



УДК 669.1/8.017.16
DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-99-108

Поступила 09.04.2019
Received 09.04.2019

СОВРЕМЕННАЯ МЕТАЛЛОГРАФИЯ – ОСНОВА ЛИТЕЙНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

*А. Г. АНИСОВИЧ, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь,
ул. Купревича, 10. E-mail: anna_anisovich@yandex.ru*

Кратко рассматриваются возможности современной металлографии – оптическое контрастирование, количественная металлография, программы обработки изображений. Затрагивается вопрос об отсутствии современной литературы по металлографии. Обсуждается проблема представления структур материалов в сети Интернет. Представлены проблемы развития металлографических исследований в Беларуси. Отмечается, что развитие металлографических исследований в Беларуси тормозится отсутствием средств для приобретения оборудования, а также квалифицированных кадров.

Ключевые слова. Металлография в Беларуси, оптическое контрастирование, количественная обработка изображений, интернет, стандарты структур.

Для цитирования. Анисович, А. Г. Современная металлография – основа литейного материаловедения / А. Г. Анисович // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 99–108. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-99-108.

MODERN METALLOGRAPHY – THE BASIS OF FOUNDRY MATERIAL SCIENCE

*A. G. ANISOVICH, Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
10, Kuprevich str. E-mail: anna_anisovich@yandex.ru*

The article briefly discusses the capabilities of modern metallography – optical contrasting, quantitative metallography, image processing programs. The question of the absence of modern literature on metallography is touched on. The problem of representing the structures of materials and the Internet is discussed. The problems of the development of metallographic research in Belarus are also presented. It is noted that the development of metallographic research in Belarus is hampered by the lack of funds for the acquisition of the equipment, as well as the lack of qualified personnel.

Keywords. Metallography in Belarus, optical contrasting, quantitative image processing, internet, standards of structures.

For citation. Anisovich A. G. Modern metallography – the basis of foundry material science. Foundry production and metallurgy, 2019, no. 2, pp. 99–108. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-99-108.

Совершенствование литейных технологий обусловлено потребностями промышленности и является одним из важнейших направлений развития. В связи с этим вопрос актуальности методов анализа литейной продукции не вызывает сомнений. При этом значение имеют не только методы контроля химического состава и свойств. Основным фактором является структура материала, поскольку именно она, в конечном итоге, определяет комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств. Главное место при этом отводится металлографии.

В настоящее время наука находится на том рубеже, когда все явления, лежащие на поверхности, уже исследованы и описаны. Получение научного знания возможно только путем углубления в предмет исследования, познания все более глубоких масштабных уровней исследуемого объекта. Это относится непосредственно и к металлографии, требования к которой в настоящее время отнюдь не ограничиваются рамками банального металловедения – получения изображения структуры и ее качественного описания. Современная металлография – это комплекс качественных и количественных методов анализа структуры, предполагающих использование современного металлографического оборудования, средств компьютерной техники и математической обработки экспериментальных данных.



Рис. 1. Общий вид металлографического комплекса

ми и т. д.), позволяющими сделать анализ различных деталей изображения и, как правило, дополняющих друг друга для получения адекватной картины структуры металла.

Вместе с тем, в настоящее время существенно расширился спектр материаловедческих объектов в силу появления новых материалов, методов их получения, методов обработки поверхности и т. д. В связи с этим требуется совершенствование существующих или развитие специальных методов исследования. Следует учесть также, что в современном материаловедении ушел в прошлое способ фоторегистрации изображений в черно-белой цветовой гамме. Компьютерная регистрация изображений дает возможность выделить специфические эффекты структур, в том числе по их контрасту и цвету.

Цель статьи – представить многообразие возможностей современной металлографии, а также рассмотреть некоторые проблемы металлографии в Беларуси.

Пример современного металлографического оборудования представлен на рис. 1. Это металлографический комплекс, в состав которого входят металлографический микроскоп, персональный компьютер с программой обработки изображений, видеокамера с адаптером. Современные микроскопы позволяют работать с использованием методов светлого и темного поля, в поляризованном свете, дифференциально-интерференционном контрасте. Предельное увеличение – до 2000 крат.

Этапами металлографического анализа являются пробоподготовка, выявление структуры травлением, фиксирование изображения структуры материала, ее качественный и количественный анализ.

Основная задача **пробоподготовки** (металлографического препарирования) – создание образца, который адекватно отражает состояние структуры материала. Этот этап является отдельной большой темой и здесь не рассматривается.

Металлографическое травление иногда относят к пробоподготовке. Тем не менее, травление – это отдельная операция по выявлению структуры образца. С травлением могут быть связаны и важные (иногда забавные) артефакты, которые могут повлиять на результаты исследования. Поэтому фиксирование ошибок пробоподготовки является также важной частью металлографического исследования. Примеры показаны на рис. 2. На плохо промытом шлифе бронзы остался реактив на основе бихромата калия в виде красноватых кристаллов; также на поверхности присутствует грязь в виде серых «веточек» (рис. 2, а). Настоящая структура видна в виде темных включений упрочняющей фазы по границам зерен. На рис. 2, б показан шлиф, загрязненный прикосновением пальцев. Артефакты такого типа не представляют проблемы для специалистов, но могут ввести в заблуждение начинающего исследователя. Вероятно, следует приводить такие эффекты в публикациях, а также создавать специальные каталоги или атласы, в которых артефакты были бы представлены во всем своем многообразии. Тем более, что современные средства компьютерной регистрации изображений позволяют это сделать. Во-первых, при современном способе регистрации данных количество кадров не играет существенной роли в отличие регистрации фотометодом, когда не было возможности свободно тратить расходные материалы. Во-вторых, современные средства регистрации позволяют видеть и фиксировать и структуры, и артефакты во всем своем морфологическом и цветовом разнообразии, чего не было ранее.

Современная **качественная металлография** обеспечивается средствами оптического контрастирования [2], среди которых темнопольная микроскопия; поляризационная микроскопия; фазово-контраст-

Ключевое значение имеет непосредственно методика получения изображений структуры, так как качество изображений определяет надежность последующей их интерпретации, а также возможность количественного анализа изображения.

Вопрос результативности металлографических исследований зависит, в первую очередь, от умения исследователя детально проанализировать структуру металла, возможности учесть все структурные эффекты, непосредственно влияющие на комплекс физико-механических свойств данного материала или изделия, а также установить артефакты, внесенные в процессе изготовления образца. В связи с этим огромную роль играет оснащение металлографических микроскопов дополнительными опциями (поляризаторами, диафрагмами, цветными фильтрами и т. д.), позволяющими сделать анализ различных деталей изображения и, как правило, дополняющих друг друга для получения адекватной картины структуры металла.

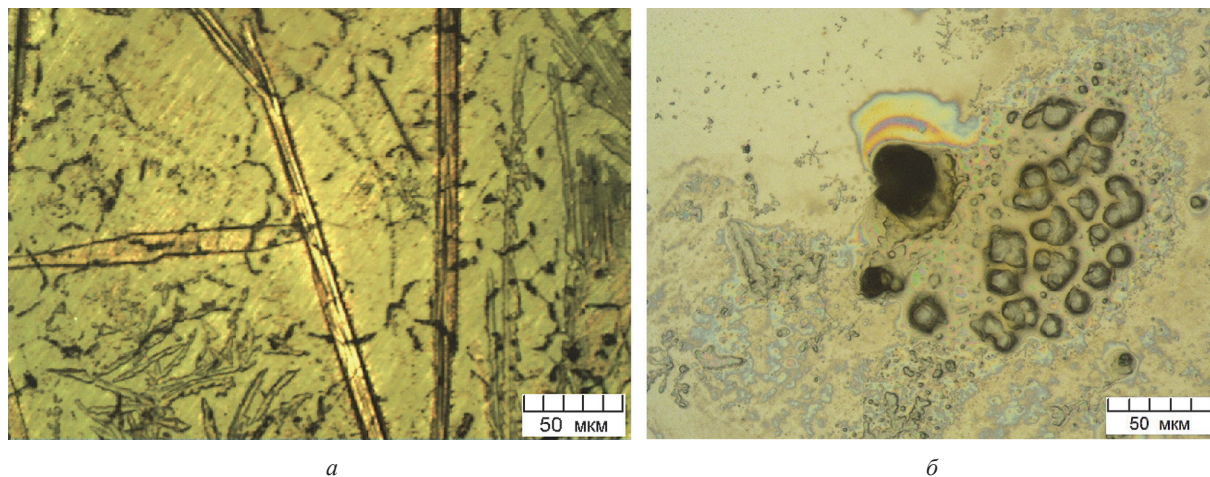


Рис. 2. Ошибки пробоподготовки: *a* – кристаллы травителя на поверхности шлифа бронзы [1]; *б* – грязь и отпечатки пальцев на шлифе литой стали

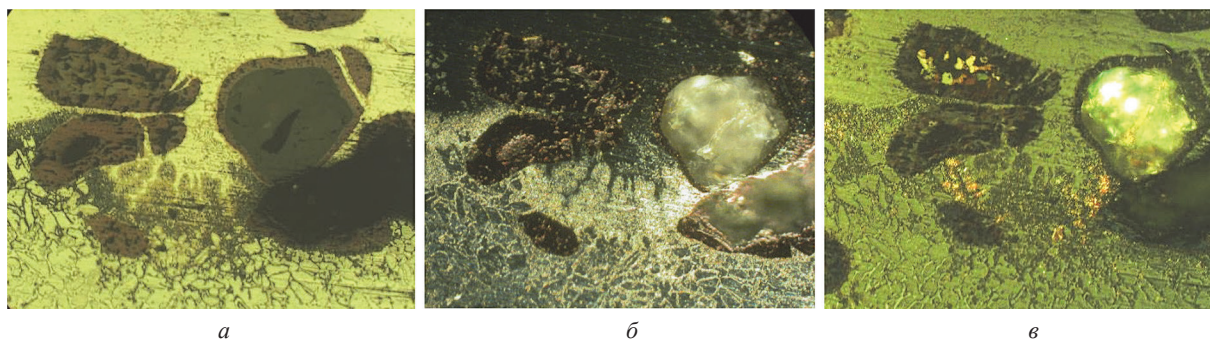


Рис. 3. Видоизменение структуры образца системы NiTi+TiO при изменении способа освещения в микроскопе: *a* – светлое поле; *б* – темное поле; *в* – поляризованный свет

ная микроскопия; люминесцентная микроскопия; интерференционный контраст; диафрагмирование; цветные фильтры.

Применение этих методов позволяет визуализировать детали изображения структуры материалов. Наиболее часто в традиционной металлографии применяются темнопольное освещение и поляризованный свет. На рис. 3 показано видоизменение структуры оксидной системы, полученной по методу СВС, при использовании различных способов контрастирования. Освещение по методу светлого поля проявляет не все детали структуры (рис. 3, *a*). Применение темного поля (рис. 3, *б*) визуализирует сформировавшиеся крупные частицы и дендритную структуру. В поляризованном свете (рис. 3, *в*) видны включения непрореагировавших материалов как локализованных, так и рассеянных в междендритных пространствах.

Поляризованный свет традиционно использовали в металлографии для выявления неметаллических включений в металлах и сплавах. При взаимодействии поляризованного света с прозрачными глобулярными включениями [3] формируется специфическая световая фигура – темный крест, что является доказательством кристалличности включения. Такие эффекты наблюдаются и в неметаллических материалах на дефектах определенной конфигурации. На рис. 4 показаны световые фигуры, формирующиеся на внутренних сферических полостях в оптически прозрачном материале на основе эпоксидной смолы. В светлом поле основная масса дефектов не видна. При использовании темного поля и поляризованного света на месте дефектов формируются специфические световые фигуры. Использование явления интерференции поляризованного света (рис. 5) позволяет проводить цветовой анализ особенностей литой структуры [4].

Развитие металлографии в Беларуси тормозится в силу ряда проблем. Применение специальных методов и методик затрудняется **отсутствием средств** для обновления материально-технической базы научных исследований как в научно-исследовательских институтах, так и в заводских лабораториях, и в связи с этим отсутствием иногда у металловедов сведений о возможностях металлографического оборудования. Более серьезной проблемой является **отсутствие специалистов**. Основная причина – низкая оплата труда и невостребованность специалистов в связи с сокращением как производства, так

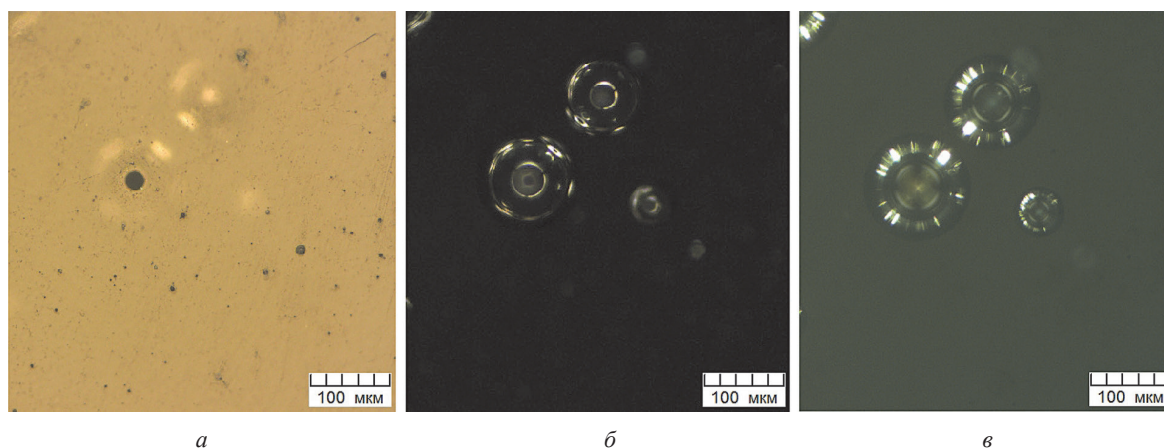


Рис. 4. Световые фигуры на сферической полости: *а* – светлое поле; *б* – темное поле; *в* – поляризованный свет, николи скрещены

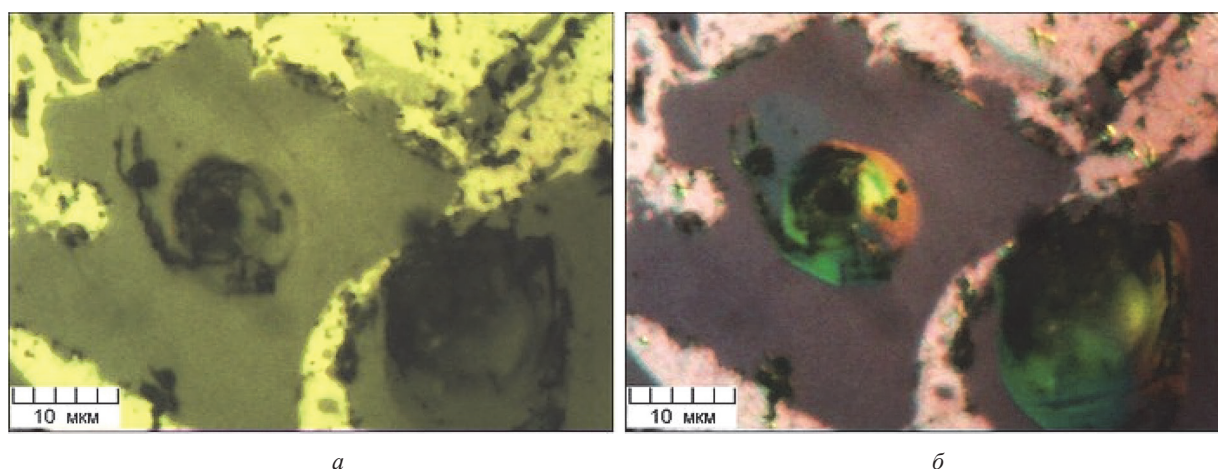


Рис. 5. Легированный силумин: *а* – светлое поле; *б* – дифференциально-интерференционный контраст

и научных центров. Как следствие, снижение уровня специалистов, а также предельное повышение возраста работающих.

На русскоязычном пространстве специальная *литература по металлографии* издавалась в 60-е и 70-е годы прошлого века. Иллюстрации, приведенные в ней, сделаны на микроскопах типа МИМ или Neophot. Имеются переводные издания [5], а также российское [6]. Но в них основное внимание уделяется оборудованию или описанию оптических принципов получения изображения. Иллюстраций в виде структур материалов в них немного. В настоящее время магазины наводнены литературой по металлвоведению или материаловедению без иллюстраций структур металлов. В принципе, существуют атласы микроструктур металлов и сплавов, изданные в разное время, в том числе и переводные издания, которые актуальны до сих пор и металловеды ими широко пользуются. Но новый уровень металлографического оборудования позволяет видеть структуру в несколько иной ипостаси. Поскольку в нашем распоряжении увеличение более 2000 крат и видеокамеры большого разрешения, то можно наблюдать особенности структуры, которые ранее были нам недоступны именно методами металлографии. Пример представлен на рис. 6.

Интернет к настоящему моменту прочно вошел в нашу жизнь. Мы не можем игнорировать тот факт, что студенты (да и многие специалисты) пользуются им для получения, в том числе и справочных сведений. Следует принять, что интернет в настоящее время выполняет роль образовательной базы, хотя бы уже тем, что там можно найти всю классику металлвоведческой литературы.

Методы оптической микроскопии в интернете (в русскоязычной его части) представлены на сайтах, посвященных в основном пробоподготовке. Обнаруживается явный недостаток современных сведений о металлографии, в том числе о способах и методах получения изображения структур разнообразных материалов. Это достаточно несправедливо; при поиске, например по запросу «темнопольная микроскопия», можно найти много данных, относящихся к биологии и медицине, но не к металлографии. Очень мало представлено изображений реальных структур, полученных с помощью разнообразных методик

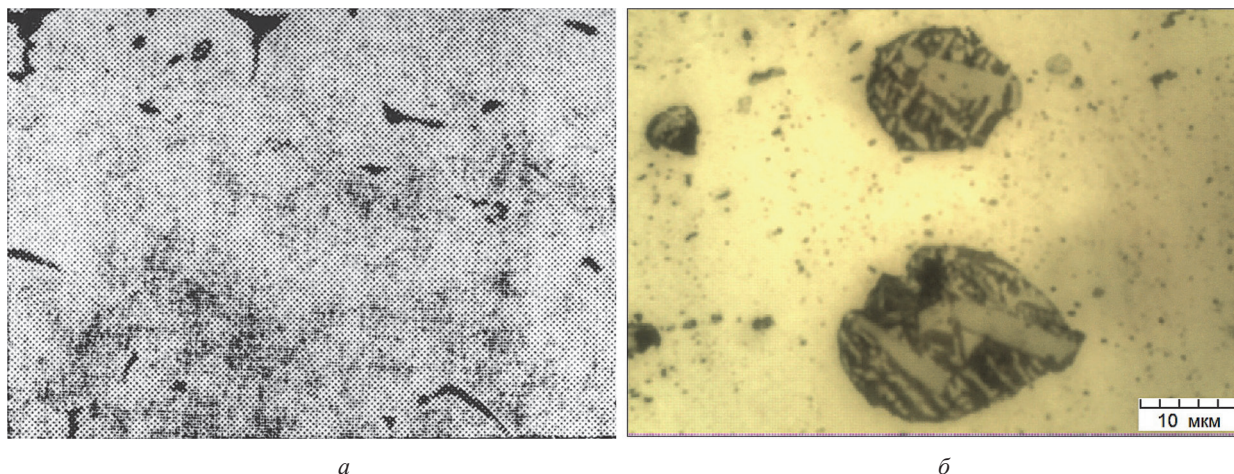


Рис. 6. Участки эвтектики, сформировавшиеся при пережоге сплава Д16: *а* – литературные данные [7], $\times 100$; *б* – современная съемка [8]

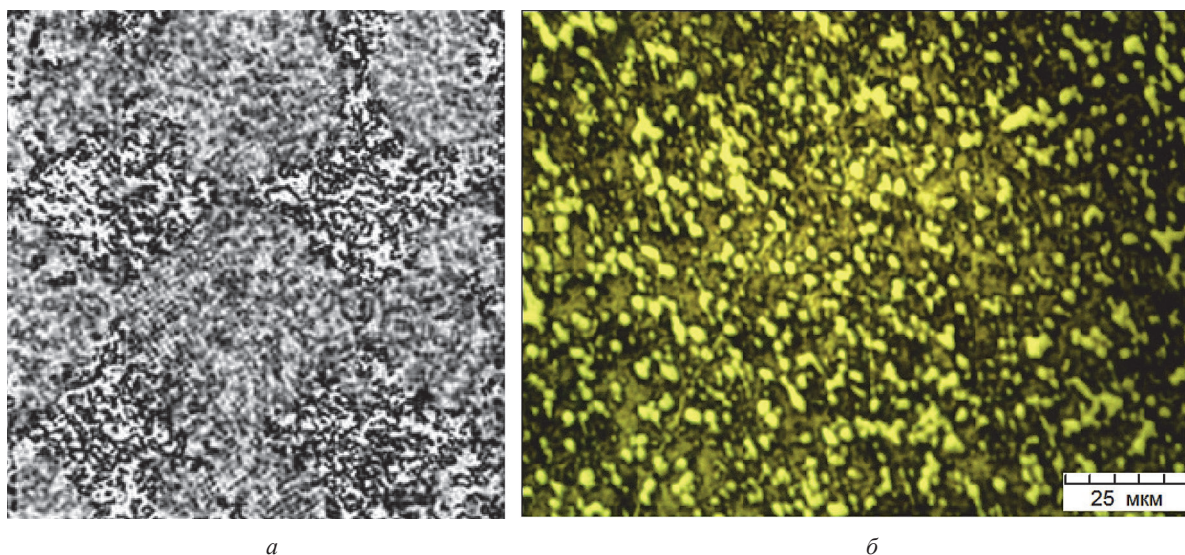


Рис. 7. Структура зернистого перлита: *а* – предлагаемая на <http://www.conatem.ru>; *б* – фотография на современном микроскопе

металлографического анализа. Основная масса структур материалов (металлов), представленных в интернете, – это копии из книг, изданных достаточно давно. Поэтому качество таких изображений невысокое. В отдельных случаях на таких изображениях невозможно вообще что-либо разобрать или же они дают неверную информацию. Пример представлен на рис. 7. Для сравнения на рис. 7, *б* показана структура зернистого перлита, полученная на современном оборудовании.

Отдельную проблему представляют стандарты, которые, с одной стороны, должны давать специалистам эталоны структур и/или брака, с другой – предоставлять возможности количественной обработки изображений. В большинстве своем имеющиеся стандарты, регламентирующие структуру металлов и сплавов, созданы во второй половине прошлого века. Для примера можно привести следующие документы:

- 1763-68. Сталь. Методы определения глубины обезуглероженного слоя.
- 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений.
- 5640-68. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и лент.
- 9391-80. Сплавы твердые спеченные. Методы определения пористости и микроструктуры.
- 10243-75. Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры.
- 13938.13-93. Медь. Методы определения кислорода.
- 21073.1-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур.
- 22838-77. Сплавы жаропрочные. Методы контроля и оценки макроструктуры.

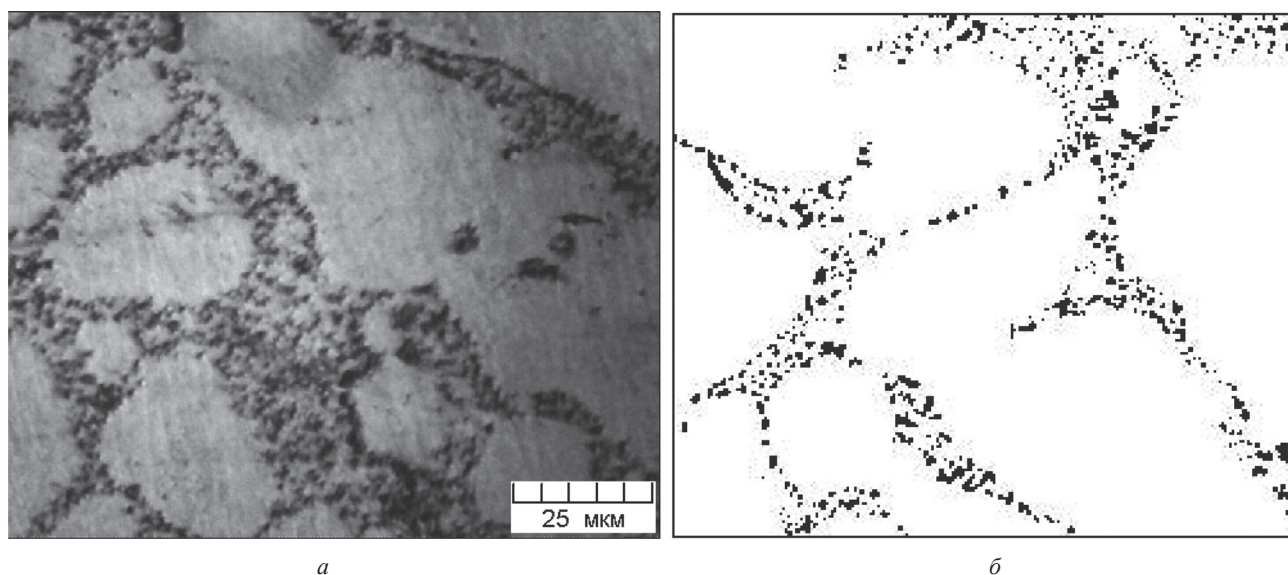


Рис. 8. Структура кислородной меди с содержанием кислорода $\sim 0,09\%$ (а); фрагмент эталона структуры по ГОСТ 13938.13-93, чертеж 11 с соответствующим содержанием кислорода (б). а – $\times 800$; б – $\times 200$

Как можно заметить, все эти стандарты изданы давно. Обновление базы стандартов проводится. Но часто стандарт просто регистрируется заново без существенных изменений с использованием старых изображений структуры. Например, ГОСТ 13938.13-93 [9]. Проблемой действующих стандартов является не только низкое качество иллюстративного материала. Большинство ГОСТ с момента их разработки уже давно устарели морально. Даже учитывая все трудности постсоветского времени, технологии развиваются, получаемые материалы обладают все более дисперсной структурой, и масштаб иллюстраций, предоставляемых ГОСТ, уже не соответствует потребностям практики. В частности, одним из методов анализа, распространенных в металлографических лабораториях, является определение содержания кислорода в меди. Для медного литья это один из важнейших показателей качества. Определение количества кислорода в литой меди производится на основе ГОСТ 13938.13-93. Эталоны микроструктур кислородной меди приводятся в данном стандарте для увеличения 200 крат (рис. 8). При современных способах литья такой масштаб изображения структуры получается при увеличении 800 крат. Те же соотношения можно привести и для многих других стандартов. Изменение увеличения для анализа может повлечь за собой изменение точности. Кроме того, любой стандарт имеет силу закона, а нарушение процедуры недопустимо.

Следует отметить также, что иллюстративная база не соответствует современному уровню развития металлографии. Современное оборудование позволяет иногда видеть особенности структуры материалов, которые трудно было заметить с помощью оборудования прошлого времени. В стандартах же, помимо небольшого увеличения, имеет место некачественная печать, что снижает возможности анализа. Как уже отмечалось выше, требуется переиздание металлургической литературы на современном уровне. Такие попытки нами делаются [10], пока применительно к учебному процессу.

Некачественная редакция стандартов, трудности анализа металлов по старым ГОСТ, несоответствие существующих стандартов современному уровню металлографического оборудования приводят к невозможности забраковать металлопродукцию, а также противостоять мошенничеству [11]. Совершенствование технологий, в том числе литейных, сопровождается совершенствованием металлографического анализа – оборудования, методик, способов пробоподготовки, а также появлением новых способов анализа. В свое время таким новым методом стал компьютерный анализ изображений, который перевел металлографию на качественно новый уровень.

Стандарты по определению балла зерна, количества или дисперсности перлита являются уже количественной металлографией. Стандартный подход предполагает переход от общего к частному – создание эталонов структур (которые надо промерить 1 раз), которыми можно пользоваться для оценки определенных параметров структуры материалов. Это усредненные параметры, величина которых связана с понятием «балл» конкретной структуры. В свое время методы количественного анализа в металлографии были описаны в [12].

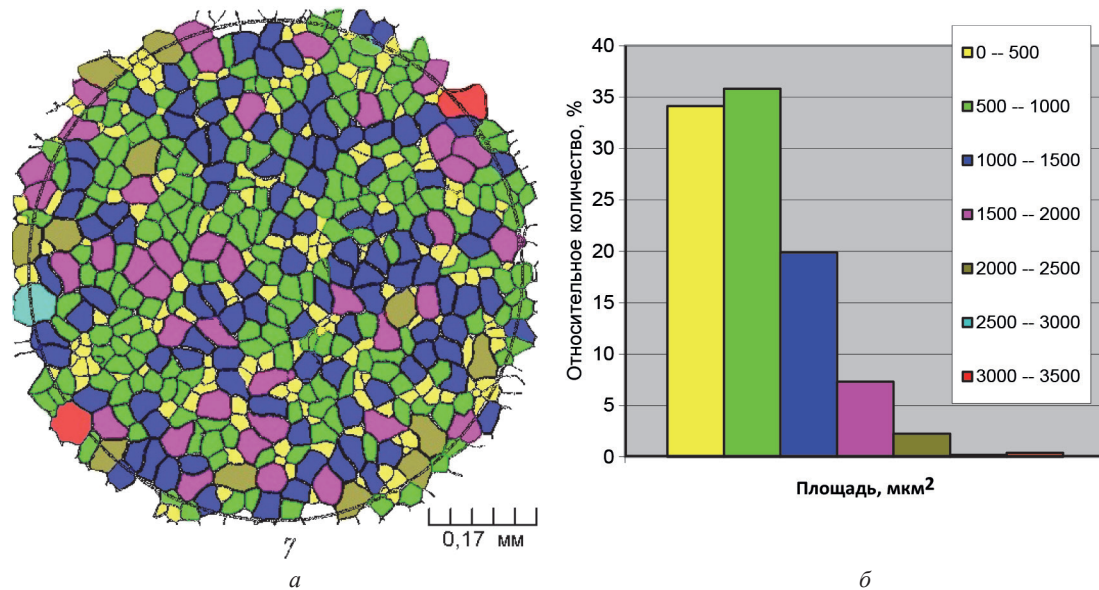


Рис. 9. Маска изображения зерен (а) и гистограмма распределения зерен по размерам (б)

Современная количественная металлография обеспечивается программами обработки изображений. Эти программы дают возможность выбрать конкретные объекты, подлежащие анализу – зерна, фазы, различные включения, и определить их количественные параметры: площадь, длину и ширину, периметр и т. д. Набор параметров определяется конкретной программой. После определения количественных параметров возможен анализ статистических характеристик объектов (зерен, фаз и др.) в виде графика или таблицы, где отображается распределение обнаруженных объектов по выбранному параметру. Можно провести математическую обработку результатов, создать файлы в Word или Excel, построить разнообразные математические зависимости. В основе методов количественного анализа изображений лежат принципы стереометрической металлографии [13]. В этом разделе металлографии теоретически обоснованы основные методы определения размера структурных составляющих, их количества, а также расчета состава сплавов исходя из данных количественного анализа.

Развитие компьютерных методов дает возможность измерить непосредственно геометрические параметры каждой структурной единицы, обработать результаты и получить ряд определенных зависимостей – распределений определенной величины (размера зерна, диаметра и др.) по размерам (частотная кривая). В отличие от методов ГОСТ компьютерные программы количественного анализа изображений идут от частного к общему – измеряют количественные характеристики каждого из выбранных объектов, а потом уже определяют, в том числе усредненные параметры структуры. В данной статье пример количественного анализа изображений дан для программы IMAGE-SP.

Определение площади объектов в программе обработки изображений – наиболее объективный вид анализа. Анализируемый объект «состоит» из пикселей изображения. А поскольку метрическая часть программы откалибрована, то каждый пиксел имеет площадь. Количественно эта площадь определяется увеличением при съемке и разрешением камеры (или фотоаппарата). Таким образом, определение площади в программе обработки изображений – это суммирование площадей всех пикселей, составляющих объект [14]. На рис. 9 показаны результаты определения площадей зерен для эталона № 7 ГОСТ 5639-82. Зерна каждого размерного класса выделены определенным цветом (так называемая «маска»). По результатам построена гистограмма распределения зерен по размерам. По ГОСТ 5639-82 средняя площадь зерна составляет $0,00098 \text{ мм}^2$ (980 мкм^2). Максимальное количество зерен принадлежит интервалу площадей $500\text{--}1000 \text{ мкм}^2$.

Определение площадей лежит в основе металлографических методик определения состава сплава по объему его структурных составляющих. Широко используются методики определения углерода в стали [15], кислорода в меди [16, 17]. Ниже представлено определение количества углерода в высокопрочном чугуна в программе обработки изображений IMAGE-SP.

Структурными составляющими чугуна являются графит, феррит и перлит; свободный цементит отсутствует. Основная доля углерода сосредоточена в графите, меньшая часть приходится на перлит. В программе обработки изображений выделены участки, занимаемые фазовыми составляющими (рис. 10).

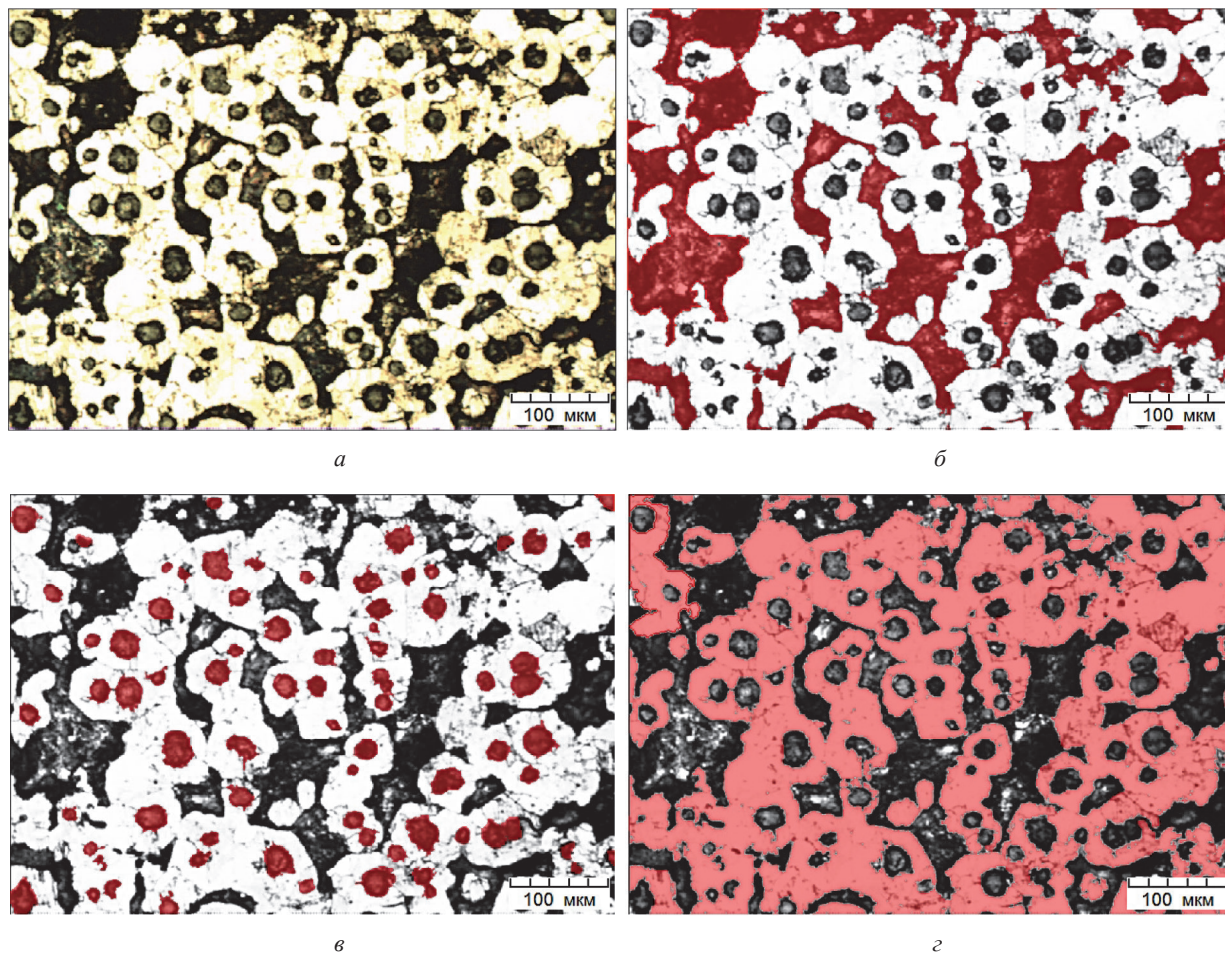


Рис. 10. Определение площадей структурных составляющих высокопрочного чугуна: а – исходная структура; б–г – определение площадей, занятых перлитом, графитом и ферритом соответственно

Согласно [13], доля площади фазы на шлифе и ее объемная доля равны. Массовую долю углерода в структуре, считая матрицу чугуна углеродистой сталью, можно определить по соотношению:

$$G_c = \frac{d_c \sum V_c}{d_c \sum V_c + d_m \sum V_m} \cdot 100\%,$$

где d_m и d_c – соответственно плотности матрицы чугуна и графита; V_c и V_m – соответственно объемные доли графита и матрицы; $d_c = 2,1 \text{ г/см}^3$ – справочные данные.

Поскольку матрица чугуна представляет собой смесь феррита и перлита, то ее можно считать сталью с определенным количеством углерода, рассчитать количество углерода по известной методике определения углерода в доэвтектоидной стали. В матрице чугуна содержится 0,27% углерода. Плотность матрицы чугуна принята как плотность стали 30: $d_m = 7,2 \text{ г/см}^3$ – справочные данные, $V_c = 10,8\%$, $V_m = 89,2\%$, $G_c = 3,41$, т. е. 3,41% углерода приходится на графит. Итого 3,68% углерода в структуре, что соответствует ВЧ50.

Одним из наиболее важных параметров, определяющих свойства чугуна, является форма его графитных включений. Она оказывает значительное влияние на прочность и пластические свойства чугуна, поэтому существует необходимость в современных методиках анализа и контроля структуры чугуна.

Для оценки структуры чугуна применяется ГОСТ 3443-87 «Отливки из чугуна с различной формой графита», согласно которому графит в структуре чугуна эталонирован по форме, размеру включений, по количеству и распределению включений. Оценка структуры чугуна проводится визуально сопоставлением структуры, видимой в микроскопе, со структурой эталона соответствующей шкалы.

Возможности анализа структуры чугуна в программе обработки изображений «Image SP» проиллюстрированы на примере шкалы 3 «Определение графита в структуре высокопрочного чугуна с шаровидным графитом» ГОСТ 3443-87.

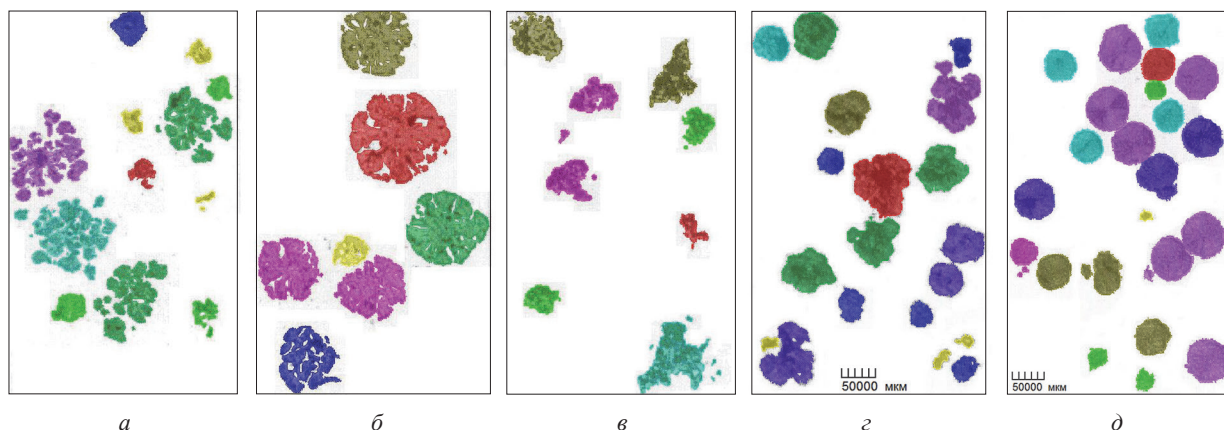


Рис. 11. Маски обнаружения объектов в программе IMAGE SP для различных форм графита: *a* – разорванная; *б* – звездочкообразная; *в* – компактная; *г* – шаровидная неправильная; *д* – шаровидная правильная

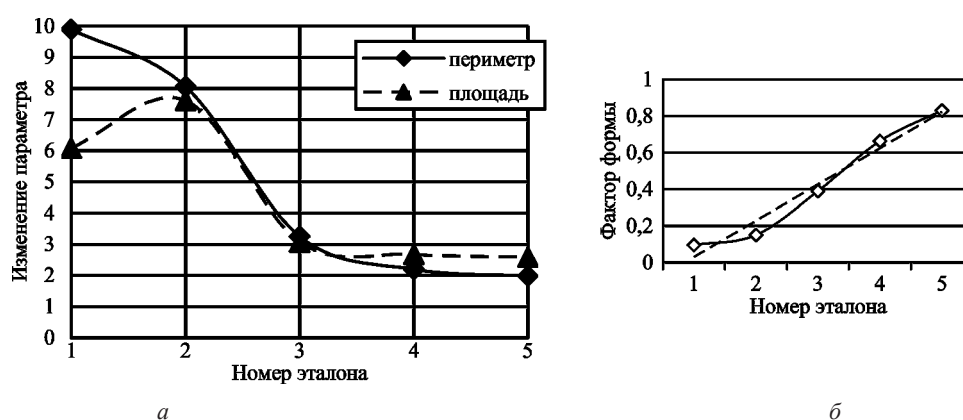


Рис. 12. Изменение геометрических характеристик графита высокопрочного чугуна: *a* – площадь и периметр (периметр, мкм · 10⁵; площадь, мкм · 10⁹); *б* – фактор формы

Формы графита в данной шкале различаются морфологией (рис. 11). Задача при попытке компьютерной классификации формы графита заключается в нахождении безразмерного параметра, который имел бы характерное значение для каждой формы. Площадь или линейные размеры такими параметрами быть не могут. В качестве независимого параметра может использоваться фактор формы:

$$F = 4\pi S/P^2,$$

где S – площадь; P – периметр. Фактор формы показывает, насколько объект отличается от правильной круговой формы. Чем больше от круговой формы отличается фигура, тем меньше отношение площади к периметру. Фактор формы круга равен 1, для квадрата $F = 0,785$, для равностороннего треугольника $F = 0,605$.

На рис. 12 показано изменение площади, периметра и фактора формы. Из рисунка видно, что площадь и периметр не имеют характерных значений, относящихся к конкретной форме графита. Значение фактора формы закономерно увеличивается по мере приближения формы графита к шаровидной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисович А. Г. Практика металлографического исследования материалов / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева. Минск: Беларуская навука, 2013. 221 с.
2. Анисович А. Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А. Г. Анисович // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2016. № 1. С. 36–42.
3. Анисович А. Г. Применение поляризованного света в анализе металлов и сплавов / А. Г. Анисович // Литье и металлургия, 2012. № 3(67). С. 146–151.
4. Анисович А. Г. Визуализация поверхности методом дифференциально-интерференционного контраста / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева // Литье и металлургия, 2013. № 3(72). С. 156–162.
5. Кларк Э. Р. Микроскопические методы исследования материалов / Э. Р. Кларк, К. Н. Эберхардт. М.: Техносфера, 2007. 376 с.
6. Егорова О. В. Техническая микроскопия. С микроскопом на «ты» / О. В. Егорова. М.: Техносфера, 2007. 376 с.
7. Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. М.: Металлургия, 1977. 647 с.

8. **Металлография** // Structure. by [Электронный ресурс]. 2016. Режим доступа: <http://www.structure.by>. Дата доступа: 12.08.2016.
9. **Анисович А. Г., Урбан Т. П., Буйницкая А. С.** Определение плотности куприта // Тр. 23-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь», Минск, 21–22 октября 2015. С. 66–70.
10. **Анисович А. Г.** Микроструктуры черных и цветных металлов / А. Г. Анисович, А. А. Андрушевич. Минск: Беларуская наука, 2015. 131 с.
11. **Анисович А. Г.** Антипродукция: проблема качества металла / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева // Литье и металлургия. 2009. № 3(52). С. 127–131.
12. **Блантер М. Е.** Методика исследования металлов и обработки опытных данных / М. Е. Блантер. М.: Металлургиздат, 1952. 444 с.
13. **Салтыков С. А.** Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. М.: Металлургия, 1976. 272 с.
14. **Анисович А. Г.** Определение балла зерна стали компьютерными методами / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева, Л. В. Бислюк // Литье и металлургия. 2010. № 3. С. 100–104.
15. **Андрушевич А. А.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Материаловедение: практикум / А. А. Андрушевич и др. 2-е изд. Минск: БГАТУ, 2013. 176 с.
16. **Анисович А. Г.** Проблемы металлографического определения количества кислорода в деформированной меди / А. Г. Анисович // Литье и металлургия. 2014. № 1. С. 74–78.
17. **Анисович А. Г.** Определение содержания кислорода в меди методом компьютерного анализа изображений / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева, П. Н. Мисуно // Литье и металлургия. 2010. № 1–2. С. 306–310.

REFERENCES

1. **Anisovich A. G., Rumjanceva I. N.** *Praktika metallograficheskogo issledovaniya materialov* [Practice metallographic research materials]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2013, 221 p.
2. **Anisovich A. G.** *Iskusstvo metallografii: ispol'zovanie metodov opticheskogo kontrastirovaniya* [The Art of Metallography: Using Optical Contrasting Techniques]. *Vesci NAN Belarusi = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical series*, 2016, no. 1, pp. 36–42.
3. **Anisovich A. G.** *Primenenie poljarizovannogo sveta v analize metallov i splavov* [The use of polarized light in the analysis of metals and alloys]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 146–151.
4. **Anisovich A. G., Rumjanceva I. N.** *Vizualizacija poverhnosti metodom differencial'no-interferencionnogo kontrasta* [Surface Visualization by Differential Interference Contrast]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 3, pp. 156–162.
5. **Klark Je. R., Jeberhardt K. N.** *Mikroskopicheskie metody issledovaniya materialov* [Microscopic methods for the study of materials]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2007, 376 p.
6. **Egorova O. V.** *Tehnicheskaja mikroskopija. S mikroskopom na «ty»* [Technical microscopy. With a microscope on «you»]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2007, 376 p.
7. **Guljaev A. P.** *Metallovedenie* [Metal science]. Moscow, Metallurgija Publ., 1977, 647 p.
8. **www.structure.by.**
9. **Anisovich A. G., Urban T. P., Bujnickaja A. S.** *Opredelenie plotnosti kuprita* [Determination of cuprite density]. *Trudy 23-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2015. Belarus'», Minsk, 21–22 oktjabrja 2015 = Proceedings of the 23rd International Scientific and Technical Conference «Foundry Production and Metallurgy 2015. Belarus», Minsk, October 21–22, 2015. P. 66–70.*
10. **Anisovich A. G., Andrushevich A. A.** *Mikrostruktury chernyh i cvetnyh metallov* [Microstructures of ferrous and non-ferrous metals]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2015, 131 p.
11. **Anisovich A. G., Rumjanceva I. N.** *Antiprodukcija: problema kachestva metalla* [Anti-production: quality metal problem]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 3, pp. 127–131.
12. **Blanter M. E.** *Metodika issledovaniya metallov i obrabotki opytnyh dannyh* [Methods of research metals and processing of experimental data]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1952, 444 p.
13. **Saltykov S. A.** *Stereometricheskaja metallografija* [Stereometric metallography]. Moscow, Metallurgija Publ., 1976, 272 p.
14. **Anisovich A. G., Rumjanceva I. N., Bisljuk L. V.** *Opredelenie balla zerna stali komp'juternymi metodami* [Determination of grain points have become computerized]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 3, pp. 100–104.
15. **Andrushevich A. A.** *Materialovedenie. Tehnologija konstrukcionnyh materialov. Materialovedenie: praktikum* [Science of Materials. Technology of construction materials. Science of Materials: Workshop]. Minsk, BGATU Publ., 2013, 176 p.
16. **Anisovich A. G.** *Problemy metallograficheskogo opredelenija kolichestva kisloroda v deformirovannoj medi* [Problems of metallographic determination of the amount of oxygen in deformed copper]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 1, pp. 74–78.
17. **Anisovich A. G., Rumjanceva I. N., Misuno P. N.** *Opredelenie soderzhaniya kisloroda v medi metodom komp'juternogo analiza izobrazhenij* [Determination of oxygen content in copper by computer image analysis]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 1–2, pp. 306–310.