

Проблемы применения компьютерного контроля вермикулярного графита в микроструктуре чугуна

И.Ф. Шаехова¹, А.Г. Панов¹, Н.Г. Дегтярёва², В.А. Иванова³
irra1603@yandex.ru|panov.ag@mail.ru|dnadegda@list.ru|ivanova-waleriya@mail.ru

¹Казанский федеральный университет, Набережные Челны, Россия;

²Исследовательский центр Модификатор, Набережные Челны, Россия;

³Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

В последние десятилетия наблюдается рост промышленного интереса к чугунам с вермикулярным графитом, обладающим очень широким комплексом свойств, зависящим в большей степени от формы нахождения в нём свободного углерода в виде графита. Вместе с тем, до настоящего времени отсутствуют методики контроля графита в микроструктуре ЧВГ необходимой для производства производительности и точности. В настоящей работе произведена оценка погрешности автоматического расчёта доли вермикулярного графита, связанная с ошибкой автоматической идентификации типа графитовых включений в ЧВГ. Показано, что автоматический расчёт без контроля металловеда увеличивает точность в сравнении с ГОСТ 3443-87, но его погрешность остаётся не приемлемо высокой для задач материаловедения и требует дальнейшего повышения.

Ключевые слова: вермикулярный графит, контроль микроструктуры, автоматический анализатор изображений, погрешность контроля.

Problems of using computer control of vermicular graphite in the microstructure of cast iron

I.F. Shaehova¹, A.G. Panov¹, N.G. Degtyaryova², V.A. Ivanova³
irra1603@yandex.ru|panov.ag@mail.ru|dnadegda@list.ru|ivanova-waleriya@mail.ru

¹Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia;

²Research center Modifier, Naberezhnye Chelny, Russia;

³Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

In recent decades, there has been an increase in industrial interest in compacted graphite iron, which has a very wide range of properties more depended on the graphite form. The same time, to date, there are no methods for controlling graphite in the microstructure of CGI necessary truth. In the present work, the automatic calculation error of the fraction of vermicular graphite is estimated, which is associated with the automatic identification error of the type of graphite inclusion. It is shown that automatic calculation without the metallographist increases accuracy in comparison with GOST 3443-87, but its error remains not acceptably high for materials science tasks and requires further improvement.

Key words: vermicular graphite, microstructure control, automatic image analyzer, control error.

Введение

Уже более 50 лет известно о чугунах с вермикулярным графитом (ЧВГ), обладающих положительными свойствами серых чугунов (высокой демпфирующей способностью и теплопроводностью, малой объёмной усадкой и др.) при более высоких герметичности, прочности, пластичности, ударной вязкости и других служебных свойствах [1].

В то же время, развитие применения ЧВГ до настоящего времени сдерживается большим разбросом значений его потребительских свойств, которые, как известно, во многом определяются структурой материала. Одной из основных причин проблемы сложности управления свойствами ЧВГ является их слабая корреляция с общепринятыми характеристиками микроструктуры ЧВГ, обусловленная, прежде всего, низкой точностью их оценки стандартными методами [1].

Общеизвестно, что графитовые включения (ГВ), которые обычно характеризуются размерно-топологическими параметрами (размер, форма, распределение и количество), оказывают существенное влияние на свойства чугуна. Специфические свойства ЧВГ достигаются благодаря наличию в его структуре частиц так называемого вермикулярного графита (ВГ). Частицы в плоскости сечения микрошлифа имеют удлиненную

форму и расположены в случайном порядке так же, как и в сером чугуне, но в то же время они короче и толще и имеют закругленные края [2], что и обеспечивает уникальные свойства.

Определение характеристик микроструктуры ЧВГ в России регламентируется ГОСТ 3443-87, который определяет три параметра вермикулярного графита – его форму, распределение и количество (долю) – методом сравнительного анализа реальных микроструктур с эталонными [3]. В стандарте регламентированы три вида формы, три типа распределения и пять уровней доли ВГ. Практическое значение при этом представляют лишь четыре уровня доли ВГ, поскольку один уровень – значение 100% – фактически никогда не достигается в реальных производственных условиях. При этом погрешность измерения доли ВГ для остальных уровней имеет значения от более 2,5 относительных процентов для самого высокого регламентированного содержания ВГ 98% (а фактически от более 4 относительных процентов, поскольку визуально при анализе реальных микроструктур однозначно определить их соответствие эталону с 98% или 92% ВГ зачастую не удаётся даже опытным металловедам) и до более 14 относительных процентов для самого низкого регламентированного содержания ВГ 70%. Кроме того, достаточно большую сложность для металловедов имеет задача определения значения двух других характеристик (формы и распределения ВГ), поскольку зачастую в реальных микроструктурах ЧВГ встречается разнообразный

графит, не представленный на эталонах стандарта [4-6]. По этому оценка структуры в соответствии со шкалами по ГОСТ 3443-87 не обеспечивает надёжного прогноза свойств отливок из ЧВГ.

Отечественный стандарт ГОСТ 3443-78 разработан более 30 лет назад и, очевидно, не отвечает современным требованиям материаловедения и машиностроения и требует обновления. Анализ мировых стандартов, касающихся требований к чугунам с вермикулярным графитом, в том числе содержащих регламент описания их микроструктуры, это подтверждает [7]. В результате анализа выявлено, что первые аналогичные зарубежные стандарты были разработаны примерно в одно и то же время, что и отечественные – в 1980-е годы, однако в отличие от отечественных, они к настоящему времени прошли многократную актуализацию с учётом постоянно появляющихся новых данных как по свойствам, так и по микроструктуре ЧВГ. Особенно активно актуализация происходила последние 13 лет. Изначально как в СССР (России), так и за рубежом, требования к свойствам и микроструктуре ЧВГ регламентировались отдельными стандартами. Однако в 2006 году была издана первая редакция специализированного комплексного международного стандарта на ЧВГ «ISO 16112:2006 (E). *Compacted (vermicular) graphite cast irons – Classification*», который включает как требования к свойствам, к микроструктуре, так и описание усовершенствованного регламента контроля доли ВГ в микроструктуре ЧВГ. Этот стандарт обновлялся каждые 5 лет, последняя редакция вышла в 2017 году, версия 2006 года была использована как основа для разработки стандартов GB/T 26655-2011 (Китай) и JIS G 5505:2013 (Япония)). Такая ситуация с регламентами на ЧВГ, по всей видимости, является следствием его уникальности и ещё не достаточной изученности, в том числе в области контроля вермикулярного графита в его структуре.

В то же время, в последние десятилетия в связи с быстрым ростом компьютерных технологий развивается цифровая микроскопия, в том числе, в направлении расчёта различных измеряемых (количественных) характеристик микроструктуры различных материалов. Современные металлографические комплексы включают автоматические анализаторы изображений (ААИ), позволяющие значительно упрощать процесс работы металловеда, обрабатывая одновременно большой массив данных и генерируя отчеты согласно установленным требованиям [8]. С помощью ААИ можно описать структурные составляющие большим набором параметров, чем форма, доля и распределение ВГ. Кроме того, ААИ всегда одинаково воспроизводят математические критерии, назначенные для определения параметров, что позволяет корректно сравнивать изделия, изготовленные по разным технологиям. Современные ААИ имеют возможность рассчитывать большое количество геометрических характеристик объектов, как предложенных ещё до появления компьютеров [9], так и новых, в том числе: площадь объекта, процент площади занимаемой объектом от площади изображения, периметр объекта, максимальный и минимальный диаметры Фере и Мартина, коэффициент заполнения региона, вытянутость, средний диаметр, параметр формы, угол ориентировки, эксцентриситет и др. [4].

Однако, как показывает практический опыт применения различных ААИ авторами настоящей публикации в производственных условиях и как неоднократно отмечалось другими исследователями [10], комбинация и форма структурных составляющих на металлографических изображениях может давать очень сложную картину, для объективной интерпретации которой компьютерной программой в настоящее время *необ-*

ходим контроль металловеда и управление им до-ступными параметрами [11]. С целью полного исключения человеческого фактора, допускающего непредсказуемую высокую погрешность результата анализа, первоочередной задачей металлографического анализа микроструктуры ЧВГ является разработка полностью автоматического режима анализа полученного изображения без необходимости управления металловедом параметрами программы. Для достижения этой цели необходимо:

- установить требования к резкости, разрешению, допустимым по качеству и количеству дефектам пробоподготовки, а также площади микрошлифа (размер панорамы) получаемого изображения;
- разработать устойчивый алгоритм для автоматического распознавания всех типов частиц графита;
- разработать объективные математические критерии для оптимально точной идентификации и разделения графитовых включений по типам, обеспечивающие оценку морфологии и геометрических размеров каждой частицы с необходимой погрешностью в автоматическом режиме *без вмешательства металловеда*.

В настоящей работе оценивали относительную погрешность расчёта доли вермикулярного графита, вносимую ошибкой автоматической идентификации типа ГВ в ЧВГ, не содержащем пластинчатого графита. В качестве компьютерной программы – ААИ – использовали программный комплекс SIAMS 800 (ООО «СИАМС», г. Екатеринбург), являющийся одним из наиболее популярных отечественных автоматических анализаторов изображений. Для идентификации ГВ программный комплекс включает методику, основанную на критериях, регламентированных международными стандартами ISO 16112:2017 (E) и ISO 945-1:2019(E) «Microstructure of cast irons - Part 1: Graphite classification by visual analysis». Регламент определяет три типа графита [12]:

- вермикулярный (тип III вермикулярный графит по стандарту ISO 945-1:2019(E)),
- промежуточный (типы IV шиповатый и V вырожденный шаровидного графита по стандарту ISO 945-1:2019(E)),
- шаровидный (тип VI шаровидного графита по стандарту ISO 945-1:2019(E)).

С помощью программного комплекса и оптического микроскопа NEOPHOT32 получали отдельные изображения микроструктур площадью 4,75 мм² ЧВГ, не содержащих пластинчатого графита и с различной долей вермикулярного и шаровидного графита. На каждом полученном изображении по отдельности проводили автоматическую идентификацию частиц графита по типам с последующим расчётом доли ВГ по суммарной площади включений. Пример цифровой фотографии исходной микроструктуры и модельного изображения после автоматической идентификации вермикулярного и шаровидного графита по типам представлен на рисунке 1.

Сравнение исходных микроструктур и их модельных изображений с идентифицированным графитом выявило следующие закономерности.

Некоторый вклад в погрешность расчёта доли вермикулярного графита могут вносить граничные объекты (чёрные включения на рисунке 1,б), которые не учитываются в автоматическом режиме, поскольку априори считается, что программа не может их правильно идентифицировать из-за неполноты информации (площади включения), в то время как многие граничные объекты специалисту-металловеду идентифицировать удастся вполне однозначно.

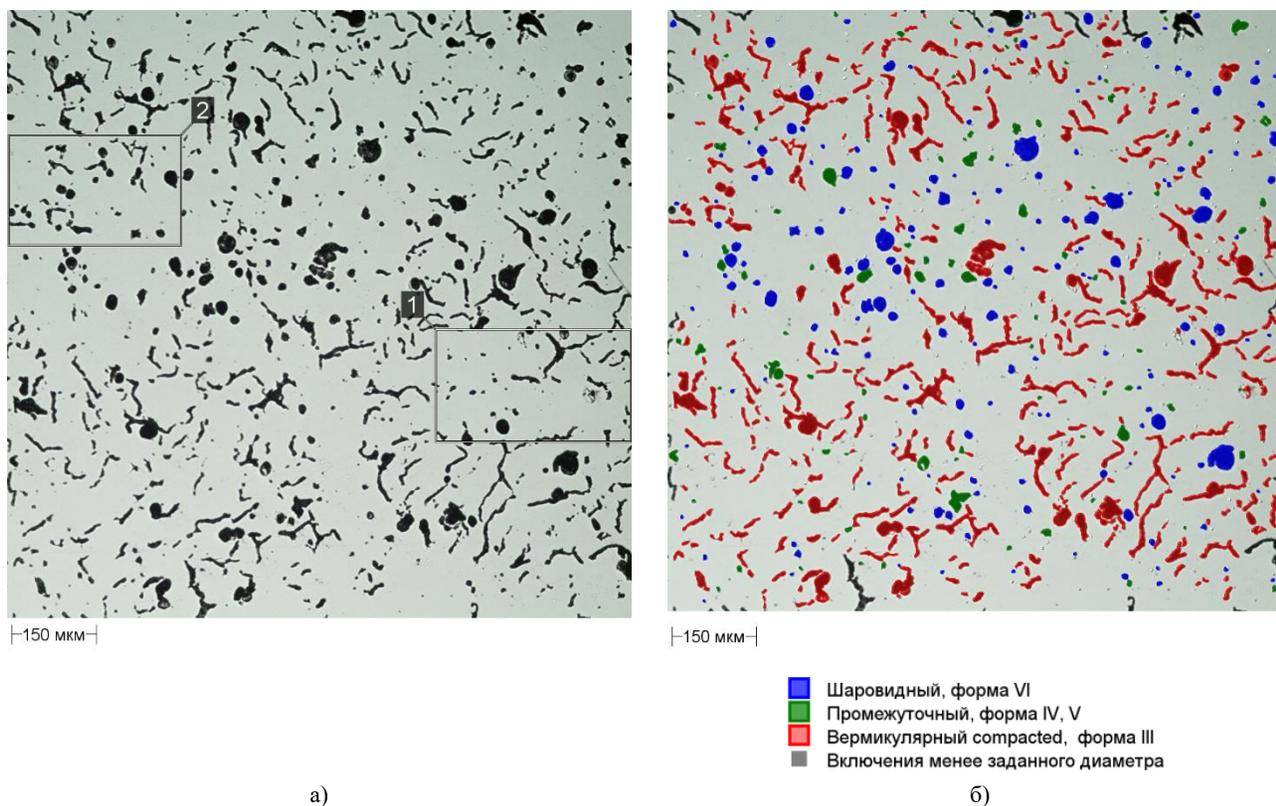


Рис. 1. Цифровые изображения микроструктуры ЧВГ: а) исходное цифровое фото; б) модельное изображение после применения инструмента «ISO 16112:2006 (E). Компактный (вермикулярный) графит в чугуна. Классификация» ААИ SIAMS 800

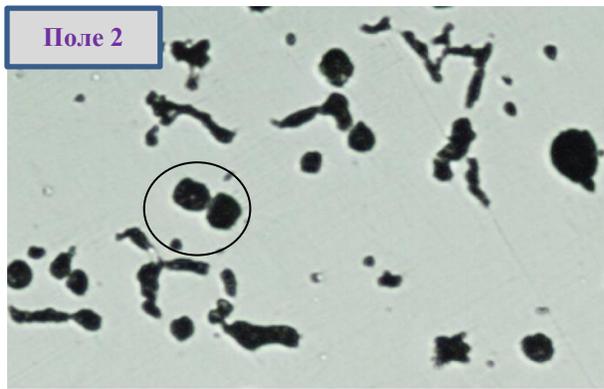
Достаточно часто некоторые объекты распознаются программой как вермикулярный графит, но при детальном рассмотрении исходных фотографий микроструктур удаётся определить, что они на самом деле являются слипшимися включениями шаровидного графита (рисунок 2) и которые необходимо рассматривать отдельно, в том числе путём использования параметра «разрезание слипшихся частиц», имеющийся в арсенале комплекса SIAMS 800. Однако этот параметр не использован в применённой методике по рекомендациям разработчиков стандарта ISO 16112:2017(E).

Иногда при подготовке шлифа в металлической основе вокруг неметаллических включений образуются ямки, изображение которых в автоматическом режиме идентифицируется как графитовая частица (рисунок 3), поскольку программа не может отличить пору от частицы графита т.к. распознавание идет по яркости, и ошибочно учитывается при последующих расчётах.

Для оценки относительной погрешности определения доли вермикулярного графита, связанной с ошибкой автоматической идентификации типа ГВ, самостоятельно вручную с помощью специального программного инструмента перераспределяли (перекрашивали) объекты, присваивая им другие типы графита, которые, по мнению авторов настоящей публикации, более подходили этим объектам, а в автоматическом режиме были определены не корректно, после чего производили повторный скорректированный расчёт. Разницу в расчётах принимали как абсолютную погрешность от ошибки идентификации включений. Результаты исследования погрешностей представлены на рисунке 4 и в таблице.

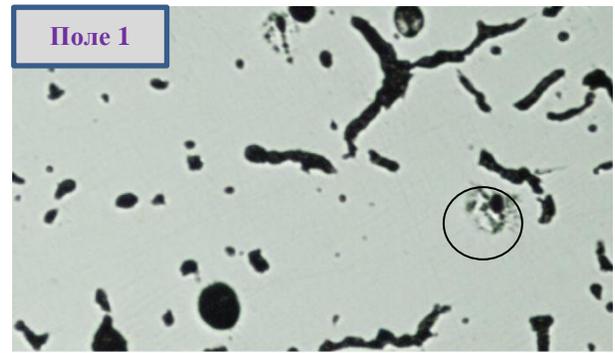
Как следует из приведённых данных, для структур ЧВГ с высокой долей ВГ значения относительной погрешности как по эталонному методу в соответствии с ГОСТ 3443-87 (величину абсолютной погрешности принимали равной половине цены деления шкалы эталонов стандарта, которая включает значения 100, 98, 92, 85 и 70 процентов ВГ), так и с помощью компьютерного метода оказались примерно одинаковы и составили порядка 3%, что можно считать вполне приемлемым для задач материаловедения. С уменьшением доли ВГ в ЧВГ, начиная с 85%, относительные погрешности определения доли ВГ обоими методами растут. При этом компьютерный метод является более точным, даже несмотря на возникающие ошибки идентификации частиц графита по типам. Его погрешность не превысила 13% во всём исследованном диапазоне значений доли ВГ. Вместе с тем, величина погрешности на уровне 13% остаётся достаточно высокой и требует дальнейших разработок, направленных на её снижение.

Таким образом задачи разработки методик контроля структурных составляющих материалов, основанного на современных геометрических принципах [13-15], в частности, методик оценки параметров графитовой фазы, по-прежнему актуальны и требуют срочного решения. При этом применение программных комплексов позволяет в отдельных случаях существенно уменьшить погрешность определения доли ВГ, что свидетельствует о необходимости дальнейшего развития применения данных методов для оценки структуры ЧВГ.



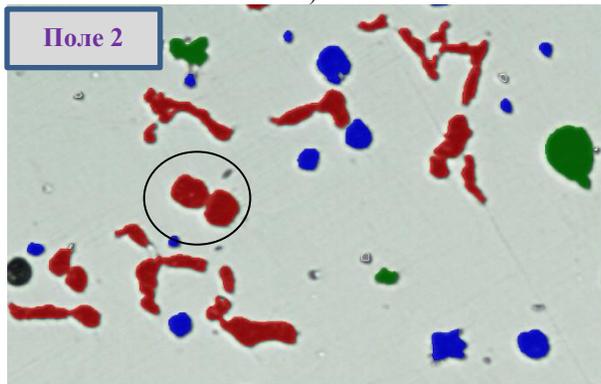
50 мкм

а)



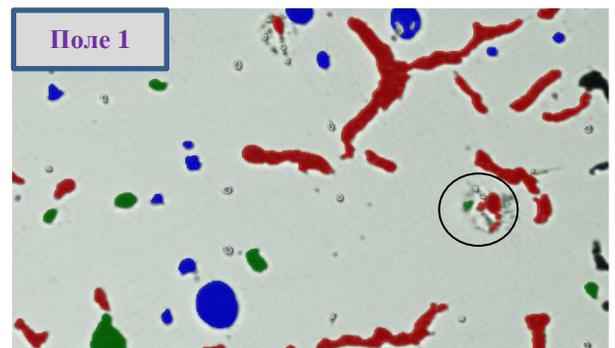
50 мкм

а)



50 мкм

б)



50 мкм

б)

Рис. 2. Слипшиеся ГВ шаровидной формы, идентифицированные программой как ВГ

Рис. 3. Частично выкрошившееся неметаллическое включение с ямкой на шлифе

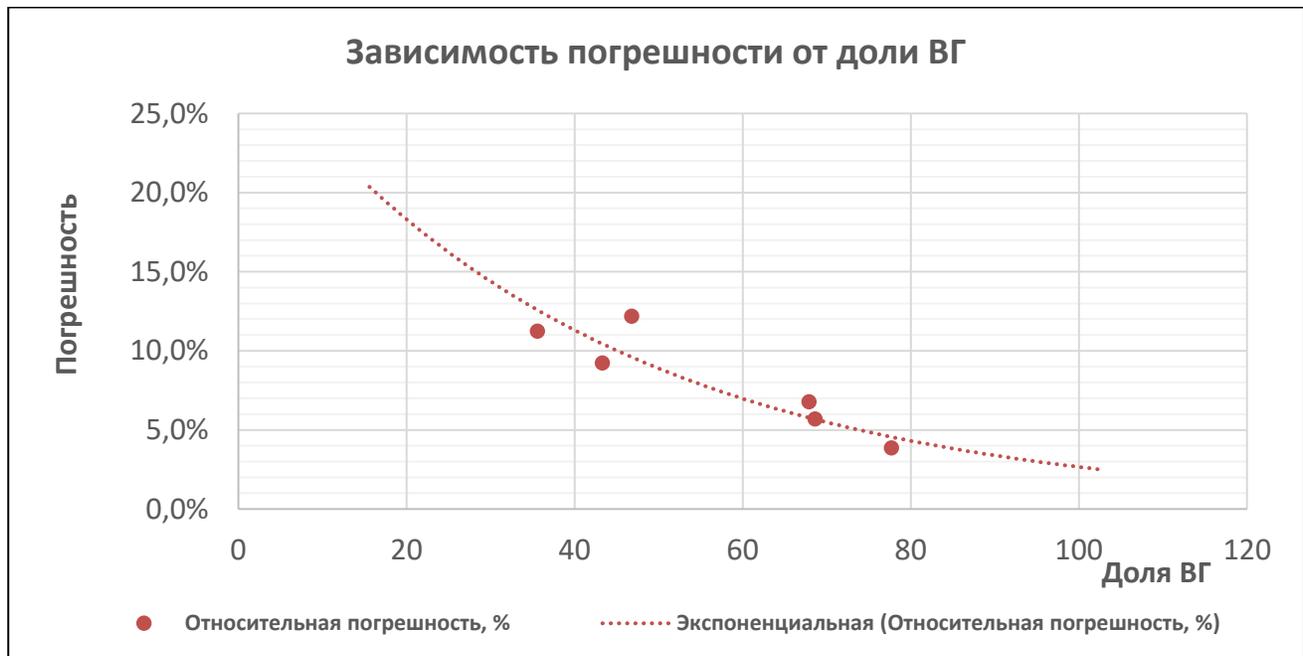


Рис. 4. Зависимость значений относительной погрешности определения доли ВГ, связанной с ошибкой автоматической идентификации типа ГВ

Таблица 1

Сравнение погрешностей определения доли ВГ разными методами

Доля ВГ	Абсолютная погрешность		Относительная погрешность, %	
	ГОСТ3443	SIAMS 800	ГОСТ3443	SIAMS 800
98	2,5	2,7	2,55%	2,76%
92	2,5	2,9	2,72%	3,15%
85	5,0	3,0	5,88%	3,53%
70	10,0	3,9	14,29%	5,57%
60	не регламентировано	4,1	не регламентировано	6,83%
50	не регламентировано	4,4	не регламентировано	8,80%
40	не регламентировано	4,5	не регламентировано	11,25%

Благодарности

Авторы выражают благодарность Татьяне Александровне Сивковой, специалисту ООО «СИАМС» за ценные замечания и рекомендации по настоящей работе.

Литература

- [1] Панов А.Г. О целях и задачах конференции / Детали машиностроения из чугуна с вермикулярным графитом: свойства, технология, контроль: тезисы докладов МНТК (Наб. Челны, 17–18 окт. 2017 г.) / под ред. А.Г. Панова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. – 6-7 с.
- [2] Стив Доусон. Особенности структуры ЧВГ и свойства, определяющие перспективы его применения в машиностроении / Детали машиностроения из чугуна с вермикулярным графитом: свойства, технология, контроль: тезисы докладов МНТК (Наб. Челны, 17–18 окт. 2017 г.) / под ред. А.Г. Панова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. – 12-13 с.
- [3] ГОСТ 3443-87 Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры.
- [4] Shaekhova I.F., Panov A.G., Nazipova A.I., Chentaeva A.E. Microstructure image processing with automatic analyzer tools ImageExpertPro 3 // Astra Salvensis. – 2017. – vol. 2017, pages 471-480.
- [5] Макаренко К.В., Илюшкин Д.А. Фрактальный анализ микроструктур графитизированных чугунов / Вестник Брянского государственного технического университета № 1(49) 2016. – 34-43 с.
- [6] Методы повышения металлургического качества заготовок машиностроения из высокопрочных чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом: учебное пособие / А.Г. Панов, Э.Р. Галимов, Н.Н. Сафронов, В.И. Астащенко, Л.Н. Шафигуллин. – М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2018. – 288 с.
- [7] Иванова В.А., Побегалова Е.О. О необходимости актуализации требований к чугунам с вермикулярным графитом (ЧВГ) / Наука и технологии модифицирования чугуна: тезисы докладов МНТК (Наб. Челны, 15–19 окт. 2018 г.) / под ред. А.Г. Панова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 33-34 с.
- [8] Казаков А. А., Ковалев П. В., Рябошук С. В. и др. Металлургическая экспертиза как основа определения природы дефектов металлопродукции // Черные металлы. 2007. Июль—август. С. 17–23.

[9] Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. - 3-е изд. - М.: Металлургия, 1970, 376 с., ил.

[10] Куц Ю.В., Повстаной А.Ю. Современные методы исследования микроструктуры с помощью компьютерного материаловедения с использованием прикладных программ / Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» Випуск №45. Луцьк, 2014. – С. 329-336.

[11] Сивкова Т.А., Гусев А.О., Губарев С.В., Бритшева А.В., Самойлова А.Ю., Кадушников Р.М. Особенности контроля микроструктуры графита в чугунах автоматическими методами // Металлургия машиностроения. – 2018. – №2. – 34-38 с.

[12] ISO 16112:2006 (E). Компактный (вермикулярный) графит в чугуне. Классификация.

[13] Pantelev V.G. Metrological provision for image analyzers / Pantelev V.G., Slaev V.A., Chunovkina A.G. // Measurement Techniques - 2008. Т. 51. № 1. Р. 107-112.

[14] Макаренко К.В. Идентификация графитовых включений в чугунах // Литейное производство. – 2009. – №4. – С. 2-6.

[15] Макаренко К.В. Моделирование процесса кристаллизации чугуна с шаровидным графитом // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. - № 11. - С. 16–20.

Об авторах

Шаехова Ирина Фаридовна, аспирант кафедры материалов, технологий и качества Набережночелнинского института (филиала) Казанского федерального университета. E-mail: itgra1603@yandex.ru.

Панов Алексей Геннадьевич, д.т.н., профессор кафедры материалов, технологий и качества Набережночелнинского института (филиала) Казанского федерального университета. E-mail: panov.ag@mail.ru.

Дегтярёва Надежда Георгиевна, главный металлург ООО «Исследовательский центр Модификатор». E-mail: dnadegda@list.ru.

Иванова Валерия Анатольевна, д.т.н., заведующая кафедрой технологии материалов, стандартизации и метрологии Ярославского государственного технического университета. E-mail: ivanova-waleriya@mail.ru.