

НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 669.112.227.3

ИГОЛЬЧАТЫЙ ФЕРРИТ

БОЛЬШАКОВ В. И., *д. т. н., проф.*

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24 а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

Аннотация. Промежуточное превращение аустенита развивается в интервале температур между областями перлитного и мартенситного превращений [4]. При непрерывном охлаждении стали со скоростями ниже критической, но выше тех, которые необходимы для распада аустенита по диффузионному механизму, возможно образование смеси, состоящей из различных типов структур, идентификация которых не всегда оказывается однозначной. Это привело к возникновению различных систем классификации микроструктур низкоуглеродистых сталей после ускоренного охлаждения и отсутствию единой терминологии, касающейся продуктов распада аустенита [3; 5 – 11].

В современной терминологии все системы классификаций продуктов промежуточного превращения основаны на дифференциации по следующим признакам: морфологии ферритной составляющей бейнита (реечная или пластинчатая), присутствию выделений карбидов железа, их распределению и морфологии, а также наличию или отсутствию остаточного аустенита или мартенситно-аустенитной смеси. Идентификация продуктов промежуточного превращения не по морфологии ферритной составляющей, а по другим признакам при помощи световой микроскопии крайне сложна, а в некоторых случаях и невозможна из-за ограниченной разрешающей способности светового микроскопа, поэтому для этих целей необходимо применять метод просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг.

Электронномикроскопические исследования показывают, что в низкоуглеродистых сталях пластинчатая морфология промежуточных продуктов распада аустенита встречается крайне редко, что подтверждается данными зарубежных авторов [2; 7; 9; 10].

Ключевые слова: морфология ферритной составляющей бейнита, игольчатый феррит, сверхуглеродистые стали, классификация Омори, промежуточное превращение

ГОЛЧАСТЫЙ ФЕРРИТ

БОЛЬШАКОВ В. И., *д. т. н., проф.*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24 а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

Анотация. Проміжне перетворення аустеніту розвивається в інтервалі температур між областями перлітного і мартенситного перетворень [4]. У випадку безперервного охолодження сталі зі швидкостями нижче критичної, але вище тих, які необхідні для розпаду аустеніту за дифузійним механізмом, можливе утворення суміші, що складається з різних типів структур, ідентифікація яких не завжди виявляється однозначною. Це спричинило виникнення різних систем класифікації микроструктур низьковуглецевих сталей після прискореного охолодження і відсутність єдиної термінології, що стосується продуктів розпаду аустеніту [3; 5 – 11].

У сучасній термінології всі системи класифікацій продуктів проміжного перетворення засновані на диференціації за такими ознаками морфології феритної складової бейніту (рейкова або пластинчаста), присутності виділень карбідів заліза, їх розподілу та морфології, а також наявності або відсутності залишкового аустеніту або мартенситно-аустенітної суміші. Ідентифікація продуктів проміжного перетворення не за морфологією феритної складової, а за іншими ознаками за допомогою світлової микроскопії, вкрай складна, а в деяких випадках і неможлива через обмежену роздільну здатність світлового микроскопа, тому для цих цілей необхідно застосовувати метод просвічувальної електронної микроскопії тонкої фольги.

Електронномікроскопічні дослідження показують, що в низьковуглецевих сталях пластинчаста морфологія проміжних продуктів розпаду аустеніту зустрічається вкрай рідко, що підтверджується даними зарубіжних авторів [2; 7; 9; 10].

Ключові слова: морфологія феритної складової бейніту, голчастий феррит, надвуглецеві сталі, класифікація Омори, проміжне перетворення

ACICULAR FERRITE

BOLSHAKOV V. I., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Department of Materials and Materials Processing, State Higher Educational Establishment «Prydneprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, Tel. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

Annotation. Intermediate austenite transformation develops in the temperature between the regions pearlitic and martensitic transformation [4]. Under continuous cooling steel at speeds below the critical value, but higher than those necessary for the decomposition of austenite by the diffusion mechanism, the formation of a mixture of different types of structures whose identification is not always unambiguous. This resulted in a different classification systems of microstructures of low-carbon steel after accelerated cooling and the absence of a common terminology relating to the products of austenite decomposition [3; 5 – 11].

In modern terminology, all of the intermediate transformation product classifications based on the differentiation of the following features – the morphology of bainite ferrite component (rack or plate), the presence of iron carbide precipitates, their distribution and morphology, as well as the presence or absence of residual austenite or martensite-austenite mixture. Identification of the products of the intermediate conversion not morphology ferrite component, and other characteristics by light microscopy is extremely difficult, and in some instances impossible due to the limited resolution of the light microscope, so for these purposes should be to use the method of transmission electron microscopy of thin foils.

Electron microscopy studies show that low-carbon steels lamellar morphology of intermediate products decomposition of austenite is extremely rare, which is confirmed by foreign authors [2; 7; 9; 10].

Key words: *morphology of the ferrite component bainite, acicular ferrite, sverhuglerodistye steel classification Omori, intermediate conversion*

Промежуточное превращение аустенита развивается в интервале температур между областями перлитного и мартенситного превращений [4]. При непрерывном охлаждении стали со скоростями ниже критической, но выше тех, которые необходимы для распада аустенита по диффузионному механизму, возможно образование смеси, состоящей из различных типов структур, идентификация которых не всегда оказывается однозначной. Это привело к возникновению различных систем классификации микроструктур низкоуглеродистых сталей после ускоренного охлаждения и отсутствию единой терминологии, касающейся продуктов распада аустенита [3; 5 – 11].

В современной терминологии все системы классификаций продуктов промежуточного превращения основаны на дифференциации по следующим признакам: морфологии ферритной составляющей бейнита (реечная или пластинчатая), присутствию выделений карбидов железа, их распределению и морфологии, а также наличию или отсутствию остаточного аустенита или мартенсито-аустенитной смеси. Идентификация продуктов промежуточного превращения не по морфологии ферритной составляющей, а по другим признакам, при помощи световой микроскопии крайне

сложна, а в некоторых случаях и невозможна из-за ограниченной разрешающей способности светового микроскопа, поэтому для этих целей необходимо применять метод просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг.

Электронномикроскопические исследования показывают, что в низкоуглеродистых сталях пластинчатая морфология промежуточных продуктов распада аустенита встречается крайне редко, что подтверждается данными зарубежных авторов [2; 7; 9; 10]. Появление же пластинчатой морфологии вероятнее всего связано с локальными сегрегациями легирующих элементов и, в частности, углерода, которые смещают критические точки фазовых превращений.

В соответствии с данными работ [2; 12; 14; 15] при промышленных скоростях охлаждения низкоуглеродистых конструкционных сталей возможно образование структуры игольчатого феррита, перспективной с точки зрения получения высокого комплекса механических и эксплуатационных свойств. В классической монографии «Превращение в железе и стали» [16] указывалось, что игольчатый феррит имеет «перистую» морфологию верхнего бейнита, образуется в верхней температурной области промежуточного превращения и не со-

держит карбидов. В работах проф. В. И. Большакова с сотрудниками под термином «игольчатый феррит» подразумевается пакетная структура, состоящая из реек бейнитного феррита, при практически полном отсутствии цементитных частиц как внутри реек, так и по их границам [2; 12; 13; 17; 18]. Подобная трактовка структуры игольчатого феррита принята и большинством зарубежных исследователей [7; 10; 19].

Сравнение структуры игольчатого феррита с наиболее распространенными классификационными системами продуктов бейнитного превращения показало, что в первой классификационной системе, разработанной Мейлом [20], было предложено разделение только на верхний и нижний бейниты. В этой системе не предусмотрен отдельный термин для структуры без выделения карбидов железа, как в нашем случае. Система классификации Ааронсона [6] признает бейнитом шесть морфологических сочетаний феррита и цементита, но также не предусматривает бескарбидных продуктов промежуточного превращения. Таким образом, эти две системы не в полной мере подходят для классификации бейнитных структур в низкоуглеродистых и современных сверхнизкоуглеродистых сталях, в которых могут присутствовать продукты промежуточного превращения, не содержащие карбидов.

Система классификации Омори [10; 21] принимает разделение бейнита на верхний и нижний, но, в свою очередь, выделяет три типа верхнего бейнита. Игольчатый феррит (бескарбидный реечный бейнит) в соответствии с этой системой получил название VI. Согласно Омори, существует другая сходная структура бейнита с прерывистыми выделениями остаточного аустенита по границам реек. Этот тип получил маркировку VII, причем температурный диапазон формирования этого вида бейнита находится ниже бескарбидного VI.

В классификации Брамфитта и Спира [7] игольчатый феррит по морфологии идентичен принятому нами, а именно, пакетная структура, состоящая из бескарбидных ферритных реек. Согласно этой системе, рееч-

ный (верхний) бейнит может иметь еще три морфологии. В частности, найденный нами игольчатый феррит с выделениями прослоек остаточного аустенита между рейками классифицируется как B^a_2 .

Исследования ряда низкоуглеродистых и ультранизкоуглеродистых сталей, произведенные в Японском институте железа и стали, привели к созданию сложной системы классификации ферритных структур, в соответствии с которой игольчатый феррит получил название «бейнитный феррит» и аббревиатуру a_B^0 [8; 22].

В монографии Бхадешиа [3] применяется терминология, разделяющая бейнит на верхний и нижний, но допускается, что между рейками в пакете верхнего бейнита не обязательно выделение карбидов железа, а возможно наличие остаточного аустенита, мартенсита либо полное отсутствие каких-либо выделений.

В некоторых работах, в частности, в упомянутой выше монографии [3], термин «игольчатый феррит» используется для идентификации промежуточной структуры, в которой смежные игольчатые ферритные кристаллы не параллельны и не объединены в пакеты, что является следствием зарождения игл бейнитного феррита на оксидных, карбидных и нитридных частицах, распределенных по металлу [3; 23; 24]. Таким образом, Бхадешиа с сотрудниками, а также ряд других исследователей расценивают внутризеренное образование зародышей как главную характеристику игольчатого феррита. Обычно эта классификация распространена для структур, образовавшихся в сварных швах при сварке [25].

Вывод. Таким образом, в настоящее время терминологическая система микроструктур промежуточного превращения окончательно еще не сформировалась и нуждается в дальнейшем совершенствовании. Однако анализ различных классификационных систем, применяемых для идентификации продуктов промежуточного превращения, и сопоставление наших и зарубежных микроскопических исследований позволили принять позицию, что игольчатым ферритом следует называть пакетную структуру, со-

стоящую из реек бейнитного феррита, при практически полном отсутствии цементитных выделений как внутри реек, так и по их границам.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков В. И. Игольчатый феррит строительных сталей : монография / В. И. Большаков, В. И. Куксенко. – Днепропетровск : ПГАСА, 2012. – 134 с.
2. Большаков Вад. И. Особенности развития черной металлургии Украины / Вад. И. Большаков, В. И. Большаков // Перспективные задачи инженерной науки : сб. науч. тр. междунар. конф. / под общ. ред. В. И. Большакова ; Междунар. инж. академия, Приднестр. гос. академия стр-ва и архитектуры, Приднестр. центр Междунар. инж. академии, Запорож. гос. техн. ун-т, Межотраслевой науч.-исслед. ин-т строит. конструкций. – Днепропетровск, 2001. – Вып. 2. – С. 17-27.
3. Bhadeshia H. K. D. H. Bainite in steels / H. K. D. H. Bhadeshia. – 2nd edition. – London : Maney publishing, 2001. – 448 p.
4. Davenport E. S. Transformation of austenite at constant substructural temperatures / E. S. Davenport, E. C. Bain // Transactions of American institute of mining, metallurgical and petroleum engineers. – 1939. – Vol. 90. – P. 117-154.
5. Aaronson H. I. The Mechanism of phase transformations in crystalline solids / Aaronson H. I. – London : Inst. of metals, 1969. – 270 p.
6. Reynolds W. T. A Summary of the present diffusionist views on bainite / W. T. Reynolds, H. I. Aaronson, G. Spanos // Materials transactions / Japan institute of metals. – 1991. – Vol. 32, № 8. – P. 737-743.
7. Bramfitt B. L. A perspective morphology of bainite / B. L. Bramfitt, J. G. Speer // Metallurgical transactions A. – 1990. – Vol. 21, iss. 3. – P. 817-826.
8. Atlas for Bainitic Microstructures. Vol. 1 / ed. by T. Araki [et al.] ; Iron and steel institute of Japan. – Tokyo, 1992. – 276 p.
9. Habracken L. J. Bainitic microstructures in low-carbon alloy steels and their mechanical properties / L. J. Habracken, M. Economopoulos // Transformation and hardenability in steels : symposium / sponsored by Climax molybdenum company of Michigan (incorporated) and University of michigan dept. of chemical and metallurgical engineering, in cooperation with the University of michigan extension service. – Michigan, 1967. – P. 69-76.
10. Morphology and properties of low-carbon bainite / H. Ohtani, S. Okaguchi, Y. Fujishiro, Y. Ohmori // Metallurgical Transactions A. – 1990. – Vol. 21, iss. 3. – P. 877-888.
11. Krauss G. Ferritic microstructures in continuously cooled low- and ultralow- carbon steels / G. Krauss, S. W. Thompson // ISIJ International. – 1995. – Vol. 35, № 8. – P. 937-945.
12. Бекетов А. В. Особенности процессов структурообразования и разработка параметров упрочнения стали 10Г2ФБ : дис... канд. техн. наук : 05.03.01 / Александр Вадимович Бекетов. – Днепропетровск, 2004. – 158 с.
13. Влияние термической обработки на образование игольчатого феррита и свойств низкоуглеродистых микролегированных сталей 10Г2ФБ и 09Г2С / В. И. Большаков, Д. В. Лаухин, Г. Д. Сухомлин, В. И. Куксенко // Металловедение и термическая обработка металлов. – Москва, 2004. – № 12. – С. 29-33.
14. Лаухин Д. В. Особенности упрочнения низкоуглеродистых сталей, микролегированных ниобием и ванадием : дис... канд. техн. наук : 05.02.01 / Дмитрий Вячеславович Лаухин. – Днепропетровск, 2003. – 151 с.
15. Узлов О. В. Формирование структуры игольчатого феррита и комплекса свойств в микро- и низколегированных конструкционных сталях : дис... канд. техн. наук : 05.02.01 / Олег Владимирович Узлов. – Днепропетровск, 2006. – 161 с.
16. Курдюмов Г. В. Превращения в железе и стали / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – Москва : Наука, 1977. – 238 с.
17. Большаков В. И. Атлас структур металлов и сплавов : учеб. пособие для ВУЗ / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Н. Э. Погребная. – Днепропетровск : Gaudeamus, 2001. – 114 с.
18. Большаков В. И. Влияние термического упрочнения на структуру и свойства низколегированной малоуглеродистой высокопрочной строительной стали / В. И. Большаков // Металловедение и термическая обработка металлов. – Москва, 1974. – № 3. – С. 48-53.
19. Энтин Р. И. Превращения аустенита в стали / Р. И. Энтин. – Москва : Металлургиздат, 1960. – 253 с.
20. Mehl R. F. The physics of hardenability. Mechanism and rate of decomposition from austenite / R. F. Mehl // Hardenability of alloy steels : symposium held during the twentieth annual convention of American society for metals, Detroit, octovber 17-21, 1938. – USA, 1939. – P. 1-55.
21. Ohmori Y. The bainite in low carbon low alloy high strength steels / Y. Ohmori, H. Ohtani, T. Kunitake // Tetsu-to-Hagane / Iron and steel institute of Japan. – 1971. – Vol. 57, № 10. – P. 1690-1705.
22. Araki T. Bainitic and similar microstructures of modern low carbon HSLA steels / T. Araki, M. Enomoto, K. Shibota // Proceedings of the international conference on processing, microstructure and properties of microalloyed and other

modern high strength low alloy steels, June 3-6, 1991, Pittsburgh, PA / University of Pittsburgh ; sponsored by Iron and steel society, Minerals, metals and materials society. – USA, [1992]. – P. 249-255.

23. Babu S. S. Mechanism of the transition from bainite to acicular ferrite / S. S. Babu, H. K. D. H. Bhadeshia // Materials transactions of the Japan institute of metals and materials. – 1991. – Vol. 32, № 8. – P. 679-688.
24. M. Strangwood. The mechanism of acicular ferrite formation in steel weld deposits / M. Strangwood, H. K. D. H. Bhadeshia // Advances in welding technology and science / edited by S. A. David ; ASM International. – USA, 1987. – P. 209-213.
25. Guide to the light microscopic examination of ferrite steel weld metals : document number IX-1533-88/IXJ-123-87, revision 2 / International institute of welding. – [S. l.], 1988. – P. 1-5.

REFERENCES

1. Bol'shakov V.I. and Kuksenko V.I. *Igol'chaty ferrit stroitel'nykh staley* [Acicular ferrite of construction steels]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2012, 134 p. (in Russian).
2. Bol'shakov Vad.I. and Bol'shakov V.I. *Osobennosti razvitiya chernoy metallurgii Ukrainy* [Features of development of ferrous metallurgy of Ukraine]. *Perspektivnye zadachi inzhenernoj nauki* [Challenges to engineering science]. Dnepropetrovsk, 2001, iss. 2, pp. 17-27. (in Russian).
3. Bhadeshia H.K.D.H. *Bainite in steels*. 2nd edition. London: Maney publishing, 2001, 448 p.
4. Davenport E.S. and Bain E.C. *Transformation of austenite at constant substructural temperatures. Transactions of American institute of mining, metallurgical and petroleum engineers*. 1939, vol. 90, pp. 117-154.
5. Aaronson H.I. *The Mechanism of phase transformations in crystalline solids*. London: Inst. of metals, 1969, 270 p.
6. Reynolds W.T., Aaronson H.I. and Spanos G. A. *Summary of the present diffusionist views on bainite Materials transaction*. 1991, vol. 32, no. 8, pp. 737-743.
7. Bramfitt B.L. and Speer J.G. *A perspective morphology of bainite. Metallurgical transactions A*. 1990, vol. 21, iss. 3, pp. 817-826.
8. Araki T. [et al.] eds. *Atlas for Bainitic Microstructures. Vol. 1*. Tokyo, 1992, 276 p.
9. Habracken L.J. and Economopoulos M. *Bainitic microstructures in low-carbon alloy steels and their mechanical properties. Transformation and hardenability in steels*. Michigan, 1967, pp. 69-76.
10. Ohtani H., Okaguchi S., Fujishiro Y. and Ohmori Y. *Morphology and properties of low-carbon bainite. Metallurgical Transactions A*. 1990, vol. 21, iss. 3, pp. 877-888.
11. Krauss G. and Thompson S.W. *Ferritic microstructures in continuously cooled low- and ultralow- carbon steels. ISIJ International*. 1995, vol. 35, no. 8, pp. 937-945.
12. Beketov A.B. *Osobennosti protsessov strukturoobrazovaniya i razrabotka parametrov uprochneniya stali 10G2FB. Diss. kand.* [Features of structure formation and development of the parameters of hardening steel 10G2FB.AU. Abstract of Ph. D. dissertation]. Dnepropetrovsk, 2004, 158 p. (in Russian).
13. Bol'shakov V.I., Laukhin D.V., Sukhomlin G.D. and Kuksenko V.I. *Vliyanie termicheskoy obrabotki na obrazovanie igol'chatogo ferrita i svoystv nizkouglerodistykh mikrolegirovannykh staley 10G2FB i 09G2S* [Effect of heat treatment on the formation of acicular ferrite and properties of low carbon microalloyed steels 10G2FB and 09G2S]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. Moscow, 2004, no. 12, 29–33 pp. (in Russian).
14. Laukhin D.V. *Osobennosti uprochneniya nizkouglerodistykh staley, mikrolegirovannykh niobiem i vanadium. Diss. kand.* [Features of hardening carbon steels, microalloyed niobium and vanadium. Abstract of Ph. D. dissertation]. Dnepropetrovsk, 2003, 151 p. (in Russian).
15. Uzlov O.V. *Formirovanie struktury igol'chatogo ferrita i kompleksa svoystv v mikro- i nizkolegirovannykh konstruktsionnykh stalyakh. Diss. kand.* [Formation of the structure of acicular ferrite and the complex properties of micro- and low-alloy structural steels. Abstract of Ph. D. dissertation]. Dnepropetrovsk, 2006, 161 p. (in Russian).
16. Kurdyumov G.V., Utevskiy L.M. and Entin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977, 238 p. (in Russian).
17. Bol'shakov V.I., Sukhomlin G.D. and Pogrebnyaya N.E. *Atlas struktur metallov i splavov* [Atlas structures of metals and alloys]. Dnepropetrovsk: Gaudeamus, 2001, 114 p. (in Russian).
18. Bol'shakov V.I. *Vliyanie termicheskogo uprochneniya na strukturu i svoystva nizkolegirovannoy malouglerodistoy vysokoprochnoy stroitel'noy stali* [Influence of thermal hardening on structure and properties of low-carbon low-alloy high-strength structural steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. Moscow, 1974, no. 3, pp. 48-53 (in Russian).
19. Entin R.I. *Prevrashcheniya austenita v stali* [Transformation of austenite in steel]. Moscow: Metallurgizdat, 1960, 253 p. (in Russian).
20. Mehl R.F. *The physics of hardenability. Mechanism and rate of decomposition from austenite. Hardenability of alloy steels : symposium held during the twentieth annual convention of American society for metals, Detroit, October 17-21, 1938*. USA, 1939, pp. 1-55.

21. Ohmori Y., Ohtani H and Kunitake T. *The bainite in low carbon low alloy high strength steels. Tetsu-to-Hagane.* 1971, vol. 57, no. 10, pp. 1690-1705.
22. Araki T., Enomoto M. and Shibota K. *Bainitic and similar microstructures of modern low carbon HSLA steels. Proceedings of the international conference on processing, microstructure and properties of microalloyed and other modern high strength low alloy steels, June 3-6, 1991, Pittsburgh. USA, [1992], pp. 249-255.*
23. Babu S.S. and Bhadeshia H.K.D.H. *Mechanism of the transition from bainite to acicular ferrite. Materials transactions of the Japan institute of metals and materials.* 1991, vol. 32, no. 8, pp. 679-688.
24. Strangwood M. and Bhadeshia H.K.D.H. *The mechanism of acicular ferrite formation in steel weld deposits. Advances in welding technology and science.* USA, 1987, pp. 209-213.
25. International institute of welding. *Guide to the light microscopic examination of ferrite steel weld metals : document number IX-1533-88/LXJ-123-87, revision 2.* [S. l.], 1988, pp. 1-5.

Стаття рекомендована до друку 09.08.2015 р. Рецензент: д-р ф.-м. н., проф. Башев В.Ф.

Надійшла до редколегії: 21.07.2015 р. Прийнята до друку: 24.07.2015 р.