

Кристалогеометричні особливості будови литої та нормалізованої сталі з ферито-перлітною структурою

А. Ю. Борисенко, кандидат технічних наук, asbor@ua.fm

Г. В. Левченко, доктор технічних наук, професор, завідувач лабораторії

В. М. Ткач*, доктор технічних наук

Т. О. Зайцева**

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

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ

**Національна металургійна академія України, Дніпро

За допомогою методу EBSD вивчені кристалогеометричні особливості будови литої та нормалізованої сталі з 0,62 % С. Показано успадкований зв'язок утворення перлітної та ферито-перлітної структури з будовою міжкристалітних границь у литій та нормалізованій сталі. Встановлено, що аустеніт литої та нормалізованої сталі зазнає пластичної деформації за механізмами ковзання, двійникування та зернограничного проковзування. У литій сталі формується 72 % малокутових (3...15 °С) і 28 % великокутових (20...60 °С) міжкристалітних границь. Нормалізація литої сталі сприяє утворенню 23 % малокутових (5...15 °С) і 77 % великокутових (20...60 °С) міжкристалітних границь. Після нормалізації сталі відносно її литого стану збільшується кількість спеціальних границь $\Sigma 3... \Sigma 13$ від $\approx 1\%$ до 7%. Кількість спеціальних границь є близькою до кількості доєвтектоїдного фериту в литій та нормалізованій сталі.

Ключові слова: *сталь, нормалізація, структура, деформація, структурна спадковість.*

Відомо, що термічна обробка за режимом нормалізації подрібнює мікроструктуру та підвищує механічні властивості литої сталі [1]. Незважаючи на велике практичне значення застосування нормалізації для поліпшення мікроструктури та механічних властивостей литої сталі, опис процесів структуроутворення, що при цьому відбувається, досить обмежений [2]. Зокрема, немає експериментальних даних щодо кристалогеометричних особливостей будови литої сталі та їх змін за умов нормалізації. Ці дані є необхідними для розвитку теорії та практики керування формуванням структури литої сталі, що спадково впливає на її мікроструктуру та механічні властивості після термічної обробки [3]. У зв'язку з цим метою роботи було за допомогою сучасного методу дослідження матеріалів – дифракції відбитих електронів (EBSD) вивчити кристалогеометричні особливості будови сталі в литому та нормалізованому стані та встановити їх зв'язок з відповідними процесами структуроутворення.

Дослідження виконані на зразках високовуглецевої доєвтектоїдної сталі промислового способу виробництва після переплавлення в

Фазові перетворення

лабораторних умовах. Хімічний склад сталі: 0,62 % С; 0,32 % Si; 0,60 % Mn; 0,008 % P і 0,011 % S. Від донної частини зливка діаметром 20 мм і висотою 25 мм вирізано та розділено навпіл диск товщиною 3 мм. Одна половина диска слугувала зразком для дослідження сталі в литому стані, інша – після її нормалізації за режимом: нагрів до 860 °С, витримка 15 хвилин і охолодження на повітрі. Визначення кристалогеометричних особливостей будови виготовлених таким способом зразків здійснювали за допомогою мікроскопа ZEISS EVO 50XVP виробництва компанії ZEISS, укомплектованого системою HKL CHANNEL-5 для дифракції відбитих електронів компанії OXFORD INSTRUMENTS.

Аналіз прямих і обернених полюсних фігур, отриманих методом EBSD (рис. 1 а, б), та їх інтерпретація з використанням літературних джерел [4, 5] показують наявність у литій сталі переважаючої кристалографічної текстури $\langle 100 \rangle$, яка формується в результаті кристалізації металів з кубичною граткою. Кінцева структура сталі після кристалізації та перетворення аустеніту складається практично з 100 % перліту з окремими ділянками доєвтектоїдного фериту (рис. 1 в). Малорозсіяні піки великої інтенсивності на прямих полюсних фігурах (рис. 1 а), згідно з роботою [5], свідчать про те, що лита сталь при охолодженні зазнала кристалографічно регламентованої пластичної деформації за механізмом ковзання та двійникування. На основі цього можна уявити, що виникнення кристалітів з різним ступенем розорієнтації, виявлених методом EBSD (рис. 1 г), в кінцевій перлітній структурі литої сталі зумовлено пластичною деформацією аустеніту до та

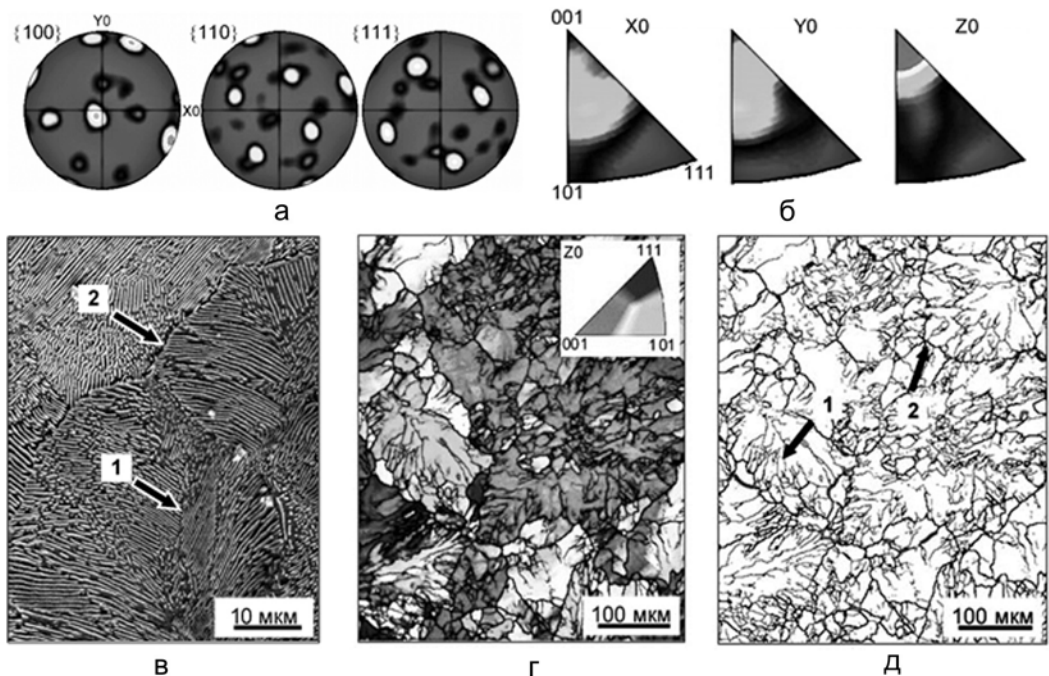


Рис. 1. Дані EBSD аналізу (а, б, г, д) та типова мікроструктура (в) литої сталі: а – прямі полюсні фігури; б – обернені полюсні фігури; г – кристалографічна орієнтація; д – міжкристалітні границі: 1 – малокутові; 2 – великокутові.

Фазові перетворення

під час перлітного перетворення під дією внутрішніх напружень різного походження.

Формування дезорієнтованих областей з добре вираженими кристалографічними орієнтуваннями (111), (101) і (001) – вочевидь є наслідком деформації первинного аустеніту під дією ливарних напружень, що фрагментують його зерна [6]. У межах цих областей спостерігається слабка розорієнтація кристалітів, спричинена, скоріше за все, перлітним перетворенням під дією термічних напружень [7]. Розподіл кристалітів, визначених методом EBSD, за розмірами, середня величина яких 9,4 мкм, наведено на рис. 2 а.

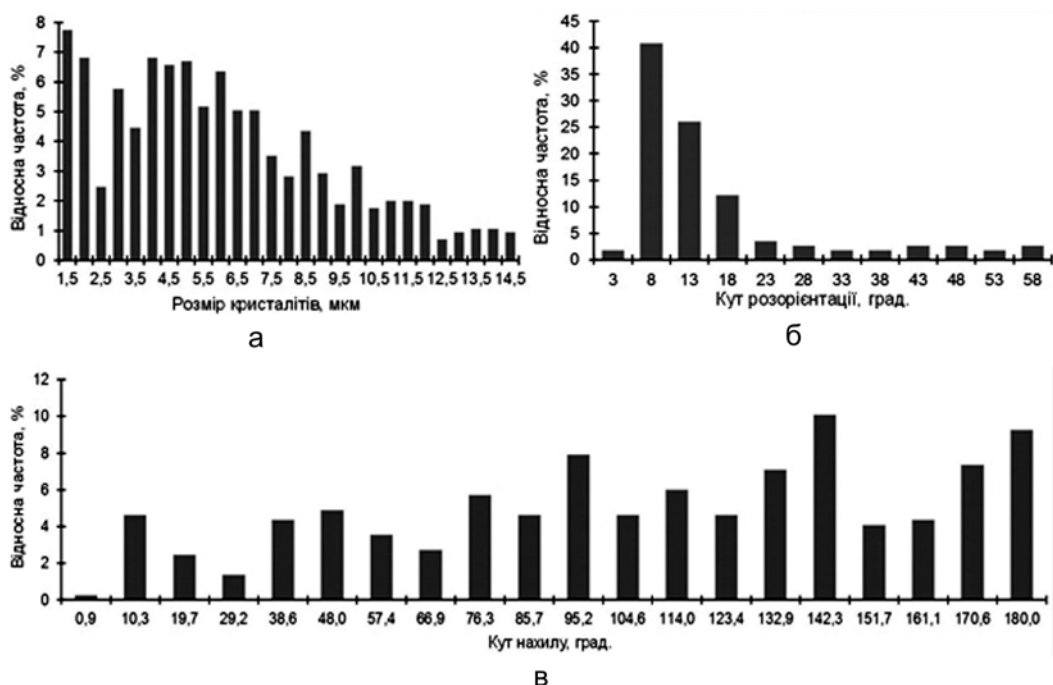


Рис. 2. Гістограми розподілу розмірів кристалітів (а), кутів розорієнтації (б) та кутів нахилу (в) міжкристалітних границь, визначених за методом EBSD у мікроструктурі литої сталі.

Ідентифікація міжкристалітних границь у литій сталі (рис. 1 д, 2 б) показала, що в межах областей з орієнтуваннями (111), (101), (001) та близьких до них формуються переважно (72 %) малокутові границі з кутами розорієнтації перлітних колоній 9...15 °С. Сполучення зустрічних фронтів зростання перлітних колоній, що належать до областей з вираженою різницею в кристалографічних орієнтуваннях, сприяє утворенню великокутових границь (28 %) з кутами розорієнтації 20...60 °С, які при 36...60 °С мають спеціальну будову $\Sigma 3... \Sigma 13$ в концепції ґраток співпадаючих вузлів [8]. Зі збільшенням кута розорієнтації кількість спеціальних границь зростає. Визначена автоматичним методом аналізу зображень кількість спеціальних границь без розділення їх за значеннями Σ складає менше 1 % щодо загального числа всіх ідентифікованих міжкристалітних границь. Утворення спеціальних границь, однак, відбувається лише в деяких випадках

при сполученні перлітних колоній, що належать частіше за все областям з добре вираженою різницею в кристалографічних орієнтуваннях. При цьому часто вздовж одної великокутової границі спостерігаються різні значення Σ . Для встановлення причин такого нерівномірного утворення та різної будови спеціальних границь необхідні подальші дослідження.

За допомогою методу EBSD також встановлена полімодальність розподілу кутів нахилу міжкристалітних границь у перлітній структурі литої сталі (рис. 2 в), що разом з полімодальним і логнормальним розподілом розмірів кристалітів і кутів їх розорієнтації (рис. 2 а, б) свідчить про існування періодично повторюваних різних умов утворення перліту та, як наслідок, – його міжкристалітних границь. Найбільш ймовірною причиною цього є неоднорідний розподіл хімічних елементів в аустеніті литої сталі, спричинений дендритною ліквідацією. Формування у відповідності до дендритної будови періодично повторюваних збіднених і збагачених домішковими елементами осьових та міждендритних ділянок аустеніту визначає особливості його перетворення на перліт і спричиненої цим будови міжкристалітних границь. Вочевидь, що й сам середньомасовий хімічний склад сталі впливає на кристалогеометричні особливості будови перліту, що необхідно враховувати при екстраполяції результатів даної роботи на сталі іншого хімічного складу. Про це свідчать дані роботи [9], в якій для сталі марки У8 методом просвічувальної електронної мікроскопії встановлено менші, ніж для досліджуваної нами сталі, значення кутів розорієнтації міжкристалітних границь у перліті: 3...10 °С – між субколоніями (за термінологією Л. Г. Тушинського) та понад 10 °С – між колоніями.

Прямі та обернені полюсні фігури, отримані методом EBSD від зразка литої сталі після нормалізації, показують (рис. 3 а, б) суттєве розсіювання текстури у порівнянні з її вихідним литим станом. Розмиття полюсних фігур указує на здійснення та превалюючий вплив на структуроутворення при фазовій перекристалізації литої сталі некристалографічно регламентованого механізму деформації аустеніту – зернограничного проковзування [5]. Разом з тим наявність гострих піків великої інтенсивності на тлі розсіяної текстури (рис. 3 а) вказують і про існування кристалографічно впорядкованих механізмів деформації аустеніту – ковзання та двійникування. Висока інтенсивність і зміщення полюсної щільності до напрямку $\langle 111 \rangle$ на обернених полюсних фігурах (рис. 3 б) говорять також про внутрішньозеренне ковзання та утворення вздовж цього напрямку спеціальних границь [5], наявність яких підтверджується даними EBSD аналізу. Мікроструктура литої сталі після нормалізації ферито-перлітна (рис. 3 в); кількість доєвтектоїдного фериту, визначеного автоматичним методом аналізу зображень – 7,5 %.

Деформація аустеніту за вказаними вище механізмами під дією термічних і фазових напружень [10], що виникають у випадку одного термоциклу – нагріву та охолодження – при нормалізації, підсилює розорієнтацію кристалітів (рис. 3 г), змінює вигляд їх розподілу (рис. 4 а) та значно збільшує кількість великокутових міжкристалітних границь (рис. 4 б), що співпадають за розташуванням з доєвтектоїдним феритом.

Фазові перетворення

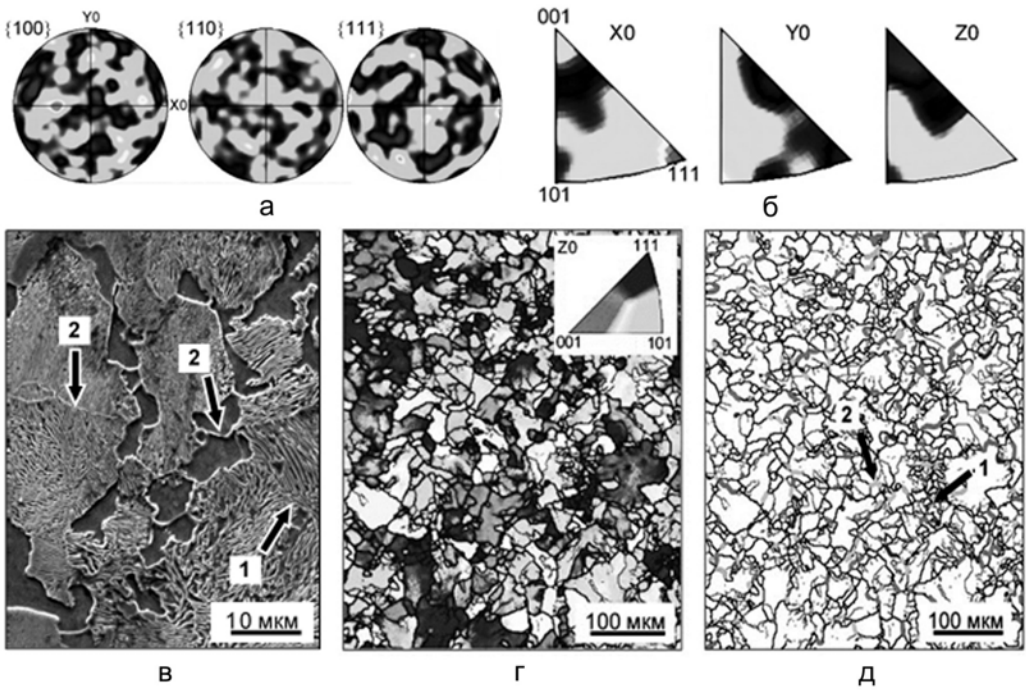


Рис. 3. Дані EBSD аналізу (а, б, г, д) та типова мікроструктура (в) литої сталі після нормалізації: а – прямі полюсні фігури; б – обернені полюсні фігури; г – кристалографічна орієнтація; д – міжкристалітні границі: 1 – малокутові; 2 – великокутові.

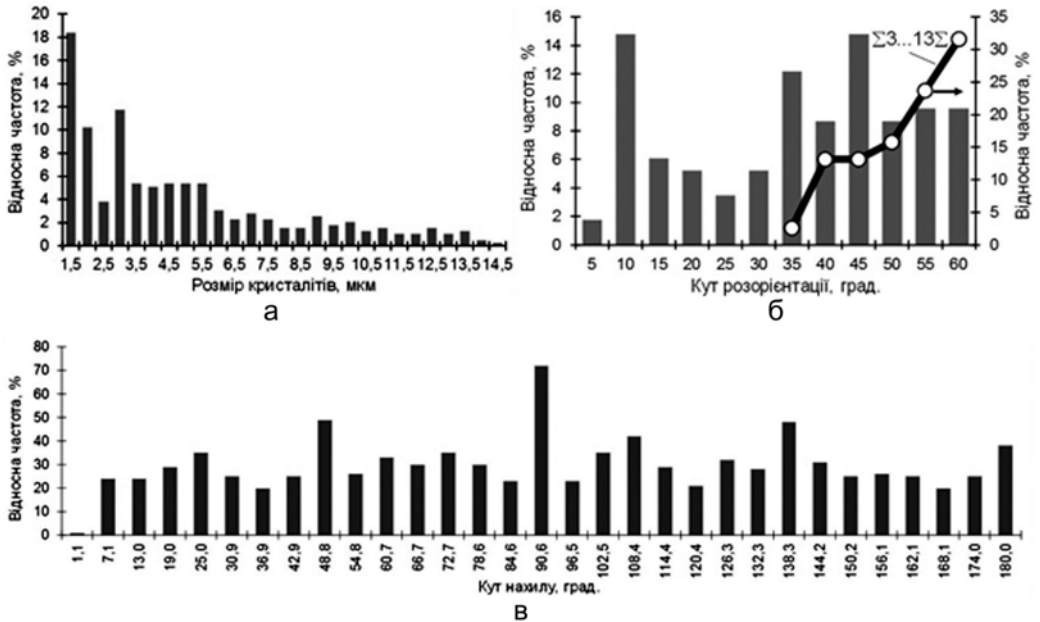


Рис. 4. Гістограми розподілу розмірів кристалітів (а), кутів розорієнтації (б) та кутів нахилу (в) міжкристалітних границь, визначених методом EBSD у мікроструктурі литої сталі після нормалізації.

Кількість малокутових (5...15 °С) і великокутових (20...60 °С) міжкристалітних границь відповідно складала 23 % і 77 %. Середній розмір

кристалітів, який згідно з даними EBSD склав 8,8 мкм, після нормалізації мало змінився у порівнянні з литим станом. З цього виходить, що кількість міжкристалітних границь у ферито-перлітній структурі нормалізованої сталі, відносно яких визначається розмір кристалітів, залишилась близькою до кількості міжкристалітних границь у перлітній структурі литої сталі. Однак змінилась їх будова внаслідок зернограничного проковзування, при якому, згідно з даними роботи [8], в існуючих міжкристалітних границях зростає кількість дислокацій за рахунок їх стоку при внутрішньозеренному ковзанні.

Ці, а також результати високотемпературних металографічних досліджень [11] і вивчення проблеми структурної спадковості в сталі [12] свідчать про те, що після нагріву до температур нормалізації в аустеніті сталі з вихідною перлітною або ферито-перлітною структурою зберігаються міжкристалітні границі, сформовані в результаті перлітного перетворення. З цього можна зробити висновок, що деформація аустеніту за механізмом зернограничного проковзування при фазовій перекристалізації здійснюється по нерекристалізованих міжкристалітних границях колишньої перлітної структури. У результаті цього відбуваються їх якісні зміни в напрямі збільшення кутів розорієнтації за рахунок підвищення в них кількості дислокацій. Гістограма розподілу кутів розорієнтації кристалітів набуває полімодального вигляду зі збереженням логнормального характеру розподілу в області малих кутів, подібно до литого стану, та появою моди в області великих кутів (рис. 4 б). Нормалізація литої сталі не усуває полімодальний розподіл кутів нахилу міжкристалітних границь, який, однак, на відміну від литої сталі має більш симетричний вигляд (рис. 4 в). Це свідчить про те, що після нормалізації зберігається неоднорідність хімічного складу аустеніту, притаманна литій сталі, але підвищується його структурна однорідність внаслідок збільшення кількості та рівномірності розподілу великокутових міжкристалітних границь.

Важливим наслідком підвищення кристаліграфічної розорієнтації міжкристалітних границь в аустеніті є збільшення місць зародження доевтектоїдного фериту, який підвищує пластичність сталі. Утворення доевтектоїдного фериту, згідно з даними EBSD аналізу, пов'язане з виникненням 35...60-градусних великокутових міжкристалітних границь спеціального типу $\Sigma 3... \Sigma 13$. Нормалізація литої сталі порівняно з литим станом значно збільшує кількість спеціальних границь $\Sigma 3... \Sigma 13$ (рис. 3 д, 4 б), частка яких визначена автоматичним методом аналізу зображень, для досліджуваної сталі складає майже 7 % від загальної кількості всіх міжкристалітних границь. Це значення є близьким до значення вмісту доевтектоїдного фериту (7,5 %) в сталі після нормалізації. Зі збільшенням кута розорієнтації кристалітів від 35 °С до 60 °С відносна кількість спеціальних границь зростає від ≈ 3 до 32 % (рис. 4 б). Оскільки спеціальні границі мають кристаліграфічно впорядковану будову [8], то їх зв'язок з доевтектоїдним феритом свідчить про кристаліграфічно впорядкований механізм утворення останнього.

Результати роботи дозволяють зробити важливий практичний висновок – керуючи механізмом утворення перліту та його міжкристалітних

границь у литій сталі, можна впливати на співвідношення кількості фериту та перліту, а, отже, на її механічні властивості після нормалізації. Відоме ж підвищення рівномірності ферито-перлітної структури та пов'язаних з цим механічних властивостей сталі після нормалізації відбувається за рахунок збільшення кількості міжкристалітних границь, що утворюють доєвтектоїдний ферит у місцях сполучення перлітних колоній, які існували раніше. Результати виконаних досліджень також прояснюють причини спадкового зв'язку процесів структуроутворення при кристалізації та наступній термічній обробці сталі, який показано у роботі [3] та інших.

Література

1. Гуляев А.П. *Металловедение*. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Новиков И.И. *Теория термической обработки металлов*. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.
3. Кондратюк С.Є. *Структуроутворення, спадковість і властивості литої сталі*. – К.: Наук. думка, 2010. – 175 с.
4. Вассерман Г., Гревен И. *Текстуры металлических материалов*. – М.: Металлургия, 1969. – 655 с.
5. Варюхин В.Н., Пашинская Е.Г., Завдоев А.В., Бурховецкий В.В. *Возможности метода дифракции обратнорассеянных электронов для анализа структуры деформированных металлов*. – К.: Наукова думка, 2014. – 103 с.
6. Борисенко А.Ю., Кононенко А.А., Бабаченко А.И., Науменко Л.Д. *Микроструктурные исследования формирования первичного зерна аустенита после кристаллизации углеродистых сталей с 0,5 – 0,7 % С // Доповіді НАН України*. – 2010. – № 9. – С. 70 – 77.
7. Борисенко А., Шаповалов В. *Особенности эвтектоидного превращения в системах Fe–C и Fe–N / V Міжнародна конференція «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій»: тези доповіді, 24 – 27 червня 2014 р.* – Львів, 2014. – С. 641 – 646.
8. Кайбышев О.А., Валиев Р.З. *Границы зерен и свойства металлов*. – М.: Металлургия, 1987. – 214 с.
9. Тушинский Л.И. *Теория и технология упрочнения металлических сплавов*. – Новосибирск: Наука, 1990. – 306 с.
10. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. *Термоциклическая обработка металлов и деталей машин*. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.
11. Лозинский М.Г. *Высокотемпературная металлография*. – М.: МАШГИЗ, 1956. – 312 с.
12. Садовский В.Д. *Структурная наследственность в стали*. – М.: Металлургия, 1973. – 208 с.

References

1. Gulyayev A.P. *Metallovedeniye* (Metallurgy), Moskva: Metallurgiya, 1986, 544 p. [in Russian].
2. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* (The Theory of Heat Treatment of Metals), Moskva: Metallurgiya, 1978, 392 p. [in Russian].
3. Kondratyuk S.Ye. *Strukturoutvorennya, spadkovist i vlastyvosti lytoyi stali*, (Structure Formation, Heredity and Properties of Cast Steel), Kyiv: Naukova dumka, 2010, 175 p. [in Ukraine].

4. Vasserman G., Greven I. *Tekstury metallicheskih materialov* (Textures of metallic materials), Moskva: Metallurgiya, 1969, 655 p. [in Russian].
5. Varyukhin V.N., Pashinskaya Ye.G., Zhdovveyev A.V., Burkhovetskiy V.V. *Vozmozhnosti metoda difraktsii obratnorasseyannykh elektronov dlya analiza struktury deformirovannykh metallov* (The Potential of Backscattered Electron Diffraction Method for Analyzing the Structure of Deformed Metals), Kyiv: Naukova dumka, 2014, 175 p. [in Russian].
6. Borisenko A.Yu., Kononenko A.A., Babachenko A.I., Naumenko L.D. *Dopovidi NAN Ukraïny*, 2010. № 9, pp. 70-77 [in Russian].
7. Borysenko A., Shapovalov V. *Mekhanika ruynuvannya materialiv i mitsnisti konstruktsiy* (Mechanics of material destruction and structural strength), Lviv, 2014, pp. 641-646 [in Russian].
8. Kaybyshev O.A., Valiyev R.Z. *Granitsy zeren i svoystva metallov* (Grain Boundaries and Metal Properties), Moskva: Metallurgiya, 1987, 214 p. [in Russian].
9. Tushinskiy L.I. *Teoriya i tekhnologiya uprochneniya metallicheskih splavov* (Theory and Technology of Metal Alloys Hardening), Novosibirsk: Nauka, 1990, 306 p. [in Russian].
10. Feduykin V.K., Smagorinskiy M.Ye. *Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detaley mashin* (Thermocyclic Treatment of Metals and Machine Parts), Leningrad: Mashinostroyeniye, 1989, 255 p. [in Russian].
11. Lozinskiy M.G. *Vysokotemperaturnaya metallografiya* (High Temperature Metallography), Moskva: MASHGIZ, 1956, 312 p. [in Russian].
12. Sadovskiy V.D. *Strukturnaya nasledstvennost v stali* (Structural Heredity of Steel), Moskva: Metallurgiya, 1973, 208p. [in Russian].

Одержано 05.02.19

А. Ю. Борисенко, Г. В. Левченко, В. Н. Ткач, Т. А. Зайцева

Кристаллогеометрические особенности строения литой и нормализованной стали с феррито-перлитной структурой

Резюме

С помощью метода EBSD изучены кристаллогеометрические особенности строения литой и нормализованной стали с 0,62 % С. Показана наследственная связь образования перлитной и ферритно-перлитной структуры со строением межкристаллитных границ в литой и нормализованной стали. Установлено, что аустенит литой и нормализованной стали испытывает пластическую деформацию по механизмам скольжения, двойникования и зернограничного проскальзывания. В литой стали формируется 72 % малоугловых (3...15 °С) и 28 % большеугловых (20...60 °С) межкристаллитных границ. Нормализация литой стали способствует образованию 23 % малоугловых (5...15 °С) и 77 % большеугловых (20...60 °С) межкристаллитных границ. После нормализации стали относительно ее литого состояния увеличивается количество специальных границ $\Sigma 3... \Sigma 13$ от ≈ 1 % до 7 %. Количество специальных границ близко к количеству доэвтектоидного феррита в литой и нормализованной стали.

Ключевые слова: сталь, нормализация, структура, деформация, структурная наследственность.

A. Yu. Borisenko, G. V. Levchenko, V. N. Tkach, T. A. Zaitseva

Crystal-geometrical features of the structure of cast and normalized steel with a ferrite-pearlite structure

Summary

Crystal-geometrical features of the structure of cast and normalized steel with 0.62 % of C content were studied using EBSD method. Inheritance link between the formation of pearlitic and ferritic-pearlitic structures with the structure of intercrystalline boundaries in cast and normalized steel were demonstrated. It was found that the austenite of cast and normalized steel undergoes plastic deformation in conformity with the mechanisms of sliding, twinning and grain boundary slippage. 72 % of low-angle (3... 15 °C) and 28 % of high-angle (20...60 °C) intercrystalline boundaries are formed in cast steel. Normalization of cast steel leads to the formation of 23 % low-angle (5...15 °C) and 77 % high-angle (20...60 °C) intercrystalline boundaries. After normalization of steel the number of special boundaries $\Sigma 3... \Sigma 13$ increases from ≈ 1 % to 7 % comparing to its cast state. The number of special boundaries is approximating the number of proeutectoid ferrite in cast and normalized steel.

Keywords: steel, structure, normalization, deformation, structural heredity.

УДК 621.746.68:669.15'26:621.785.5

*Фазові перетворення аустенітних
неіржавіючих модифікованих сталей*

Є. Г. Афтандіянц, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства, aftyev@yahoo.com

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

Наведено результати досліджень з використанням множинного регресійного аналізу впливу додаткового легування церієм, ванадієм, міддю та бором на температури початку та закінчення фазового $\delta \rightarrow \gamma$ перетворення, вміст фериту та аустеніту у структурі литої сталі та після її гартування, розмір зерна аустеніту, енергію зв'язку атомів легуючих елементів з границею зерна. Встановлено кількісні закономірності такого впливу.

Ключові слова: сталь, комплексне легування, аустеніт, фазові перетворення, множинний регресійний аналіз.

Перспективним щодо підвищення структурно чутливих і експлуатаційних властивостей аустенітних неіржавіючих сталей може бути розроблення ефективних режимів модифікування, мікролегування і термічної обробки на основі закономірностей впливу таких елементів як церій, ванадій, мідь і бор на фазові перетворення досліджуваних сталей.

Сталь базового хімічного складу (сталь 1) містить 0,1 % С (мас. частка, %); 1 % Si; 1.5 % Mn; 18 % Cr; 10 % Ni; 0.5 % Ti; 3 % Mo; 0.03 % P; 0.03 % S; 0.03 % N; 0.2 % Cu; 0.02 % O.