Steel Trans.*, 38, No. 8: 684 (2008).
11. Р. П. Тодоров, Х. Г. Христов, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 2: 3 (2004); R. P. Todorov and H. G. Khristov, *Metal Science and Heat Treatment*, No. 2: 3 (2004).
12. L. Pintol, N. Goldenstein, and H. Goldenstein, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 71: 815 (2019).