



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 620.178, 620.18

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.017



О ПРОБЛЕМЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУР АУСФЕРИТНОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ

Алексей Геннадьевич Панов ¹, Ирина Фаридовна Шаехова ²,
Чулпан Альбертовна Гимазетдинова ³, Татьяна Владимировна Соченко ⁴

^{1, 2, 3, 4} Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО КФУ, Набережные Челны, Россия

¹ ФГБОУ ВО «ЯГТУ», Ярославль, Россия

¹ panov.ag@mail.ru ORCID 0000-0002-3357-8824

² irra1603@yandex.ru ORCID 0000-0002-3275-3037

³ gimazetdinova.chulpan@mail.ru

⁴ stv09@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты анализа литературных данных и собственных исследований в области изотермической закалки высокопрочных чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом. Отмечена сложность контроля и идентификации закалочных структур игольчатых (бейнита и мартенсита) и неигольчатых (троостита). Рассмотрены основные методы контроля закалочных структур. Исследованы 12 образцов ЧВГ, изотермически закалённых по разным режимам, с целью поиска надёжных критериев идентификации закалочных структур методами, доступными производственным металлографическим лабораториям. Проанализированы результаты проведенных микроструктурного анализа (с применением светового микроскопа) нескольких сотен полей зрения и нескольких сотен измерений микротвёрдости методом Виккерса. Выявлено, что использование методов световой микроскопии и определения микротвёрдости матрицы изотермически закалённого ЧВГ по отдельности не даёт надёжной идентификации закалочных структур. Установлено, что совмещение данных методов является оптимальным решением проблемы качественного контроля закалочных структур чугунов в производственных условиях. На основе проведенных исследований предложен метод контроля и идентификации закалочных структур изотермически закалённых высокопрочных чугунов, заключающийся в сопоставлении результатов измерения микротвёрдости с участками микроструктуры, который можно применять с использованием имеющегося в производственной лаборатории оборудования.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, изотермическая закалка, шаровидный графит, вермикулярный графит, структура, микротвёрдость, бейнит.

Для цитирования: О проблеме идентификации структур аусферитного высокопрочного чугуна производственными методами контроля / А. Г. Панов [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 133–140. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.017. EDN: <https://elibrary.ru/PWWAXE>.

Original article

ON THE PROBLEM OF THE IDENTIFYING THE STRUCTURES OF AUSTEMPERED HIGH-STRENGTH CAST IRON USING PRODUCTION CONTROL METHODS

Alexey G. Panov ¹, Irina F. Shaekhova ², Chulpan A. Gimazetdinova ³,
Tatiana V. Sochenko ⁴

^{1, 2, 3, 4} Naberezhnye Chelny Institute (branch) K(P)FU, Naberezhnye Chelny, Russia

² FGBOU VO "YAGTU", Yaroslavl, Russia

¹ panov.ag@mail.ru, ORCID 0000-0002-3357-8824

² irrra1603@yandex.ru ORCID 0000-0002-3275-3037

³ gimazetdinova.chulpan@mail.ru

⁴ stv09@mail.ru

Abstract. *The paper presents results of analysis of literature data and own researches in the field of the austempered high-strength cast irons with spherical and vermicular graphite. Difficulty of control and identification of needle (bainite and martensite) and non-needle (troostite) quenching structures is noted. The basic methods of control of quenching structures are considered. 12 austempered compacted graphite iron samples have been investigated to find reliable criteria for identification of quenched structures by methods available to production metallographic laboratories. The results of microstructural analysis (using light microscope) of several hundred fields of view and several hundred measurements of microhardness by Vickers method have been analyzed. It is found that the use of light microscopy and microhardness determination of the austempered compacted graphite iron matrix separately does not give reliable identification of hardened structures. It is established that combination of these methods is the best solution of the problem of qualitative control of the hardening structures of cast irons under production conditions. On the basis of the conducted research a method of checking and identifying the hardening structures of the austempered high-strength cast irons is proposed, which consists in comparing the results of microhardness measurement with microstructure areas that can be used using the equipment available in the production laboratory.*

Keywords: *ductile iron, austempering, spheroidal graphite, compacted graphite, structure, microhardness, bainite.*

For citation: Panov, A. G., Shaekhova, I. F., Gimazetdinova, Ch. A. & Sochenko, T. V. (2022). *On the problem of the identifying the structures of austempered high-strength cast iron using production control methods. Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 133-140. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.017. EDN: <https://elibrary.ru/PWWAXE>.

ВВЕДЕНИЕ

Высокопрочные чугуны (ВЧ) уже долгие годы находят широкое применение в современном машиностроении. Это обуславливается сочетанием уникальных физических, механических и эксплуатационных характеристик.

Термическая обработка чугунов как способ получения новых структур и улучшения механических и эксплуатационных характеристик готового изделия в отечественном машиностроении применяется крайне редко, но является перспективной, особенно изотермическая закалка [1]. К настоящему времени наиболее широкое применение в мире получил уже достаточно хорошо изученный

изотермически закаленный ВЧ с шаровидным графитом (ЧШГ), отличающийся повышенной прочностью, усталостной прочностью и износостойкостью в сочетании с высокой ударной вязкостью [2, 3].

В последнее время среди промышленных предприятий наблюдается повышенный интерес к изотермически закаленному высокопрочному чугуну с вермикулярным графитом (ЧВГ), применение которого в машиностроении активно развивается в последние 20 лет [4]. Однако изотермическая закалка ЧВГ остаётся малоизученной как в отечественной [5], так и зарубежной [6] литературе.

В связи со схожестью свойств ЧШГ и ЧВГ и в связи с малой изученностью ЧВГ

О ПРОБЛЕМЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУР АУСФЕРИТНОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ

традиционно считалось, что в производственной практике можно применять одинаковые режимы при изотермической закалке. Однако проведенные исследования [7, 8] показали термовременные отличия в структурообразовании ЧШГ и ЧВГ.

Кроме того, существует проблема описания закалочных структур в изотермически закалённых чугунах. В то время как для описания подобных структур в сталях разработаны четыре государственных стандарта [9–12], описание закалочных структур в чугунах встречается лишь в одном регламенте ГОСТ 3443-87 [13]. Причём в данном стандарте представлены лишь по одному эталону «однофазной» структуры металлической основы – только троостита, только бейнита и только мартенсита, в то время как в изотермически закалённых чугунах часто встречается металлическая основа в виде смеси бейнита и мартенсита, причём разных типов. Стоит также отметить, что нижний бейнит схож по внешнему виду с мартенситом, что осложняет процесс идентификации игольчатых закалочных структур в чугунах.

Для анализа закалочных структур при проведении научных исследований, как правило, применяются методы электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и рентгенофазового анализа, которые позволяют достаточно чётко различать игольчатые структуры металлической основы. На рисунке 1 приведены примеры простых и четких на вид «пластинчатого» бейнита и мартенсита [14]. Однако данные методы микроструктурного анализа недоступны производственным лабораториям машиностроения, осуществляющим контроль микроструктуры в производственных условиях.

В зарубежной литературе встречается информация о возможности разделения структур мартенсита и бейнита методом цветного травления [15], но она носит качественный характер без детализации методических особенностей. Поэтому актуальной задачей является разработка простого и доступного метода объективной идентификации игольчатых структур изотермически закалённых чугунов.

Цель работы – разработать метод разделения игольчатых структур с применением

Таблица 1 – Химический состав опытных образцов

Table 1 - Chemical composition of experimental samples

Материал	Химические элементы, %											
	C	S	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	P	Sn	Mo	Mg
ЧВГ SinterCast	3,56	0,010	2,10	0,2	0,04	0,04	0,84	–	–	0,07	0,01	0,011

доступных производственным лабораториям средств измерения.

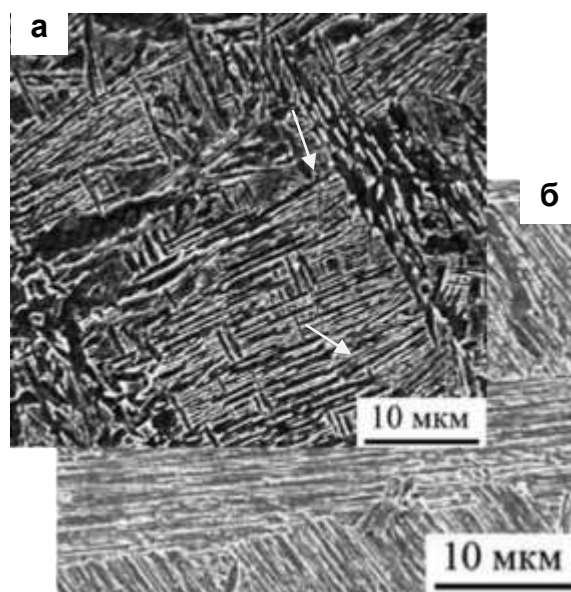


Рисунок 1 – Примеры реечного а) бейнита и б) мартенсита в сталях

Figure 1 - Examples of "rack": a) bainite, b) martensite in steels

МЕТОДЫ

Отливки из ЧВГ были предоставлены компанией Sinter Cast (Швеция) в виде плит размером 250×250×50 мм. Для проведения исследований из предоставленных заготовок вырезались лабораторные образцы размером 20×20×40 мм. Химический состав материалов представлен в таблице 1.

Термическая обработка проводилась в муфельной печи с электрическим нагревом SNOL_8,2/1100. Аустенитизация проводилась при температуре 900 °С в течение 30 минут, без учета времени на нагрев. Последующая изотермическая закалка проводилась при температурах 290 °С и 390 °С с различным временем выдержки: 10, 20, 30, 120, 180 и 240 минут.

Для достижения цели исследования изучали возможность разделения игольчатых структур изотермически закалённого чугуна с помощью световой микроскопии и измерения микротвёрдости, доступных обычным производственным лабораториям.

Микроструктурный анализ проводили с применением металлографического комплекса, состоящего из светового микроскопа NE-ORHOT-32 (Германия) и программного обеспечения SIAMS 800 (г. Екатеринбург). Для проявления структур металлической матрицы чугуна применяли традиционное травление поверхности образцов 4 %-ным раствором азотной кислоты (HNO_3), а также цветное тепловое травление по способу, описанному в работе [15], – 4 %-ным раствором пикриновой кислоты с последующими нагревом, выдержкой в течение 5,5 часов при температуре 260 °С и охлаждением до комнатной температуры на воздухе.

Измерение микротвердости проводили методом Виккерса на микротвердомере «Dugimet» (Германия) при нагрузке 50 г с дальнейшим пересчетом в единицы Роквелла (HRC). Измерения проводили на травленной 4 % раствором азотной кислоты поверхности образцов по 20 замеров на каждом. Отпечатки получали по всему сечению, продвигаясь вдоль предоставленной заранее от края образца до другой метки, на одинаковом расстоянии друг от друга. Затем образец переносили на световой микроскоп и получали цифровые изображения отпечатков, ориентируясь по метке.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 2 представлены исходные микроструктуры экспериментальных образцов до термической обработки. Образцы ЧВГ содержали графит шаровидной и вермикулярной формы, доля шаровидного графита не более 5 %, металлическая матрица была перлитная, с содержанием феррита порядка 6 %.

В рамках работы было обследовано несколько сотен полей зрения микроструктур и произведено несколько сотен измерений микротвёрдости изотермически закалённых ЧВГ.

На рисунках 3, 4 представлены примеры травленных микроструктур изотермически закалённых ЧВГ. На рисунке 3 – травленных 4 %-ным раствором азотной кислоты образцов, закалённых на верхний и нижний бейнит при температурах соответственно 390 и 290 °С. На рисунке 4 – травленных методом цветного теплового травления образцов, закалённых на верхний бейнит при температуре 390 °С.

На рисунке 5 представлены примеры травленных 4 %-ным раствором азотной кислоты микроструктур изотермически закалённых на верхний бейнит при 390 °С ЧВГ вместе с отпечатками, оставляемыми индентором виккерса при измерении микротвёрдости и значениями микротвёрдости.



а)



б)

Рисунок 2 – Исходные микроструктуры образцов ЧВГ: а) не травлено; б) травлено 4 %-ным раствором азотной кислоты

Figure 2 - Initial microstructures of CGI samples: a) not etched, б) etched with 4% nitric acid solution

О ПРОБЛЕМЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУР АУСФЕРИТНОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ

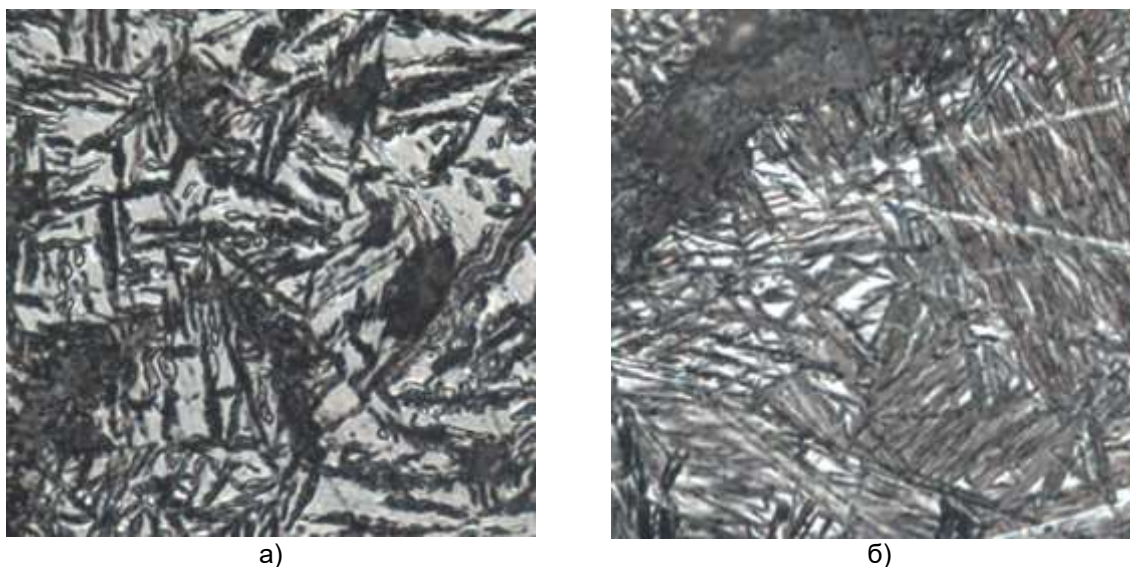


Рисунок 3 – Примеры микроструктур изотермически закалённых ЧВГ, x1000, травлено 4 %-ным раствором азотной кислоты: а) верхний бейнит; б) нижний бейнит

Figure 3 - Examples of microstructures of austempered CGI, x1000, etched with 4 % nitric acid solution: a) upper bainite, б) lower bainite

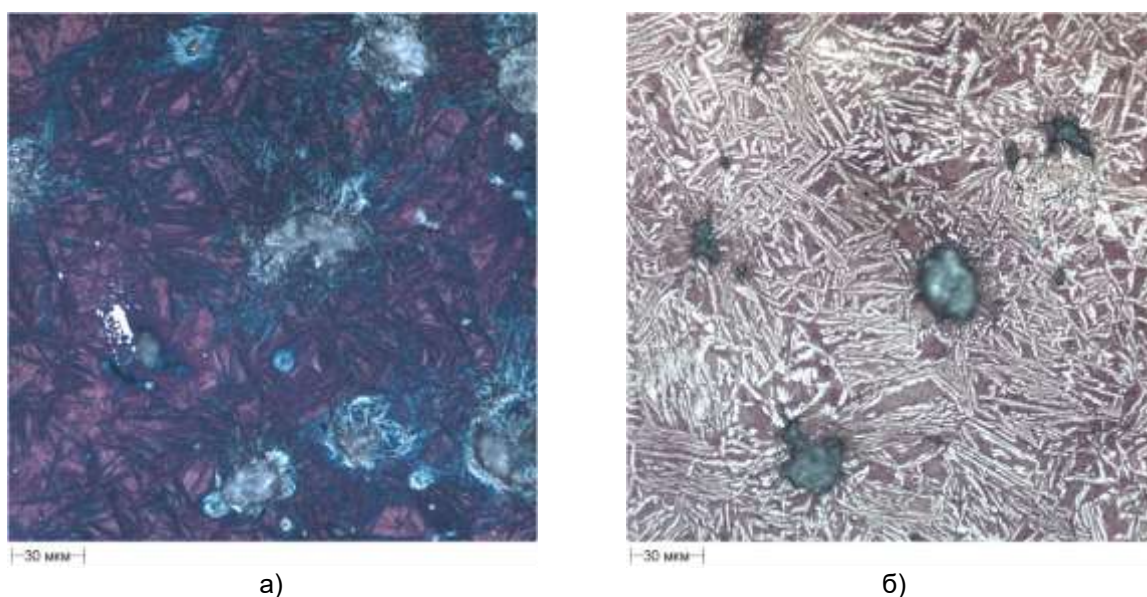


Рисунок 4 – Примеры микроструктур ЧВГ после применения цветного травления, изотермически закалённых и выдержанных при 390 °С в течение: а) 20 мин; б) 120 мин

Figure 4 - Microstructures of austempered at 390 °C samples after applying the color etching method: a) holding time 20 min, б) holding time 120 min

Матрицы всех изотермически закалённые ЧВГ в качестве закалочных структур содержали игольчатые структуры за исключением образца, полученного с нарушением процесса изотермической закалки, а именно локального перегрева соли и связанного с этим замедления скорости закалки (рисунок 5, д), матрица которого была не игольчатой (троостит).

Разброс значений микротвёрдости закалочных структур был в весьма широких пределах – от 29 HRC до 67HRC.

ОБСУЖДЕНИЕ

Применение традиционного способа травления матрицы чугунов 4 %-ным раствором азотной кислоты подтвердил сложность визуального различения игольчатых закалочных структур только по их внешнему виду (рисунки 3, 5). Если верхний бейнит в ЧВГ (рисунок 3, а) ещё как-то можно было оценить с использованием эталона ГОСТ3443-87, то отличить структуры нижнего бейнита от мартенсита с применением ГОСТ3443-87 оказалось

практически невозможно (рисунок 3, б), и поэтому дальнейшие исследования проводили на образцах, закаленных на нижний бейнит.

Применение цветного теплового травления по рекомендациям [14] несколько улучшило ситуацию, в некоторых случаях результаты совпадали с данными авторов рекомендаций, мартенситные иглы окрашивались в

голубой цвет, а бейнитные – в «землянично-рыжий». Однако многократное повторение теплового травления с целью определения метрологических характеристик разрабатываемой методики в одинаковых технических условиях одних и тех же образцов давали разные цветовые результаты, особенно при работе разных исполнителей.

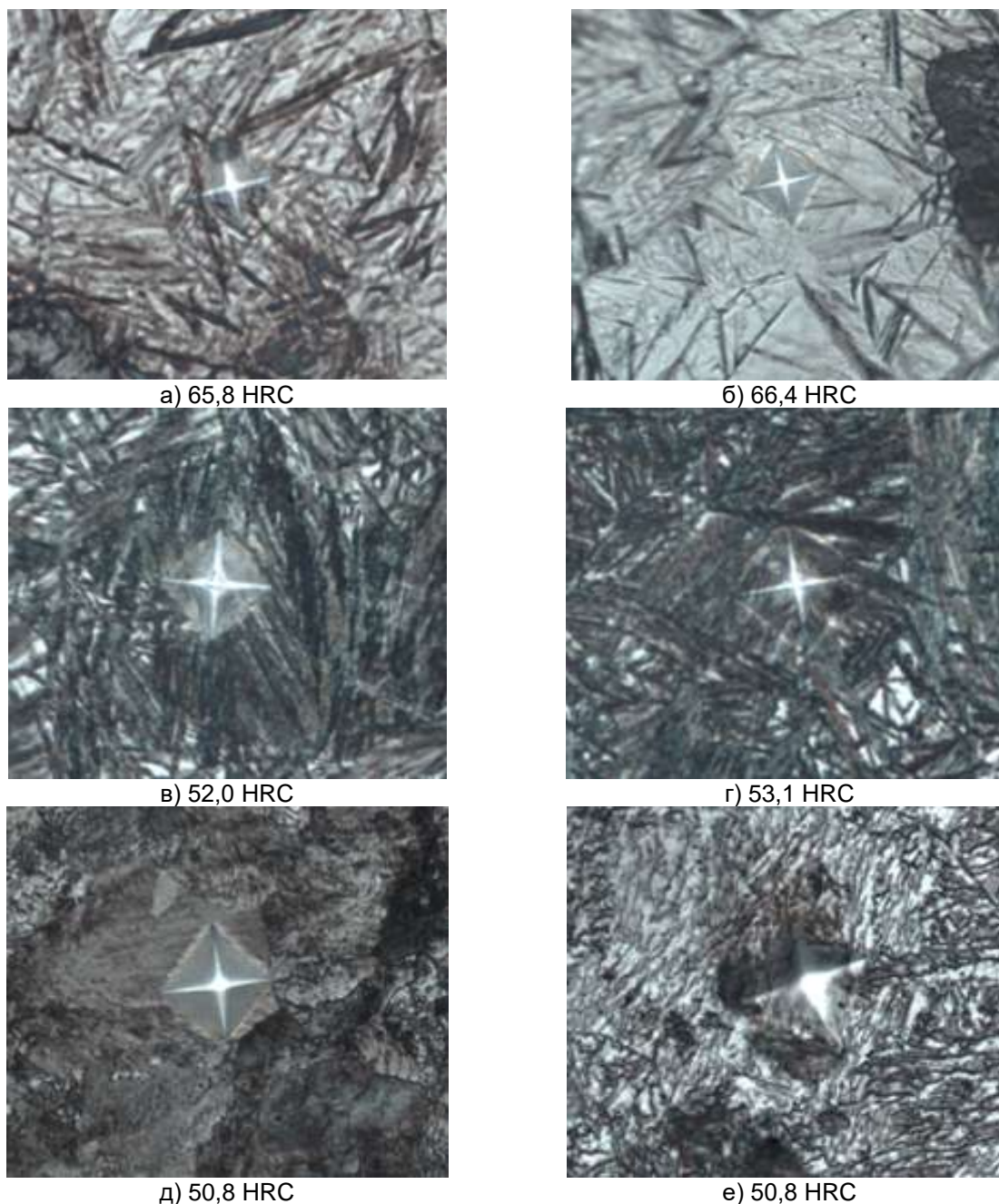


Рисунок 5 – Цифровые изображения отпечатков индентора Виккерса, время изотермической выдержки соответственно: а) 10 мин; б) 30 мин; в) 180 мин; г) 240 мин

Figure 5 - Digital images of Vickers indenter prints, isothermal exposure time, respectively: а) 10 min, б) 30 min, в) 180 min, г) 240 min

О ПРОБЛЕМЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУР АУСФЕРИТНОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ

Ситуация ещё больше усложнялась при травлении образцов, закалённых при разных режимах (рисунок 4). По этой причине работы в направлении разработки методики цветного теплового травления для идентификации игольчатых структур были приостановлены.

Последующее изучение возможности использования данных по микротвёрдости игольчатых структур для их идентификации дали более оптимистичные результаты для разделения мартенсита и бейнита. В том числе облегчилось выявление плохо различаемого при традиционном травлении раствором азотной кислоты слегка рыжеватых мартенситных игл внутри зёрен остаточного аустенита на фоне чётких чёрных мартенситных игл, хорошо протравливаемых (рисунок 5, б). Преимущественно микротвёрдость мартенсита в среднем составляла более 60 HRC, более низкая микротвёрдость соответствовала бейниту. Более высокий разброс значений микротвёрдости бейнита был связан преимущественно с различиями морфологии бейнита. Кроме того, на значение микротвёрдости оказывали влияние случайно попадающие в область отпечатка индентора инородные фазы (графит, карбиды, аустенит остаточный). Вместе с тем, несмотря на указанные недостатки, был сделан вывод об однозначной возможности и эффективности использования данных по микротвёрдости для идентификации по крайней мере мартенсита в изотермически закалённых ЧВГ.

В то же время практика показала, что применение только данных по микротвёрдости не может однозначно идентифицировать бейнит даже в области микротвёрдости, значительно меньшей, чем пограничная зона между микротвёрдостью мартенсита и бейнита, без визуальной оценки микроstructures матрицы ЧВГ. Смежные исследования авторов настоящей статьи прокаливаемости высокопрочных чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом показали, что ЧВГ имеет значительно меньшую прокаливаемость при прочих равных условиях. Поэтому для ЧВГ имеется больший риск попадания в область эвтектоидного превращения при каких-либо отклонениях от технологического процесса изотермической закалки, вероятных в условиях реальных производств. В такой ситуации в структуре ЧВГ может образовываться тростит, резко ухудшающий потребительские его свойства, который однако имеет микротвёрдость, аналогичную микротвёрдости бейнита (рисунок 5, д). Поэтому для надёжной идентификации закалочных структур их оценку необходимо проводить совместно, изучая как визуальные изображения микроstructures, так и микротвёрдость характерных фаз матрицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований микроstructures методом световой микроскопии и микротвёрдости методом Виккерса образцов изотермически закалённых чугунов с вермикулярным графитом, полученных по 12 режимам закалки, с целью поиска надёжных критериев идентификации игольчатых структур матрицы чугуна методами, доступными производственной лаборатории, сделаны следующие основные выводы:

1) Исследование только микроstructures методом световой микроскопии не даёт возможности надёжной идентификации игольчатых структур в связи с визуальной схожестью между собой игл бейнита и мартенсита. Перспективным для достижения указанной цели остаётся направление теплового цветного травления, которое, однако, требует отработки техники исполнения и уточнения методик применительно к субъективным областям распространения (тип и химический состав чугуна, режимы изотермической закалки).

2) Исследование только микротвёрдости закалочных структур методом Виккерса позволяет надёжно оценить мартенсит в структуре изотермически закалённого чугуна. Для оценки бейнита необходимо дополнительное визуальное изучение микроstructures для исключения ошибки принятия за бейнит неигольчатой структуры типа троостит, которая имеет аналогичные значения микротвёрдости.

3) Совместное использование методов световой микроскопии и Виккерса (определение микротвёрдости) позволяют однозначно идентифицировать закалочные структуры изотермически закалённых ЧВГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корниенко, Э.Н., Панов, А.Г., Хальфин, Д.Ф. Перспективы производства отливок из ЧШГ аустенитно-бейнитного класса // Литейщик России. – 2004. – № 6. – С. 11–16.
2. High-strength bainitic cast iron with spheroidal graphite / E. Dorazil [and ect.] // Metal Science and Heat Treatment 20. – P. 532–535 (1978).
3. Nofal, A. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI // 70th World Foundry Congress, 2012. – P. 181–195.
4. Технология стабильного получения вермикулярного графита в отливках массового производства / С. Доусон [и др.] // Литейное производство. – 2018. – № 5. – С. 9–13.
5. Панов, А.Г., Шаехова, И.Ф., Гуртовой, Д.А. Об уникальности теплофизических свойств и перспективах чугуна с вермикулярным графитом для двигателей внутреннего сгорания // Черные металлы. – 2021. – № 4. – С. 51–56.
6. Microstructure and Mechanical Properties of Austenitic Compacted Cast Iron with Additive Manganese / K.M. Ahmad [and ect.] // Archives of Metallurgy and Materials. – 2019. – Vol. 64. – Iss. 4. – P. 1269–1275.
7. Gregoritti, R.W., Grau, J.E. Mechanical properties of compacted graphite cast iron with different microstructures // International Journal of Cast Metals Research. – 2014. – 27. – P. 275–281.

8. Comparison of austempering transformation in spheroidal graphite and compacted graphite cast irons / M. Ramadan [and ect.] // International Journal of Cast Metals Research. – 2006. – Vol. 19. – № 2.

9. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры. – М.: Изд-во стандартов, 2004.

10. ГОСТ 54570-2011. Сталь. Методы оценки степени полостчатости или ориентации микроструктур. – М.: Изд-во стандартов, 2012.

11. ГОСТ 5640-2020. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктур проката стального плоского. – М.: Изд-во стандартов, 2021.

12. ГОСТ 23870-79. Свариваемость сталей. Метод оценки влияния сварки плавлением на основной металл. – М.: Изд-во стандартов, 1982.

13. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структур. – М.: Изд-во стандартов, 1987.

14. Bramfitt, B.L., Speer, J.G. A Perspective on the Morphology of Bainite // Met. Trans. – 1990. – Vol. 21A. – № 4. – P. 817–829.

15. Hamid Bayati, A.L. Rimmer & R. Elliott. The austempering kinetics and processing window in an austempered, low-manganese compacted-graphite cast iron // Cast Metals. – 1994. 7:1. – P. 11–24.

Информация об авторах

А. Г. Панов – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО КФУ, профессор кафедры технологий материалов, стандартизации и метрологии ФГБОУ ВО ЯГТУ.

И. Ф. Шаехова – старший преподаватель кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО КФУ.

Ч. А. Гимазетдинова – студентка 4 курса кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО КФУ.

Т. В. Соченко – аспирант 3 года обучения кафедры «Машиностроение» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО КФУ.

REFERENCES

1. Kornienko, E.N., Panov, A.G. & Khalfin, D.F. (2004). Prospects for the production of castings from the austenitic-bainite class. Foundry of Russia, (6), 11-16. (In Russ.).

2. Dorazil, E., Barta, B., Crhak, J. & Munsterova, E. (1978). High-strength bainitic cast iron with spheroidal graphite. Metal Science and Heat Treatment (20), 532-535.

3. Nofal, A. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI. 70th World Foundry Congress.

4. Dawson, S., Panov, A.G., Gurtovoy, D.A. & Anikin, S.A. (2018). Technology of stable production of vermicular graphite in castings of mass production. Foundry production, (5), 9-13. (In Russ.).

5. Panov, A.G., Shaekhova, I.F. & Gurtovoy, D.A. (2021). On the uniqueness of thermal properties and pro-

spects of cast iron with vermicular graphite for internal combustion engines. Ferrous Metals, (4), 51-56. (In Russ.).

6. Ahmad, K.M., Maafor, M.R., Ishak, M. & Huzairi, M.S. (2019). Microstructure and Mechanical Properties of Austenitic Compact Cast Iron with Additive Manganese. Archives of Metallurgy and Materials, (64), 1269-1275.

7. Gregoritti, R.W. & Grau, J.E. (2014). Mechanical properties of compacted graphite cast iron with different microstructures. International Journal of Cast Metals Research (27), 275-281.

8. Ramadan, M., Nofal, A., Elmahalawi, I. & Abdel Karim, R. (2006). Comparison of austempering transformation in spheroidal graphite and compact graphite cast irons. International Journal of Cast Metals Research, (2).

9. Steel. Standards of microstructure. (2004). HOST 8233-56 from 26 Nov. 1956. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

10. Steel. Methods for assessing the degree of cavities or orientation of microstructures (2011). HOST 54570-2011 from 27 Dec. 2002. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

11. Steel. Metallographic method of evaluation of microstructures of rolled flat steel. (2020) HOST 5640-2020 from 1 Oct. 2021. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

12. Weldability of steels. Test method for evolution of 23870-79 fusion welding effect on parent metal. (1982). HOST 23870-79 from 30 Oct. 1979. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

13. Cast iron castings with graphite of different form. Methods of structure determination. (1987). HOST 3443-87 from 1 Jul. 1987. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

14. Bramfitt, B.L., Speer, J.G. A Perspective on the Morphology of Bainite // Met. Trans, 1990, Vol. 21A, No. 4, P. 817-829.

15. Hamid Bayati, A.L. Rimmer & R. Elliott (1994) The austempering kinetics and processing window in an austempered, low-manganese compacted-graphite cast iron. Cast Metals, 7:1, 11-24.

Information about the authors

A. G. Panov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Materials, Technologies and Quality" of the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the FGAOU IN KFU, Professor of the Department of Materials Technologies, Standardization and Metrology of the FGBOU in YAGTU.

I. F. Shaekhova - Senior Lecturer of the Department of "Materials, Technologies and Quality" of the Naberezhnye Chelny Institute Ch. A. Gimazetdinova is a student of the 4th year of the Department of "Materials, Technologies and Quality" of the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the FGAOU IN KFU.

Ch. A. Gimazetdinova - is a student of the 4th year of the Department of "Materials, Technologies and Quality" of the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the FGAOU IN KFU.

T. V. Sochenko - is a 3-year postgraduate student of the Department of "Mechanical Engineering" of the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the FGAOU IN KFU.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.