



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-106-116>
УДК 669.13.017:620.18; 669.13.017:620.17

Поступила 01.04.2024
Received 01.04.2024

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВО ВКЛЮЧЕНИЯХ ГРАФИТА В ЛИТОМ И ДЕФОРМИРОВАННОМ ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ

А. И. ПОКРОВСКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: arturu@tut.by
С. В. ГРИГОРЬЕВ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65

Для понимания механизма зарождения и роста графитных включений при высокотемпературной кристаллизации расплава чугуна чрезвычайно важны данные о том, как распределяются химические элементы в графите. Это также важно и для понимания механизмов последующей пластической деформации чугуна.

Описана специфика микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) графитных включений сферической формы в чугуне, связанная с выбором исследуемого сечения образца. Наиболее достоверны и информативны результаты, когда включение графита рассекается плоскостью шлифа ровно посередине.

Проведен сравнительный МРСА распределения химических элементов по сечению графитных включений в литом и деформированном (методом горячего выдавливания) высокопрочном чугуне. В литом состоянии в центре включений, помимо основного элемента (углерода), обнаружены аномалии распределения концентраций ряда элементов. Магний, кремний, сера, кислород, иногда железо показывают повышенное содержание в центре. Это, вероятно, связано с наличием в расплаве чугуна при кристаллизации микрочастиц оксидов, сульфидов и оксисульфидов (либо включений кремнистого феррита), на которых в дальнейшем происходит рост графитных включений.

В деформированном чугуне аномалии распределения элементов во включениях в значительной мере устраняются и распределение становится более однородным, причем чем выше степень обжатия, тем выше однородность химического состава. Так, в некоторой мере неоднородность распределения состава еще встречается в продольном сечении при деформации со степенью обжатия 60%. При степени обжатия 80% включение в поперечном сечении становится практически полностью однородным по химическому составу.

Ключевые слова. Высокопрочный чугун, включения, графит, распределение химических элементов, пластическая деформация чугуна, микрорентгеноспектральный анализ.

Для цитирования. Покровский, А. И. Особенности распределения химических элементов во включениях графита в литом и деформированном высокопрочном чугуне / А. И. Покровский, С. В. Григорьев // *Литье и металлургия*. 2024. № 2. С. 106–116. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-106-116>.

SPECIFIC OF DISTRIBUTION OF CHEMICAL ELEMENTS IN GRAPHITE INCLUSIONS IN AS-CAST AND DEFORMED DUCTILE CAST IRON

A. I. POKROVSKY, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str. E-mail: arturu@tut.by
S. V. GRIGOR'EV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

The knowledge about distribution of chemical elements in graphite is crucial for understanding the mechanism of nucleation and growth of graphite inclusions during high-temperature crystallization of a cast iron melt. It is also important for understanding the mechanisms of subsequent plastic deformation of cast iron.

The specificity of the electron probe microanalysis (EPMA) of spherical graphite inclusions in cast iron, which is connected with a selection of the specimen's cross-section to be studied, is described. The most reliable and informative results are obtained when the graphite inclusion is cut by a plane of the metallographic section exactly in the middle.

Comparative EPMA is performed of the profiles of chemical elements over a cross-section of graphite inclusions in the as-cast and deformed (by hot extrusion) ductile iron. It is found that in the as-cast state, the center of inclusions, in addition to the main element (carbon), features anomalies in the concentration profiles of a number of elements. Magnesium, silicon, sulfur, oxygen and sometimes iron exhibit increased content in the center. This can be attributed to the presence of oxide, sulfides and oxysulfide microparticles in the cast iron melt during crystallization (or inclusions of silicon-containing ferrite) on which graphite inclusions subsequently grow.

In the deformed cast iron, anomalies in the concentration distribution of elements in the inclusions are largely eliminated and their distribution becomes more uniform. The higher the reduction ratio, the larger is the homogeneity of the chemical composition.

tion. To some extent, the heterogeneity of the composition distribution is still found in the longitudinal section at deformation with the reduction ratio of 60%. For the reduction ratio of 80%, in cross section the inclusion becomes almost completely homogeneous in chemical composition over the in cross section.

Keywords. Ductile cast iron, graphite inclusions, concentration profile of elements, electron probe microanalysis.

For citation. Pokrovsky A. I., Grigor'ev S. V. Specific of distribution of chemical elements in graphite inclusions in as-cast and deformed ductile cast iron. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 2, pp. 106–116. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-106-116>.

Введение

Чугун занимает ведущее место среди современных машиностроительных материалов. Мировой выпуск всех типов чугунов, по данным журнала «Modern Casting» [1], стабилизировался на 80 млн. т. При этом наблюдается устойчивая тенденция увеличения объемов использования наиболее высокопрочных марок, когда уже более четверти (20 млн. т) всех выпускаемых в мире отливок изготавливаются из высокопрочного чугуна (ВЧ) [2]. Началом эпохи ВЧ послужил разработанный Keith Dwight Millis [3] способ модифицирования чугуна путем введения небольших добавок магния на стадии разливки в ковш.

Области применения ВЧ чрезвычайно широки, причем он уверенно конкурирует со стальными деталями в станкостроении, автомобилестроении и железнодорожном транспорте [4] и распространяется сейчас не только на детали машин, но и на инструмент (например, почвообрабатывающий).

Пожалуй, главным, до конца не выясненным вопросом структурообразования ВЧ при литье является механизм формирования сферических включений графита. Именно эти включения ответственны за высокие прочностные и антифрикционные характеристики этого материала, способность быстро гасить вибрации, меньший, чем у стали, удельный вес, повышенную теплопроводность. Существует большое число теорий и гипотез формирования шаровидного графита в литой структуре чугунов [5]. Можно выделить несколько школ исследователей механизмов зарождения графита: так называемая «украинская» [6–8] и школа известного американского ученого Doru M. Stefanescu [9–13]. На сегодняшний день превалирует гипотеза зарождения включений графита на оксидах, сульфидах, окисульфидах и других подобных включениях.

Перспективным вариантом дальнейшего совершенствования структуры и свойств ВЧ является обработка литой заготовки с использованием горячей пластической деформации, например, выдавливания [14]. Она позволяет путем существенной модификации структуры добиться еще большего повышения механических свойств. Форма графитных включений при этом отклоняется от шаровидной, превращаясь в веретенообразную и волокнистую [15, 16]. Причем структурообразование графитных включений в высокопрочном чугуне при горячей пластической деформации имеет свои особенности [17], а механизм пластической деформации графита предложено оригинальное объяснение [18].

Представляет интерес проследить как при переходе от литого к деформированному состоянию изменяется состав графитных включений. Это позволит лучше понять процессы, происходящие при зарождении включений и их последующей пластической деформации.

Наиболее информативным методом исследований состава включений графита нам представляется локальный МРСА, когда на сканирующем электронном микроскопе по поверхности перемещается электронный луч и в результате взаимодействия пучка электронов с образцом образуется, в том числе и рентгеновское излучение. В случае чугунов на микрошлифе с помощью электронного луча исследуются сечения графитных включений, пересекая его в разных направлениях.

Цель работы – сравнительные исследования распределения химических элементов во включениях графита в литом и деформированном высокопрочном чугуне.

Материалы и методики

Исследовали ВЧ следующего химического состава: 3,52 мас.% углерода, 2,0 мас.% кремния, 0,5 мас.% марганца, 0,3 мас.% никеля, 0,05 мас.% магния, 0,08 мас.% фосфора, 0,01 мас.% серы.

Чугун выплавляли в индукционной печи объемом тигля, рассчитанном на 150 кг по известной технологии, модифицировали известными модификаторами: сфероидизирующим ФСМГ7К03 и графитизирующим ферросилицием ФС75. Затем из вертикально отлитых в песчаные формы заготовок вытачивали цилиндрические образцы для последующего горячего выдавливания из них деформированных прутков. Проведенные известными методами механические испытания показали, что по прочности чугун соответствует марке ВЧ50.

Пластическую деформацию чугуновой заготовки выполняли на серийном кривошипно-шатунном прессе при температуре 950 °С в подогретом до 250 °С штампе методом прямого выдавливания по методике, описанной в [14]. Изготовление и травление шлифов проводили по стандартным методикам, в качестве травителя использовали 5%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте (ниталь).

Для предварительного анализа микроструктуры использовали металлографический комплекс МКИ-2М. Микрорентгеноспектральные исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LMU с микроанализатором INKA Energy 350, сканирующем зондовом микроскопе «Solver PRO-M».

Исследуемые включения представляли собой шар (в литом состоянии) и веретенообразные и волокноподобные фигуры (в зависимости от степени обжатия) в деформированном состоянии. Внешний вид включений в аксонометрии, полученных по специальной методике электролитического вытравливания [17], показан на рис. 1, *a–в*, а соответствующие микроструктуры – на рис. 1, *г–е*.

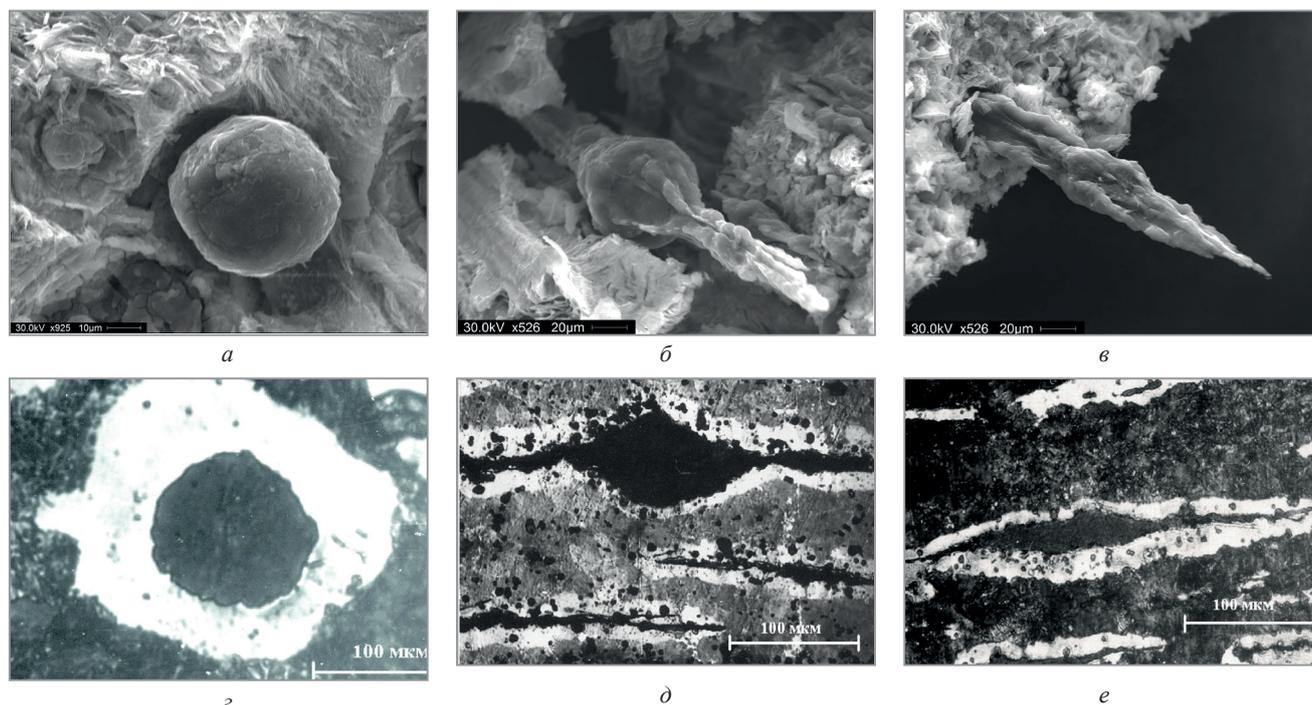


Рис. 1. Внешний вид включений графита в литом (*a, г*) и деформированном (*б, в, д, е*) состоянии:
a–в – РЭМ изображения электролитически вытравленных включений [17];
г–д – изображения микроструктуры на металлографических шлифах [14]

Результаты и их обсуждение

Специфика МРСА графитных включений в высокопрочном чугуне

В первую очередь нужно отметить, что исследования проводили на полированном металлографическом шлифе, где включения графита расположены в металлической матрице, которая имеет кардинально отличный от включения состав. Поэтому существует определенная специфика их дифференциации, которую нужно учитывать. Она связана с тем, что пучок электронов из электронной пушки сканирующего электронного микроскопа попадает на поверхность образца и взаимодействует с приповерхностной областью исследуемого материала глубиной Δ (для графита составляющей в первом приближении 5 мкм). Генерация характеристического рентгеновского излучения происходит в результате неупругого взаимодействия между пучками электронов и определенной областью образца. Поэтому для уверенности в том, что определяется именно состав графита, а не интегрированный химический состав графита совместно с расположенной под ним металлической матрицей толщина слоя графита должна составлять не менее 5–10 мкм (сравним размеры Δ и Δ_1 на рис. 2).

При этом можно столкнуться с тремя вариантами расположения графитных включений на исследуемом шлифе (рис. 2).

Как видно из рисунка, по краям включения слой графита слишком тонкий и результат анализа включает в себя интегрированные результаты с низлежащими слоями металлической матрицы. Поэтому

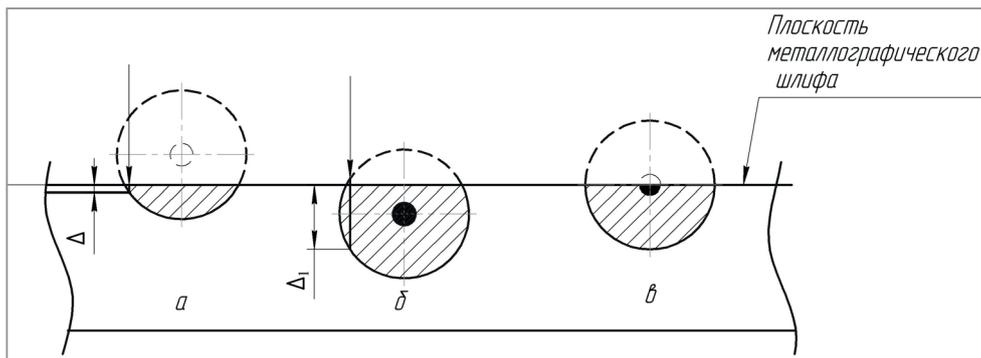


Рис. 2. Различные варианты расположения исследуемых графитных включений на поверхности металлографического шлифа, когда ось симметрии включения проходит выше плоскости шлифа (а); ниже плоскости шлифа (б); совпадает с плоскостью шлифа (наиболее оптимальный вариант) (в)

результаты, представленные таким расположением графита, когда ось симметрии включения проходит выше плоскости шлифа, следует считать недостаточно достоверными.

Как правило, в случае расположения оси симметрии выше плоскости шлифа кривая интенсивностей углерода имеет куполообразный характер с плавным «выполаживанием» в горизонтальную линию. Из-за пластичности железа и малой прочности графита на краю всегда будет наблюдаться в большей или меньшей степени плавное изменение концентрации элементов на краю частичек из-за «намазывания» этих элементов друг на друга при приготовлении шлифа. В идеальном случае нужно устранять намазывание с помощью ионного травления поверхности шлифа. Но поскольку в данной работе оно не производилось, учитывали то, что «выполаживание» может быть не только из-за элементов, лежащих под частицей, но и на частице.

Более благоприятным вариантом расположения является случай (рис. 2, б), когда ось симметрии проходит ниже плоскости шлифа. На рис. 3 показан пример, иллюстрирующий вышесказанное. В случае, когда ось симметрии включения проходит ниже плоскости шлифа, характер кривой существенно изменяется. Кривая интенсивности углерода имеет вид, близкий к горизонтальному плато, которое по краям достаточно резко обрывается вниз (рис. 4, а–г).

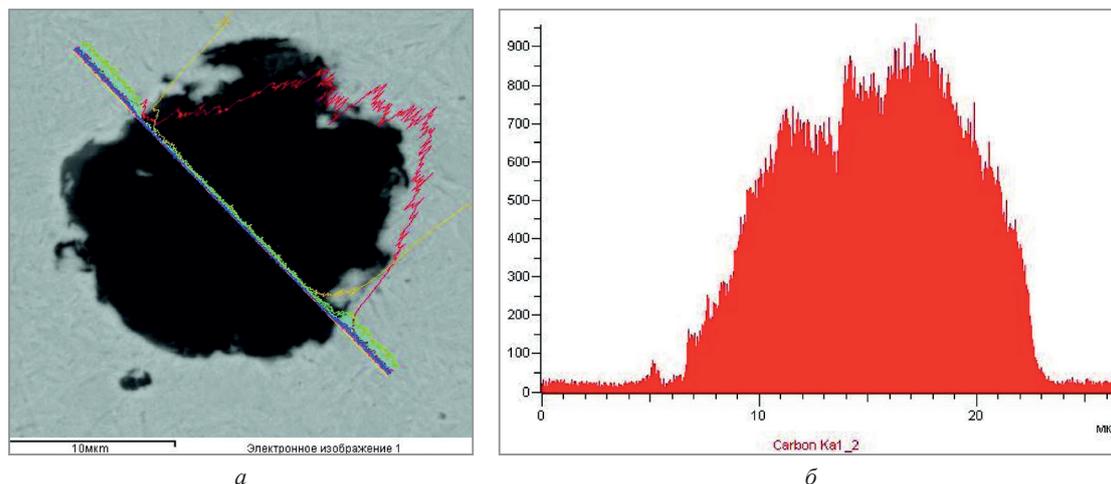


Рис. 3. Пример МРСА шаровидного включения графита, ось симметрии которого проходит выше плоскости шлифа: а – изображение частицы и результаты МРСА; б – распределение углерода по сечению

Обнаруженные отклонения содержания кислорода на периферии включения

При исследовании шлифов достаточно часто выявляется следующая закономерность, когда, помимо углерода, обнаруживаются максимумы других элементов. В частности, на границе с металлической матрицей во многих случаях обнаружено возрастание содержания кислорода (рис. 5, а–г). Это предположительно может свидетельствовать о том, что при росте включения оксиды оттесняются на периферию либо о наличии оксидной пленки снаружи включения. Необходимо отметить, что это могут быть и эффекты, вызванные травлением шлифа в кислотах, так как травление всегда идет интенсивнее на границе раздела фаз, а металлическая матрица (рис. 5, в) слегка подтравлена.

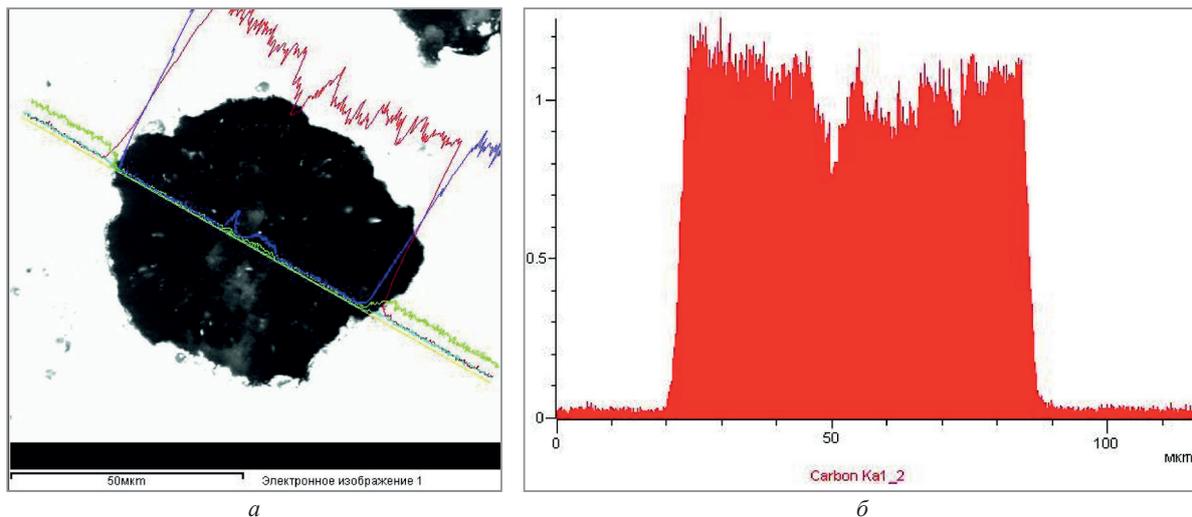


Рис. 4. Пример МРСА шаровидного включения графита, ось симметрии которого проходит ниже плоскости шлифа:
а – изображение частицы и результаты МРСА; *б* – распределение углерода по сечению

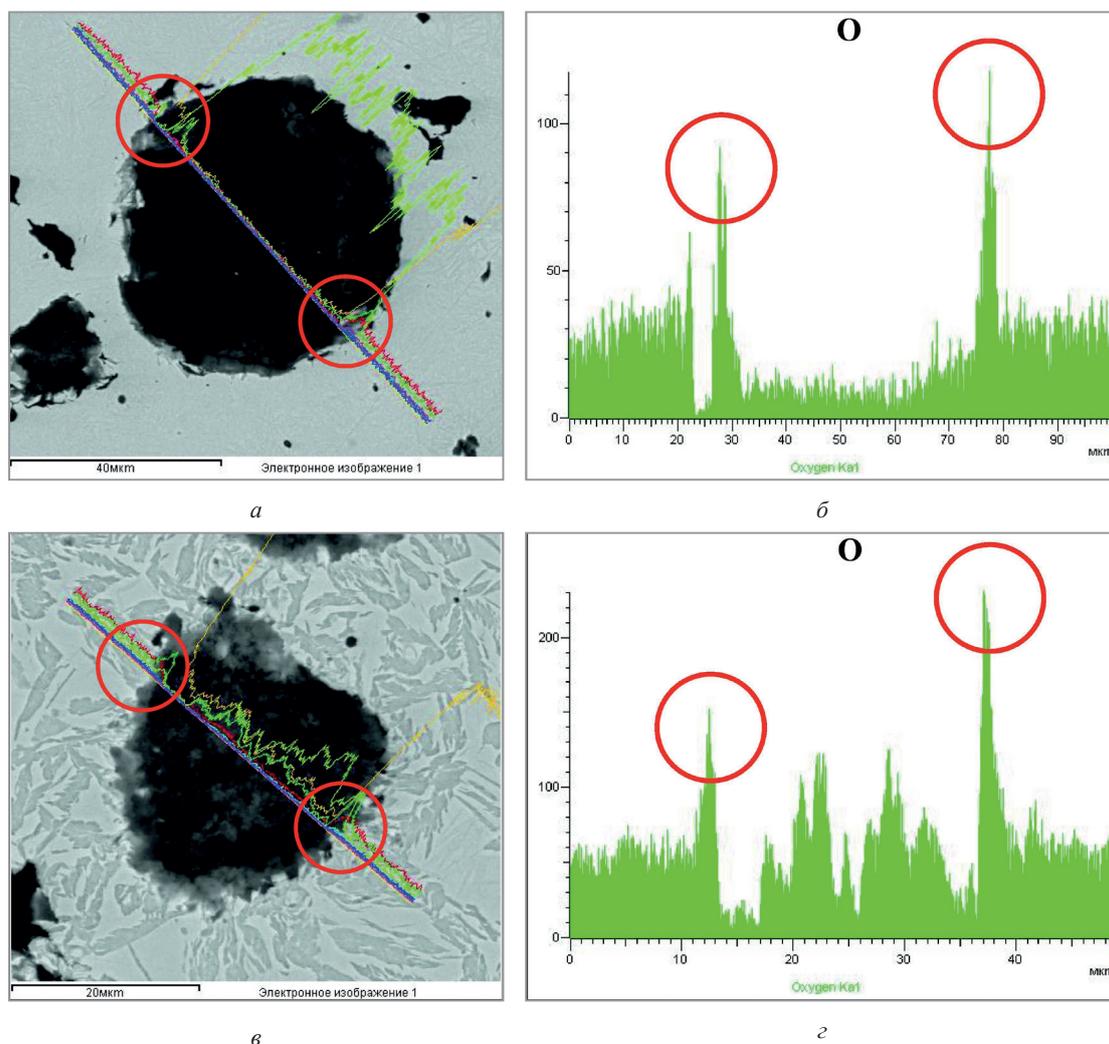


Рис. 5. Примеры результатов МРСА (*а, в*) и распределение кислорода (*б, г*) с соответствующими кислородными «пиками» по границе периферии шаровидного включения графита

МРСА исследования включений графита в литом высокопрочном чугуने

Для понимания механизма зарождения шаровидного графита, разумеется, наиболее интересен анализ центра включения и то, какие именно химические элементы, помимо графита, там обнаружены.

По мере приближения к центру включения начинают обнаруживаться ряд других аномалий. В первую очередь это повышение интенсивности линий спектра железа в центре включения. Это может быть связано с попаданием луча в зону кремнистого феррита. Подобные зоны выглядят как светлые пятна на темном фоне [16, 17] и могут встречаться как в центре, так и по всему сечению графитного включения (рис. 6, в). Вероятно, в данном случае зарождение графита произошло на включении кремнистого феррита.

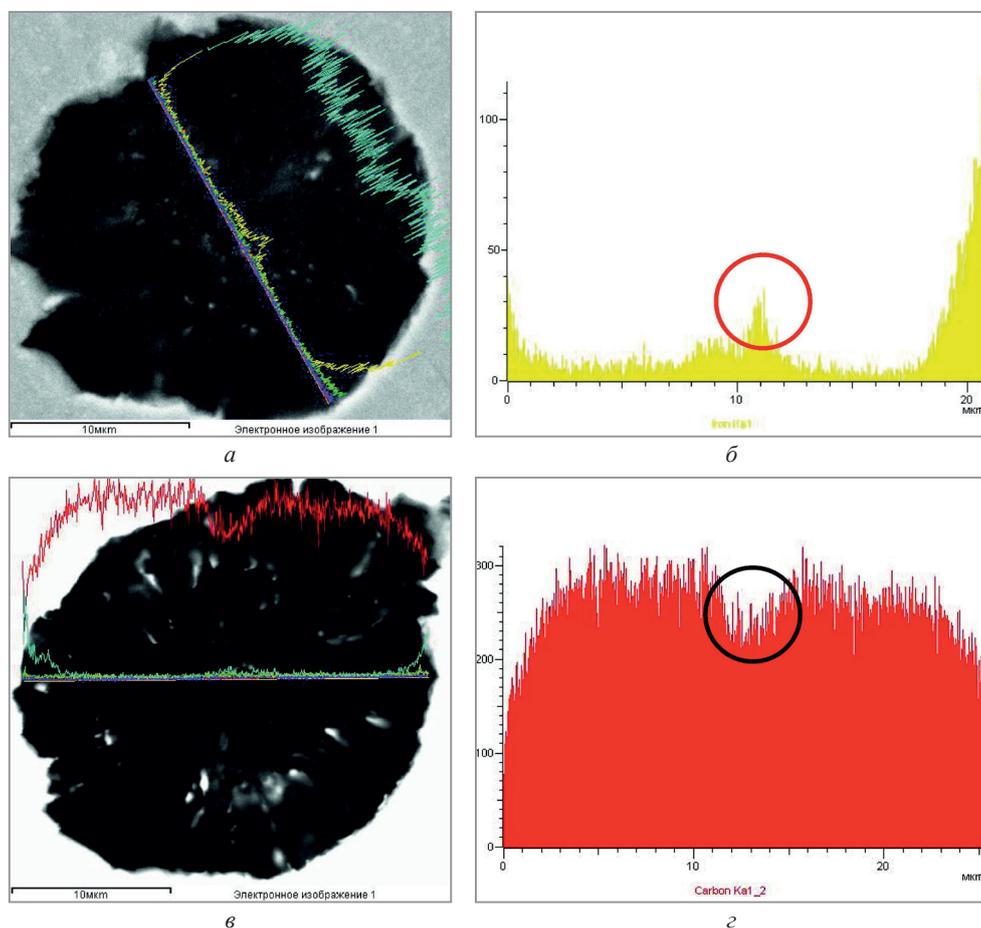


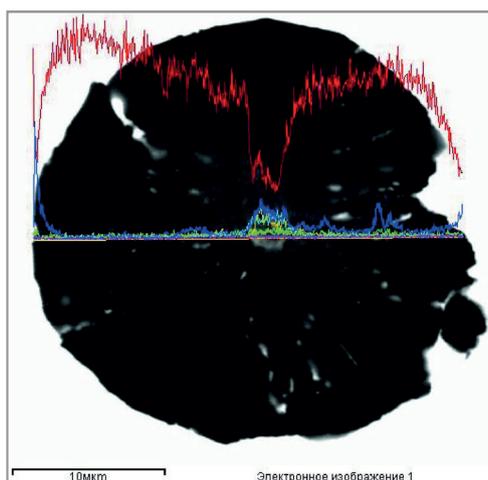
Рис. 6. Результаты МРСА (*а, в*) и распределение включения железа (*б*) и углерода (*з*)

Рассмотрим случай (см. рис. 2, в), когда плоскость шлифа совпала с центром симметрии графита. При этом удалось зафиксировать большое число аномальных отклонений концентраций различных элементов от минимальных значений (рис. 7, а – з).

Наиболее очевидные концентрационные пики в центре включения показывают химические элементы сера и кислород (рис. 7, з, д). Это напрямую подтверждает примесную теорию зарождения включений графита на оксидах и сульфидах. Магний, более-менее равномерно распределяясь по всему сечению включения графита, тем не менее тоже показывает пик концентрации, приходящийся на центр включения, хотя и менее выраженный (рис. 7, в). Очевидно, что магний участвует в зарождении графита и, вероятнее всего, образует тугоплавкий оксид магния (температура плавления $\text{MgO} - 3100 \text{ K}$), на котором впоследствии выделяется графит.

Отдельно остановимся на распределении в графите железа (см. рис. 4, ж). При относительно невысоком (практически «следы») и равномерном его содержании по большей части сечения железо показало два небольших концентрационных пика в правой части спектрограммы (обведены кружками). Сопоставление спектрограмм показывает, что аналогичные пики выявлены в этих же местах у кремния (сравним рис. 5, е с рис. 5, ж). Можно сделать предположение, что линия зонда пересекла небольшие участки кремнистого феррита (практически чистого железа, легированного кремнием), т. е. те самые небольшие фрагменты аустенита, который попал внутрь и «окантовался» графитным включением в процессе его роста из расплава.

Марганец и хром являются единственными химическими элементами, распределенными по сечению включения графита относительно равномерно (см. рис. 5, з, и).



a

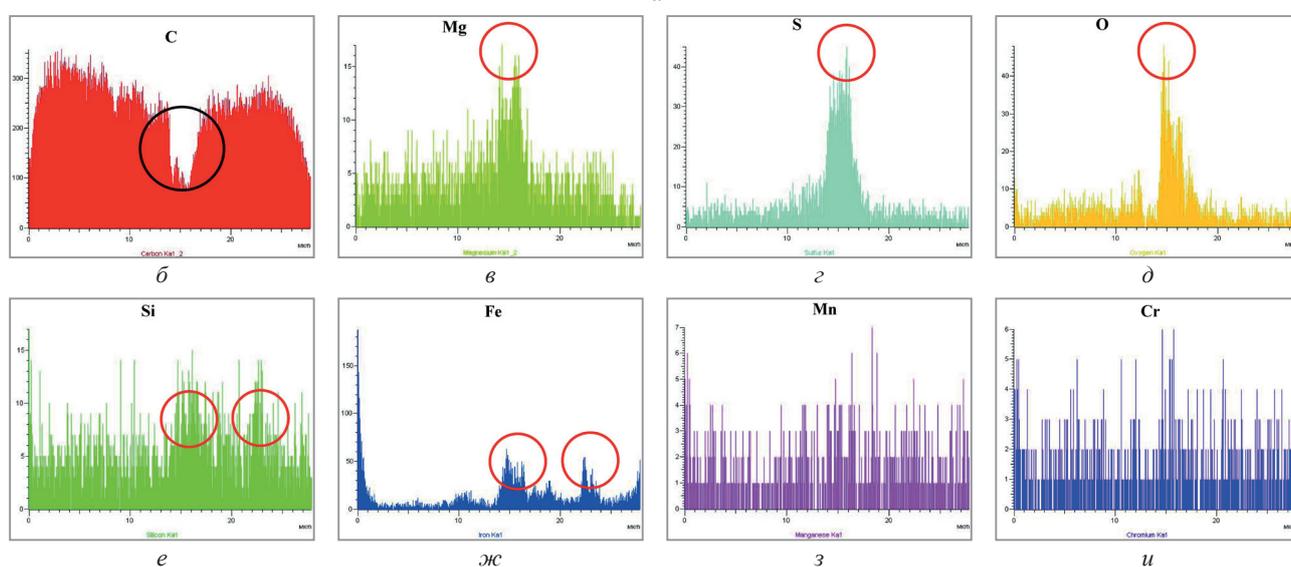


Рис. 7. Пример МРСА включения графита (а) и распределение элементов: углерода (б); магния (в); серы (г); кислорода (д); кремния (е); железа (ж); марганца (з); хрома (и)

МРСА исследования графита высокопрочного чугуна, деформированного со степенью обжатия 60 %

Поперечное сечение графитного включения со степенью обжатия 60 %

В деформированном поперечном сечении аномалии концентраций не выражены. Сера, кислород, кремний, железо не показывают никаких отклонений от минимума.

Как видно из рис. 8, а, в центре включения в поперечном сечении наблюдается небольшое падение концентрации по углероду (рис. 8, б) и одновременно в центре обнаружен некоторый рост концентрации кислорода (рис. 8, в). Очевидно, это оставшаяся часть оксида, характерная для центра включения литого чугуна. Наиболее яркое ее проявление можно наблюдать на рис. 7, г. Вкраплений кремнистого феррита не отмечено (рис. 8, г, д), о чем свидетельствуют минимально низкие содержания железа и кремния. Других аномалий не обнаружено, кислородные максимумы по краям включения отсутствуют. В целом можно сказать, что произошло значительное выравнивание концентраций большинства элементов по сечению.

Продольное сечение графитного включения со степенью обжатия 60 %

Некоторые результаты МРСА продольного сечения графитного включения приведены на рис. 9, а–д. Как видно из рисунка, в отличие от литого состояния какие-либо максимумы полностью отсутствуют. Вероятно, произошло смещение графитных пластин и равномерное перераспределение примесей по сечению.

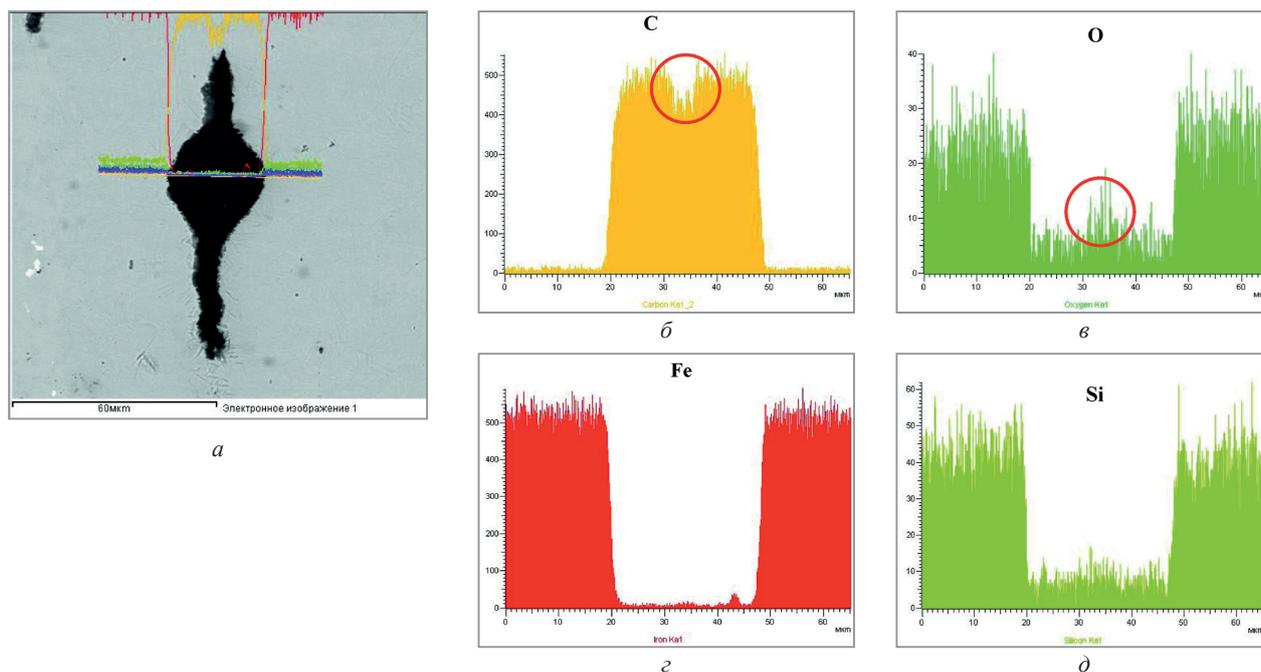


Рис. 8. Результаты МРСА деформированного включения (а) и распределение элементов: углерода (б), кислорода (в), железа (г), кремния (д). Деформированный ВЧ со степенью обжатия 60%. Поперечное сечение

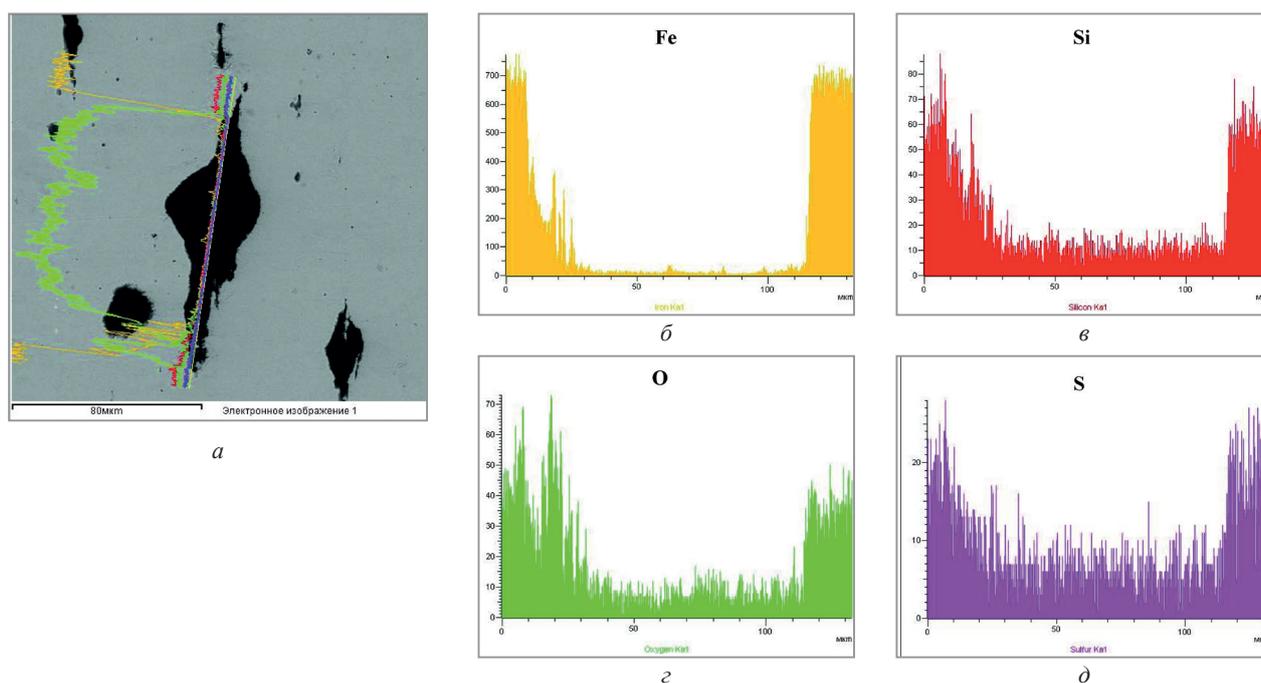


Рис. 9. Результаты МРСА продольного сечения графитного включения (а) и распределение элементов: железа (б); кремния (в); кислорода (г); серы (д). Деформированный ВЧ со степенью обжатия 60%. Продольное сечение

МРСА исследования графита высокопрочного чугуна, деформированного со степенью обжатия 80%

МРСА исследования графита в продольном направлении (параллельно вытяжке)

При степени обжатия 80% графитное включение приобретает вид вытянутого волокна (рис. 10, а). В этом случае никаких аномалий в распределении химических элементов не наблюдается (рис. 10, а–ж). Железо, кремний, марганец, сера, кислород показывают минимальные значения. Включение полностью состоит из углерода. Это свидетельствует о том, что произошли существенные смещения графитных слоев вдоль оси деформации и примеси равномерно перераспределились по всей длине включения.

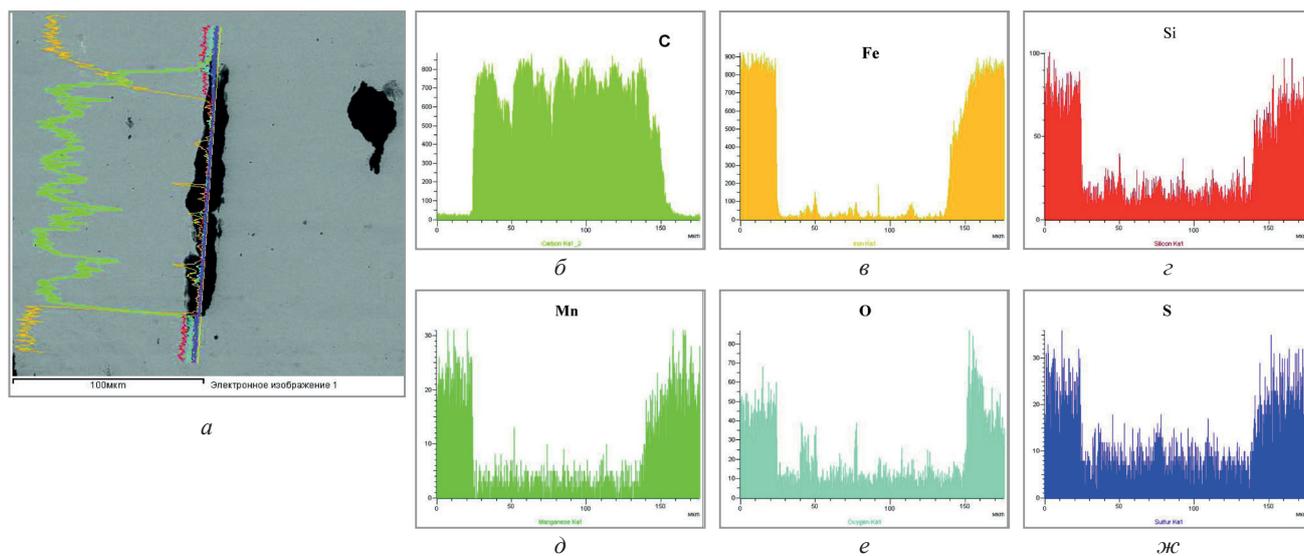


Рис. 10. Результаты МРСА (а) и распределение углерода (б); железа (в); кремния (z); марганца (д); кислорода (е); серы (ж). Деформированный ВЧ со степенью обжатия 80%. Продольное сечение

МРСА исследования графита перпендикулярно вытяжке

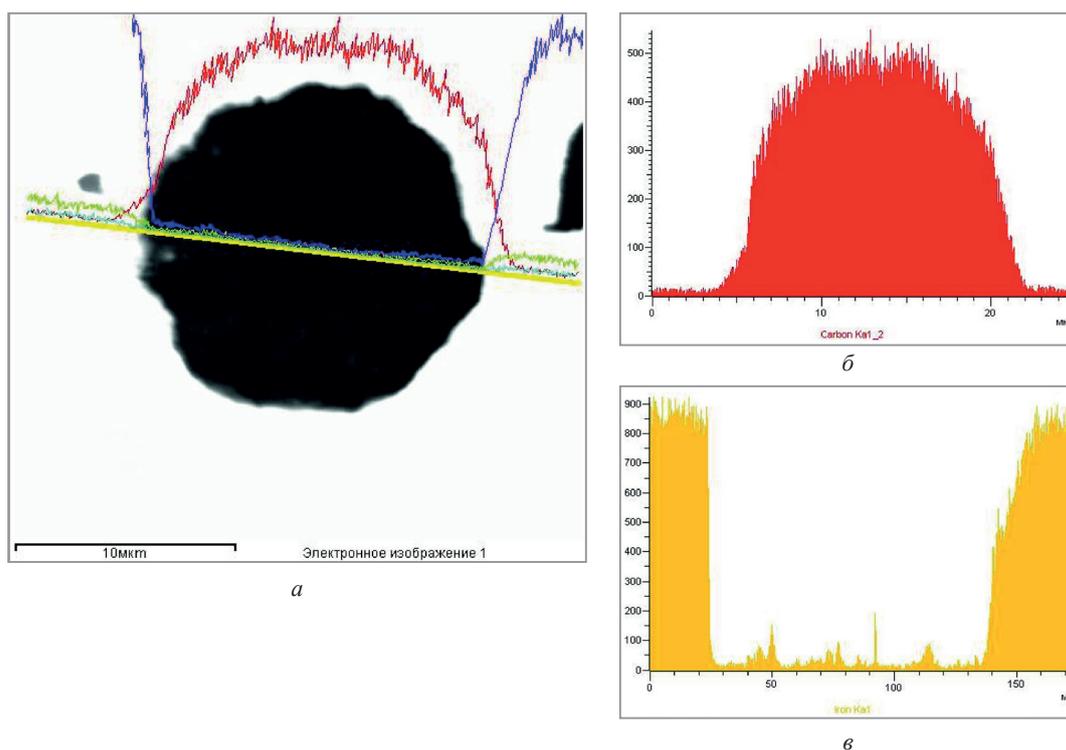


Рис. 11. Результаты МРСА (а) и распределение углерода (б); железа (в). Деформированный ВЧ со степенью обжатия 80%. Поперечное сечение волокна (линия течения металла проходит перпендикулярно рисунку)

Анализируя рис. 11, можно отметить, что в продольном сечении произошло полное выравнивание химического состава по сечению включения. Характерные максимумы серы и кислорода, отображающиеся в литом состоянии, полностью нивелировались.

Выводы

Показано, что микрорентгеноспектральный анализ графита в высокопрочном чугуна имеет определенную специфику. Она связана с правильным выбором исследуемого сечения образца. В случае, если ставится задача исследовать центр включения – наиболее достоверны и информативны результаты, когда сечение графита рассекается плоскостью шлифа ровно посередине.

В литом состоянии в центре включения обнаружены аномалии распределения концентраций ряда элементов. Магний, кремний, сера, кислород, иногда железо показывают повышенное содержание, а углерод – пониженное. Это связано с первоначальным образованием в расплаве чугуна микрочастиц оксидов, сульфидов и окисульфидов (либо включений кремнистого феррита), на которых в дальнейшем происходит рост графитных включений. Таким образом, данное исследование подтверждает примесную теорию зарождения включения графита на оксидах и сульфидах.

Проведен сравнительный МРСА распределения химических элементов по сечению графитного включения в литом и деформированном (методом горячего выдавливания) высокопрочном чугуне. В деформированном чугуне эти аномалии в значительной мере устраняются и распределение элементов становится более однородным, причем чем выше степень обжатия, тем выше однородность химического состава. В некоторой мере неоднородность распределения состава еще встречается в продольном сечении при деформации 60%. При степени обжатия 80% в поперечном сечении включение становится практически полностью однородным по химическому составу.

Полученные экспериментальные данные уточняют существующие теории зародышеобразования включений графита при литье, а в деформированном состоянии характеризуют сильную степень смещения составляющих графит сегментов.

*Работа выполнена в ФТИ НАН Беларуси (г. Минск)
в рамках ГПНИ «Электромагнитные технологии», задание № 3.3.3.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Total Casting Tons Dip in 2019 // *Modern Casting*. – January 2021. – P. 28–30.
2. **Леушин, И. О.** Современные тренды производства чугуна / И. О. Леушин, А. Г. Панов // *Черные металлы*. – 2021. – № 7.
3. **Millis K. D. [et al.]** Cast ferrous alloy. Patent US 2485760, заявл. 21.11.1947, опубл. 25.10.1949.
4. Возможности высокопрочного чугуна с шаровидным графитом неисчерпаемы. Ч. 1 / Н. Н. Александров [и др.] // *Литейное производство*. – 2013. – № 11. – С. 7–11.
5. **Роговский, А. Н.** О современных теориях и гипотезах формирования шаровидного графита в литой структуре чугуна / А. Н. Роговский, А. А. Шипельников // *Литейное производство*. – 2014. – № 4. – С. 5–7.
6. **Баранов, А. А.** К теории образования в чугуне шаровидного графита / А. А. Баранов, Д. А. Баранов // *Металл и литье Украины*. – 2003. – № 9–10. – С. 42–45.
7. **Найдек, В. Л.** Шаровидный графит в чугунах / В. Л. Найдек, И. Г. Неижко, В. П. Гаврилюк // *Процессы литья*. – 2012. – № 5. – С. 33–42.
8. **Найдек, В. Л.** Некоторые размышления о механизме образования шаровидного графита в чугуне / В. Л. Найдек, А. М. Верховлюк // *Процессы литья*. – 2014. – № 1. – С. 49–54.
9. **Stefanescu, D. M.** Solidification and modeling of cast iron – A short history of the defining moments / Stefanescu D. M. // *Materials Science and Engineering A*. – 2005. – Vol. 413–414. – P. 322–333.
10. Kinetics of nucleation and growth of graphite at different stages of solidification for spheroidal graphite iron / G. Alonso [et al.] // *International Journal of Metalcasting*. – 2017. – Vol. 11. – P. 14–26.
11. Revisiting the graphite nodule in ductile iron / E. Ghassemali [et al.] // *Scripta Materialia*. – 2019. – Vol. 161. – P. 66–69.
12. **Stefanescu, D. M.** The meritocratic ascendance of cast iron: from magic to virtual cast iron / D. M. Stefanescu // *International Journal of Metalcasting*. – 2019. – Vol. 13, iss. 4. – P. 726–752.
13. Graphite nucleation in compacted graphite cast iron / G. Alonso [et al.] // *International Journal of Metalcasting*. – 2020. – Vol. 14. – P. 1162–1171.
14. **Покровский, А. И.** Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы / А. И. Покровский. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 256 с.
15. **Chaus, A. S.** Effect of hot plastic deformation on microstructural changes in cast iron with globular graphite / A. S. Chaus, J. Sojka, A. I. Pokrovskii // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2013. – Vol. 114. № 1. – P. 85–94.
16. Microstructure and properties evaluation of ductile cast iron subjected to hot plastic deformation and ambient temperature compression / A. S. Chaus [et al.] // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2023. – Vol. 68. № 2. – P. 639–648.
17. **Покровский, А. И.** Особенности структурообразования графитных включений в высокопрочном чугуне при литье и горячей пластической деформации / А. И. Покровский // *Черные металлы*. – 2023. – № 4. – С. 8–15.
18. **Покровский, А. И.** Механизм пластической деформации графитных включений в высокопрочном чугуне при обработке давлением / А. И. Покровский // *Черные металлы*. – 2023. – № 6. – С. 52–60.

REFERENCES

1. Total Casting Tons Dip in 2019. *Modern Casting*, January 2021, pp. 28–30.
2. **Leushin I. O., Panov A. G.** Sovremennyye trendy proizvodstva chugunnogo lit'ya [Current trends in cast iron production]. *Chernyye metally = Ferrous metals*, 2021, no. 7.
3. **Millis K. D. [et al.]** Cast ferrous alloy. Patent US 2485760, application 21.11.1947, publ. 25.10.1949.

4. **Aleksandrov N.N., Bekh N.I., Radchenko M.V., Zubkov A.A., Poddubnyj A.N., Kazancev A.G.** Vozmozhnosti vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom neischerpaemy. Ch. 1 [The possibilities of high-strength nodular cast iron are endless. Part 1]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2013, no. 11, pp. 7–11.
5. **Rogotovskij A.N., Shipel'nikov A.A.** O sovremennyh teoriyah i gipotezakh formirovaniya sharovidnogo grafita v litoj strukture chugunov [On modern theories and hypotheses of the formation of spherical graphite in the cast structure of cast iron]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2014, no. 4, pp. 5–7.
6. **Baranov A.A., Baranov D.A.** K teorii obrazovaniya v chugune sharovidnogo grafita [On the theory of formation of spheroidal graphite in cast iron]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2003, no. 9–10, pp. 42–45.
7. **Najdek V.L., Neizhko I.G., Gavrilyuk V.P.** Sharovidnyj grafit v chugunah [Nodular graphite in cast iron]. *Processy lit'ya = Casting processes*, 2012, no. 5, pp. 33–42.
8. **Najdek V.L., Verhovlyuk A.M.** Nekotorye razmyshleniya o mekhanizme obrazovaniya sharovidnogo grafita v chugune [Some thoughts on the mechanism of formation of spherical graphite in cast iron]. *Processy lit'ya = Casting processes*, 2014, no. 1, pp. 49–54.
9. **Stefanescu D.M.** Solidification and modeling of cast iron – A short history of the defining moments. *Materials Science and Engineering A*, 2005, vol. 413–414, pp. 322–333.
10. **Alonso G., Larrañaga P., Stefanescu D.M., E. Fuente la De, Natxiondo A., Suarez R.** Kinetics of nucleation and growth of graphite at different stages of solidification for spheroidal graphite iron. *International Journal of Metalcasting*, 2017, vol. 11, pp. 14–26.
11. **Ghassemali E., Hernando J.C., Stefanescu D.M. [et al.]** Revisiting the graphite nodule in ductile iron. *Scripta Materialia*, 2019, vol. 161, pp. 66–69.
12. **Stefanescu D.M.** The meritocratic ascendance of cast iron: from magic to virtual cast iron. *International Journal of Metalcasting*, 2019, vol. 13, pp. 726–752.
13. **Alonso G., Stefanescu D.M., Larranaga P., Suarez R.** Graphite nucleation in compacted graphite cast iron. *International Journal of Metalcasting*, 2020, vol. 14, pp. 1162–1171.
14. **Pokrovskiy A.I.** *Goryachaya plasticheskaya deformatsiya chuguna: struktura, svoystva, tekhnologicheskie osnovy* [Hot plastic deformation of cast iron: structure, properties, technological foundations]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010, 256 p.
15. **Chaus A.S., Sojka J., Pokrovskij A.I.** Effect of hot plastic deformation on microstructural changes in cast iron with globular graphite. *The Physics of Metals and Metallography*, 2013, vol. 114, no. 1, pp. 85–94.
16. **Chaus A.S., Čaplovič L., Pokrovskij A.I., Sobota R.** Microstructure and properties evaluation of ductile cast iron subjected to hot plastic deformation and ambient temperature compression. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 639–648.
17. **Pokrovskij A.I.** Osobennosti strukturoobrazovaniya grafitnyh vkluyuchenij v vysokoprochnom chugune pri lit'e i goryachej plasticheskoj deformatsii [Features of structure formation of graphite inclusions in high-strength cast iron during casting and hot plastic deformation]. *Chernye metally = Ferrous metals*, 2023, no. 4, pp. 8–15.
18. **Pokrovskij A.I.** Mekhanizm plasticheskoj deformatsii grafitnyh vkluyuchenij v vysokoprochnom chugune pri obrabotke davleniem [The mechanism of plastic deformation of graphite inclusions in high-strength cast iron during pressure treatment]. *Chernye metally = Ferrous metals*, 2023, no. 6, pp. 52–60.