

ТЕХНОГЕННЫЙ ГРАФИТ

© *В.М. Шмалько¹, О.И. Зеленский²*Государственное предприятие «Украинский государственный научно-исследовательский углехимический институт (УХИН)» б1023, г. Харьков, ул. Веснина, 7, Украина*¹ Шмалько Владимир Михайлович, канд. техн. наук, с.н.с., зам. дир. по научн. работе в обл. УСКИ, e-mail: v.shmalko@gmail.com² Зеленский Олег Иванович, канд. техн. наук, зам. зав. коксовым отделом, e-mail: zelensky_ukhin@mail.ru

В статье рассмотрены виды техногенного графита. Приведены описания источников его образования. Описаны свойства графита и сферы его применения.

Ключевые слова: углерод, графит, свойства, состав, морфология.

Чугун, выпускаемый из доменной печи при температуре около 1450 °С, представляет собой насыщенный раствор углерода в расплаве железа. При охлаждении расплава после выпуска растворимость углерода снижается, и в объеме металла формируется кристаллический графит, а часть растворенного углерода выделяется в виде чешуек доменного графита. Последние вследствие меньшей плотности всплывают на поверхность расплава, захватывая с собой частицы чугуна и шлака, образуя графитовую пыль (спель или «киш-графит»). Таким образом, выделяется 1,3-3,9 кг графита на тонну чугунка [1]. В процессе охлаждения жидкого чугуна графитовая спель смешивается с образующимися на поверхности чугуна корками шлака, с которыми соприкасается жидкий чугун: в канавах, в желобах, в чугуновозных ковшах и т.д. Графитовая спель, наряду с чугунным скрапом^{**} и шлаком, входит в состав графитсодержащих отходов (ГСО).

Основная масса графитовой спели выделяется в миксерных отделениях [2]. По данным авторов [3], основанных на исследованиях института «Гипросталь», годовой выход графитовой пыли от одного 600-тонного миксера колеблется в пределах от 1300 до 2000 т. При заливке чугуна в миксер и его сливе концентрация пыли в отходящих газах соответственно составляет 6,5 и 5,15 г/м³, а в процессе скачивания шлака – 8,4 г/м³. Удельный выход пыли от одного 600-тонного миксера при заливке чугуна составляет около 91 г/т; при скачивании шлака – 297 г/т; при сливе чугуна 92 г/т; соответствующие данные для 1300-т миксера: 145; 212 и 159 г/т.

ГСО в настоящее время являются ценным сырьем для производства графита (цена в Украине 3-11 тыс. грн. за тонну [4]), имеющего широкое применение во многих отраслях промышленности: в реактивной технике, в атомной энергетике, телевизионной, электротехнической, химической, оgneупорной, электронной, металлургической, машиностроительной, автомобильной и других областях промышленного производства. Мариупольский графитовый завод уже несколько лет специализируется на производстве коллоидных препаратов из ГСО металлургического производства, а также аккумуляторного графита, графитовых смазок [5].

Графитовая пыль содержит от 15 до 55 % углерода, а также 30-60 % железа в виде металла и оксидов (см. табл. 1) [6].

Таблица 1

Минеральный состав графитовой пыли

Минералы	Содержание в графитовой пыли, %
Графит	80,4
Железо	9,6
Магнетит	7,3
Кварц	2,7

* Автор для переписки

** Скрап – зашлакованные отходы черных металлов, образовавшиеся во время выпуска из плавильных агрегатов, транспортировки и разливки чугуна и стали [ДСТУ 3674-97 Метали чорні вторинні. Терміни та визначення].



Большинство примесей киш-графита представляют собой частицы оксида железа, которые плотно прилипают к графитовым чешуйкам. Эти частицы не могут быть устранины ни путем просеивания, ни магнитной сепарацией.

Тем не менее, для их удаления достаточно промывки киш-графита водой (рис. 1) [7]. Извлечение графита из шлаков более сложно, т.к. требуется операции измельчения и флотации.

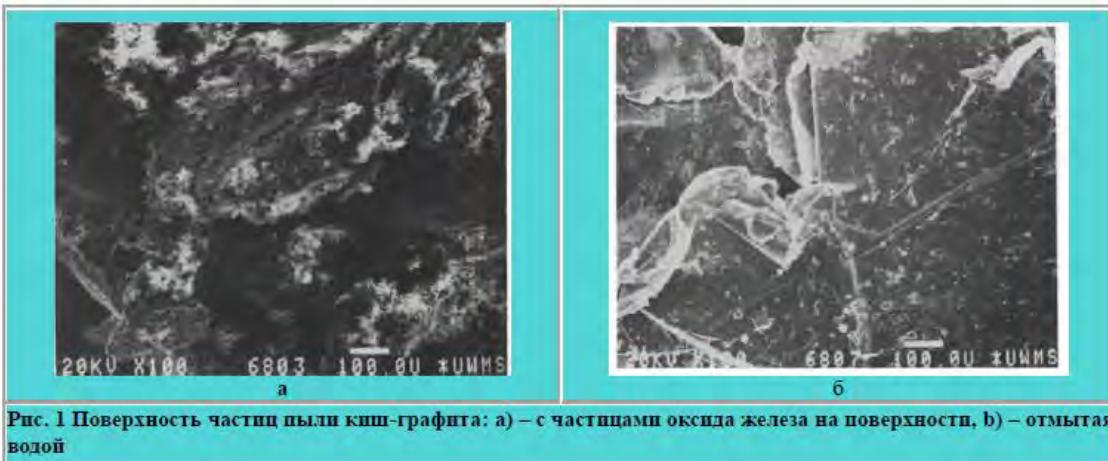


Рис. 1 Поверхность частиц пыли киш-графита: а) – с частицами оксида железа на поверхности, б) – отмытая водой

Киш-графит может расслаиваться, давая вспученный материал. Степень его расслаивания изменяется и зависит от размеров частиц и условий формирования. Медленное охлаждение киш-графита приводит к развитию больших объемов вспученного графита. Крупные чешуйки графита в условиях медленного охлаждения приводят к более высокой степени

вспучивания из-за давления газов во время термического воздействия. В случае мелких чешуек киш-графита со слоеной дендритной структурой выделяющиеся газы отходят легко, не вызывая внутреннего давления, провоцирующего расслоение и вспучивание частиц киш-графита (рис. 2) [8].

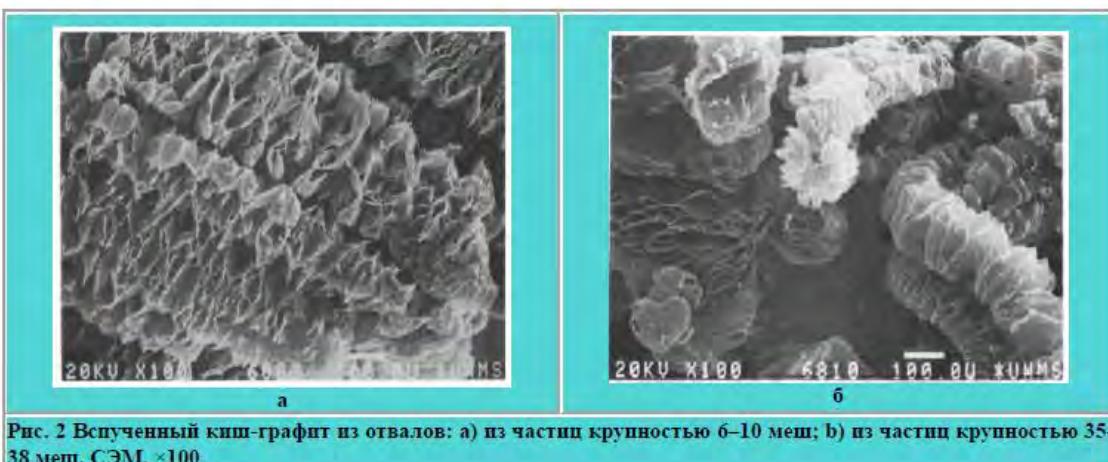


Рис. 2 Вспученный киш-графит из отвалов: а) из частиц крупностью 6–10 меш; б) из частиц крупностью 35–38 меш. СЭМ. ×100

Из-за нехватки природных ресурсов кристаллического графита высокого качества, а также из-за экологических соображений использование кишграфита расширяется.

Киш-графит используют сотни исследовательских групп, чтобы получить графен механическим «расщеплением» (известным, как "Скотч-метод Новоселова и Гейма") Стоимость ультрачистого кишграфита (>99 %) достаточно высока – около 350 долларов за образец массой 0,5 г [8].

В чугунных отливках графит может иметь самые разнообразные формы включений: пластинчатые, шаровидные, слоистые, вермикулярные и др. Формы графита, содержащегося в чугуне, определяют сорт конструкционного чугуна [9].

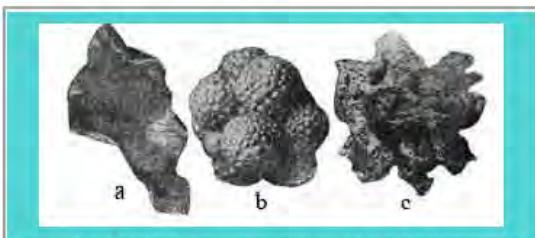


Рис. 3 Графит в чугунах: а) пластинчатый, б) шаровидный, в) вермикулярный

На рис. 3 показаны: пластинчатый графит в сером чугуне, шаровидный графит в высокопрочном чугуне, вермикулярный графит (промежуточные формы между компактными пластинчатыми формами) [10] и хлопьевидный графит в ковке чугуна [11].

Пластинчатый графит (lamellar graphite) в сером чугуне имеет форму изогнутых пластинок, которые нарушают целостность металлической основы чугуна и играют роль дефектов – мелких трещин. Чугун с плас-

тинчатым графитом имеет низкую прочность при испытании на растяжение и пластичность. Чем меньше графитовых включений в чугуне и чем они мельче, тем выше его механические свойства. Наиболее высокие механические свойства имеют серые модифицированные чугуны с мелкими пластинками графита [12].

Шаровидный (сфероидальный, глобулярный графит или узелковый) [spheroidal (globular, nodular) graphite] графит – включения графита, которые придают серому чугуну высокие значения пределов прочности при растяжении, сжатии и изгибе. Вероятно, шаровидная форма включений графита способствует уменьшению концентрации напряжений вокруг них.

Существуют десятки гипотез образования шаровидного графита, но до настоящего времени механизм его формирования в чугунах не ясен. Возможно, это связано с большим количеством факторов, влияющих на данный процесс: природа шихтовых материалов, наличие в них примесей, условия плавки, модификации и т.п. Некоторые исследователи связывают образование шаровидного графита с наличием в чугуне сферических фуллеренов [13, 14].

Существует множество работ, посвященных структуре графитовых включений в чугунах. Особое внимание уделяется шаровидным включениям графита. Американский стандарт ASTM A247 Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings (Стандартный метод испытаний для оценки микроструктуры графита в чугунных отливках) предоставляет изображения, используемые для классификации форм, распределения и размера графита в чугунном литье. Этот метод испытаний предназначен для оценки типов графита в чугунах от самого прочного серого чугуна с полностью шаровидным графитом (тип ASTM I) до самого непрочного (тип ASTM VII) путем визуального сравнения микрофотографий [15].

Таблица 2

Параметры графита в чугуне по результатам определений с помощью системы анализа изображений

Основной параметр	Идентификационный код чугуна			
	A1*	A2**	A3***	A4****
Площадь графита (%)	15.95	14.75	15.01	15.64
Число частиц, N	183	161	147	135
Размер частиц, ($\times 10^{-3}$ мм 2)	1,215	1,384	1,508	1,577
Шаровидность графита, %	97.25	88.06	66.14	60.15
Форм-фактор,	0.820	0.704	0.650	0.574
Степень сферичности,	0.785	0.652	0.601	0.547

A1* – полностью сферический графит (ASTM тип I);

A2** – сфероидальный (ASTM типы I и II);

A3*** – достаточно сферический графит (ASTM типы II и III);

A4**** – компактный/вермикулярный графит (ASTM типы III и IV).

Общепринятая практика проведения исследований графитовых включений в чугунах – исследование с помощью оптической микроскопии (микрошлифы); сканирующая микроскопия сколов и полированных срезов (чугунных отливок) с последующим компьютерным анализом изображений. В работе [16] авторами с

помощью компьютерного анализатора изображений проекционного микроскопа Zeiss Jenaphot 2000 и сканирующего электронного микроскопа (рис. 8) получены следующие характеристики частиц углерода в чугуне (табл. 2).

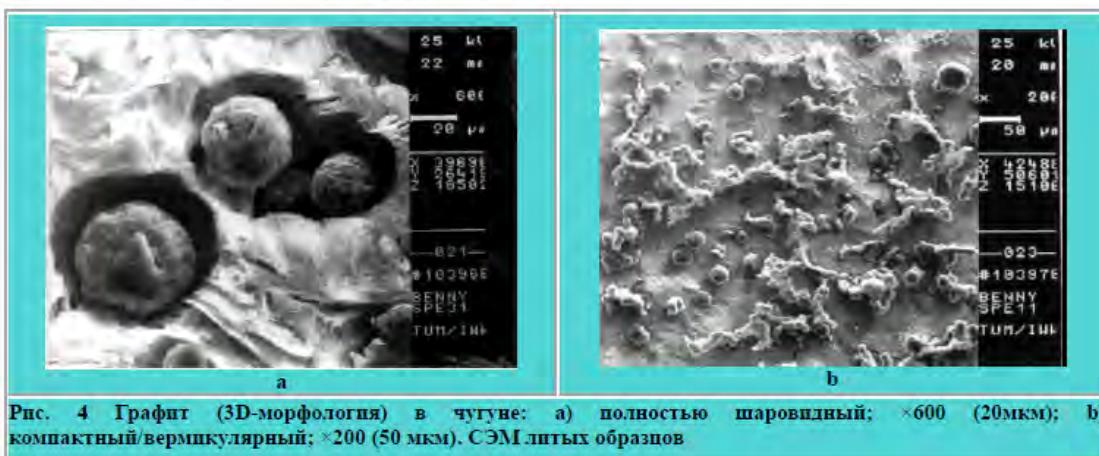


Рис. 4 Графит (3D-морфология) в чугуне: а) полностью шаровидный; $\times 600$ (20 мкм); б) компактный/вермикулярный; $\times 200$ (50 мкм). СЭМ литьих образцов

Эти параметры сопоставляли с механическими характеристиками чугуна. Полученные авторами результаты ясно показали, что прочностные свойства чугунов во многом зависят от формы и/или морфологии графита, включенного в чугунные отливки.

Существует стандарт ГОСТ 3443-87, в котором в зависимости от распределения включений оценивается структура чугуна. Количество включений графита определяется средним процентом площади графита на микрошлифе [17].

Авторы работ [18, 19] разработали новый подход к решению проблемы идентификации графитовых включений в чугуне. Они считают, что их рост подчиняется законам фрактальной геометрии.

Фрактальная геометрия позволяет описать сложные по строению геометрические объекты через один параметр, которым является фрактальная размерность (D). Для идеальной сферы в трехмерном пространстве $D = 3$, для круга в плоскости $D = 2$, для окружности и прямой линии $D = 1$. Для простейших геометрических фигур фрактальная размерность совпадает по значению с евклидовой и топологической размерностями. Для сложных по форме внешней поверхности объектов характерны дробные размерности, которые для включений, изучаемых в плоскости шлифа, будут находиться в интервале 1-2. Для описания сложных объектов, к которым, в частности, относятся графитовые включения

предложено использовать мультифрактальные методы описания их геометрических параметров [18].

Фрактальная размерность исследованных в работе [18] включений определена в пределах от 1,42 (серый чугун) до 1,72 (высокопрочный чугун). Чем ближе значения фрактальной размерности к значению для идеальной сферы в трехмерном пространстве $D = 3$, тем больше шаровидного графита и тем ближе его форма к сферической.

Шаровидный графит в промышленных отливках не имеет идеальной сферической формы. Поверхность шаровидного графита состоит из множества тонколепестковых выступов. Эти лепестки правильной полигональной и неправильной округленной формы в совокупности образуют структуру чередующихся волнообразных гряд. Исследование ионотравленных срезов шаровидного графита позволяет выявить следующие типы слоистой структуры: дендритную, дендритно-концентрическую, зигзагообразную и концентрическую. Получение того или иного типа слоистой структуры обычно связывают с условиями охлаждения и химическим составом модификатора [20].

Авторами работы [21] установлено, что шарообразный графит является слоистой системой микро- и нанообразований, неоднородной по фазовому составу, структуре и элементному составу (рис. 5). Они предположили, что по аналогии с луковичным

углеродом шаровидный графит в чугунах имеет графеновые листы, расположенные по окружности.

Большая часть существующих теорий, касающихся образования и роста частиц шаровидного графита, предполагают направление роста, начиная с центра.

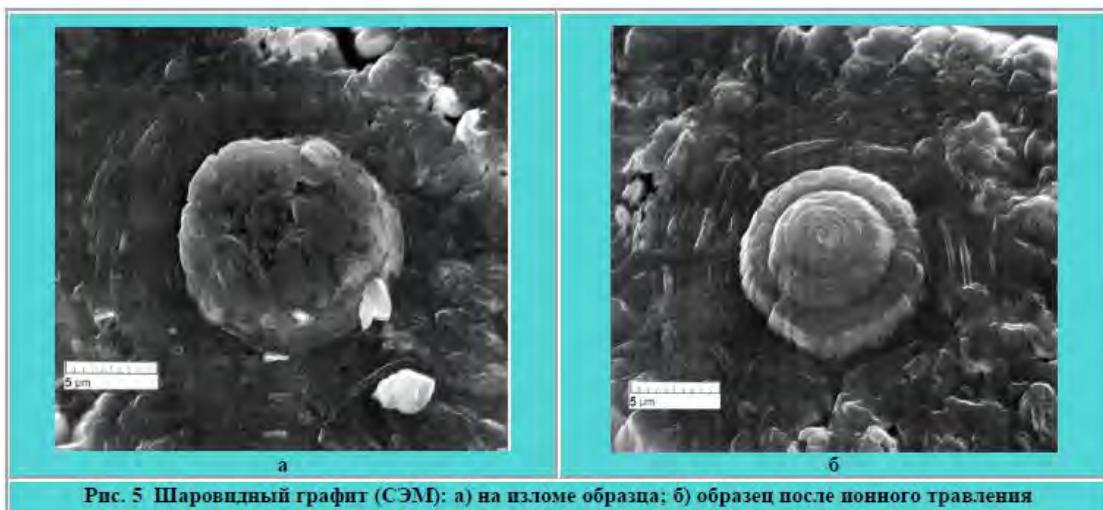


Рис. 5 Шаровидный графит (СЭМ): а) на изломе образца; б) образец после ионного травления

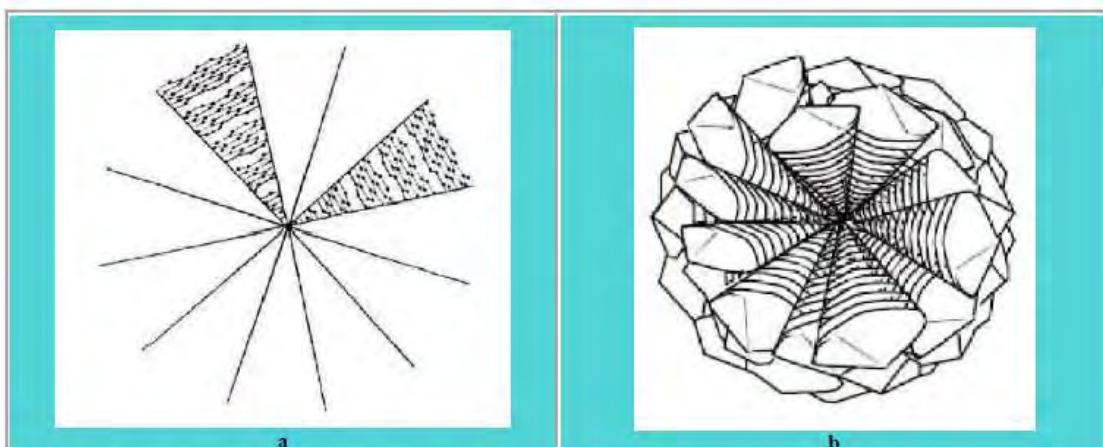


Рис. 6 Модели строения включений шарообразного графита в чугунах: а – секторально-пирамидальная; б – по винтовой дислокации

Одна из наиболее распространенных моделей строения включений шарообразного графита в чугунах – секторально-пирамидальная (рис. 6 а) [22]. По этой схеме элементарные кристаллы графита вытянуты в радиальном направлении в виде пирамид или конусов роста, основу которых составляют гексагональные базовые плоскости кристаллической решетки,

совпадающие с поверхностью вкрапления, а вершины сходятся в центре, представляя, таким образом, совокупность кристаллов, лучевидно направленных из одной центра.

Позже был предложен геликоидальный механизм роста гексагональных пирамид или конусов по винтовой дислокации (рис. 6 б) [23]. Согласно этой

модели сферический графит может быть образован из конических графитовых спиралей, которые одновременно генерируются на ядре в расплаве с последующим ростом и заполнением пространства в трех измерениях.

Существует еще несколько моделей образования шаровидного графита в чугунных отливках [24]. Эти же авторы считают, что наиболее вероятна турбостратная структура шаровидного графита, а не гексагональная или ромбоэдрическая (какую имеет кристаллический графит). Основанием для такого вывода послужили экспериментальные данные, полученные при помощи широкогоугольной рентгеновской дифракции (The Wide Angle X-ray Diffraction – WAXD).

В природе шаровидный графит встречается очень редко [25]. Сфера графита естественного происхожде-

ния метаморфических и магматических пород имеют размеры от субмиллиметрового до более 2 см в диаметре. В отличие от сфер шаровидного графита из чугуна, природным сферическим графитом уделяется относительно мало внимания, хотя их текстуры имеют значительное сходство.

На рис. 7 и 8 представлены натуральный шаровидный графит, встречающийся в кварците в провинции Квебек (Канада), и схематическое изображение графитовой сферы, предложенное авторами [25], изучавшими графитовые сферы натурального происхождения в районе украинского Приазовья.

Как видно из схемы на рис. 8, она не значительно отличается от схем, предложенных для шаровидного графита из чугунных отливок и можно полагать, что механизм их образования сходный.



Рис. 7 Шаровидный графит диаметром 3,3 мм из провинции Квебек, Канада (фото donald doell) [26]

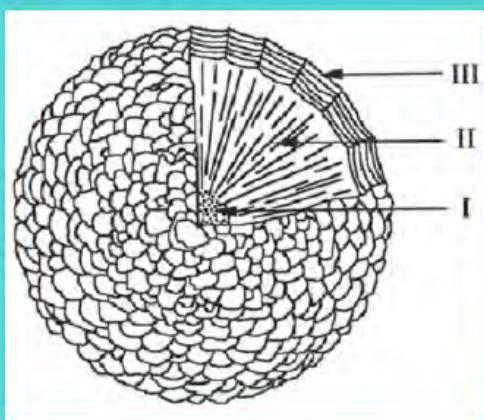


Рис. 8 Схематическое изображение внутренней структуры графитовых сфер из приазовья (Украина). Ядро сферы (I) является агрегатом случайно ориентированных кристаллов. Графитовые слои располагаются по периферии в областях (II) и (III) [27]

Существует еще один тип шаровидного графита, который получают путем измельчения чешуйчатого графита.

Традиционно шаровидный графит для литиевых батарей изготавливали из искусственного графита из-за его высокого качества и чистоты. Но поскольку процесс изготовления синтетического графита является очень энергоемким и дорогостоящим, производители аккумуляторов ищут альтернативу дорогостоящему синтетическому графиту и предпочитают использовать природный чешуйчатый графит высокой чистоты. На сегодняшний день 65 % анодного материала для всех батарей производится из природного графита, 30 % – из

синтетического графитового материала, а оставшиеся 5 % – из других альтернативных материалов, таких как титанаты лития ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), кремния и олова, используемые в очень небольших количествах в различных технологиях.

Литий-ионные аккумуляторы занимают значительной часть рынка систем хранения энергии, которая растет, главным образом, с ростом использования гибридных и электрических транспортных средств. Можно утверждать, что примерно 90 % шаровидного графита, производимого во всем мире, используется в системах аккумулирования энергии.

Анод в Li-ионных батареях изготавливается из графита. Эти батареи меньше, легче и мощнее, чем традиционные аккумуляторы, и имеют плоский профиль напряжения. Последнее означает, что они обеспечивают практически полную мощность, пока не разряжаются. Для таких батарей также не присущ эффект памяти и характерна очень низкая скорость разряда, когда он не используется. Почти все портативные потребительские устройства, такие как ноутбуки, сотовые телефоны, MP3-плееры и др. используют Li-ионные батареи. В то время как батареи невелики, рынки велики и продолжают расти быстро, независимо от общих экономических условий. Годовой рост рынка электротехнических графитов оценивается более чем в 20 %, а общий спрос на графит приближается к 150000 т/г [26].

До 10 кг графита в среднем требуется для гибридных автомобилей (Hybrid Electric Vehicles – HEV) и до 70 килограммов для электромобилей (Electric Vehicles – EV). Порядка 100000 тонн графита ежегодно расходуется на производство автомобильных аккумуляторов, что позволяет прогнозировать на ближайшее время 30-процентное увеличение спроса на чешуйчатый графит [27].

В Li-ионных аккумуляторах используется шаровидный графит ("SPG"), который изготовлен из концентратов чешуйчатого графита, производимого на графитовых шахтах. Используется только чешуйчатый графит, который может быть очищен до 99,9 %. Процесс производства включает в себя обогащение графита кислотной обработкой от 94 % до более, чем 99 %. Очищенный продукт измельчают до размера частиц 10-20 мкм с целью максимального увеличения площади поверхности графита. После придания частицам чешуйчатого графита сферической формы (spheritisation) его частицы могут достигать 5 мкм. Процесс является дорогостоящим и в отходы уходит до 70 % исходного чешуйчатого графита. В результате, шаровидный графит без покрытия (uncoated spherical graphite) в настоящее время продается по цене до 3500 долларов за тонну, что более чем в три раза дороже крупночешуйчатого графита. Шаровидный графит с покрытием (coated spherical graphite) продается за 8000-12000 долларов за тонну [27].

Покрытие сферического графита является заключительным этапом в его производстве. Покрытый SPG – высокотехнологичный продукт, разработанный крупными японскими, южнокорейскими и, в настоящее время, разработчики не раскрывают технологию его производства. Изменение цены с 3500 долларов за тонну за непокрытый графит до 8000-12000 долларов США за тонну отражают стоимость и сложность этого процесса.

Почти все Li-ионные аккумуляторы в настоящее время производятся в Азии из-за доступности графита,

слабых экологических стандартов и низких затрат на оплату труда.

Специалисты Graphex Mining (Австралия) считают, что спрос на графит, используемый в качестве материала для анода литий-ионных батарей, должен увеличиться более чем на 200 % в течение следующих четырех лет в связи с ростом спроса на электрические транспортные средства и интенсивное развитие рынка устройств для хранения электроэнергии [27].

Вермикулярный графит (vermicular graphite iron – VGI). В англоязычной литературе чаще употребляется термин «Compacted graphite iron» (CGI). Эта форма графита, встречающаяся в чугуне, является промежуточной между шарообразным графитом и пластинчатым. Такой графит, как и пластинчатый, имеет форму изогнутых лепестков. От пластинчатого вермикулярный графит отличается округлыми краями, меньшими размерами и меньшим отношением длины лепестка к его толщине (у вермикулярного графита это отношение находится в пределах 2-10, а у пластинчатого значительно превышает 10). Поэтому вермикулярный графит не является таким концентратором напряжений, как пластинчатый [28]. Специфика анизотропной микроструктуры вермикулярного графита заключается в периодическом сочетании микрозон слоисто-блочной структуры, подобной структуре пластинчатого графита, и слоисто-концентрической, характерной для шаровидного графита.

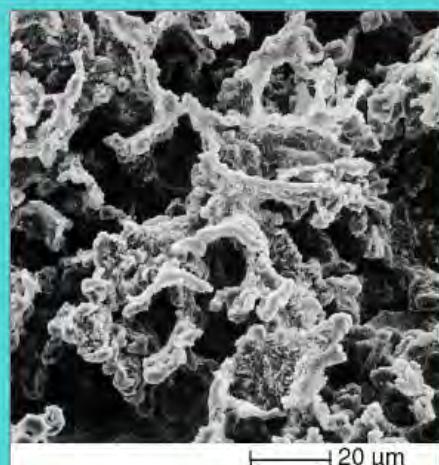


Рис. 9 Вермикулярный графит, СЭМ [30]

Первое коммерческое применение для чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) – тормозные диски для железнодорожных высокоскоростных (более 175

миль/ч) поездов. [29]. Кроме того, в последнее время ЧВГ используется для блоков дизельных двигателей, поскольку позволяет значительно уменьшить вес, по сравнению с двигателями из серого чугуна.

Хлопьевидный графит [flaked graphite] – графит, образующийся при отжиге белого чугуна (иногда называется графитом отжига) с частицами компактной, но не округлой формы. Ковкий чугун с хлопьевидным графитом занимает промежуточное положение по прочности между обычным серым и высокопрочным чугуном [31]. При отжиге белого чугуна происходит разложение цементита с образованием графита хлопьевидной формы (рис. 10) [32]. В результате этого хрупкие и твердые отливки становятся пластичными и более мягкими.



Рис. 10 Хлопьевидный графит в ковком чугуне [32]

Библиографический список

1. Кравец В.А. Фазовые превращения, приводящие к выбросам графита, монооксида углерода и бурого дыма при перегревах чугуна / В.А. Кравец, А.А. Лоцман, А.Л. Попов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – Вип. 4 (102). – С. 144-150.
2. Маслов В.А. Источники и ресурсы железографитовых отходов на металлургических предприятиях / В.А. Маслов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах. В 2 т. Т. 1 : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 9-11 сентября 2015 г.). – Мариуполь: ПТТУ, 2015. – С. 147-150.
3. Толочко А.И. Утилизация пылей и шламов в черной металлургии / А.И. Толочко, В.И. Славин, Ю.М. Супрун, Р.М. Хайрутдинов. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 152 с.
4. Пыль графитовая в Украине // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://prom.ua/Pyl-grafitovaya.html?no_redirect=1.
5. Markograf // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.markograf.com.
6. Дзюба О.И. Технология химической доводки графитодержащих продуктов / О.И. Дзюба, В.Н. Харитонов, Е.В. Кулаков // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://knu.edu.ua/Files/92_2006/st_63.pdf.
7. Shengli Liu, JR. Kish, a source of crystalline graphite / Liu Shengli, Carl R. Lopen // Carbon. – 1991. – V. 2. – №. 8. – P. 1119-1124.
8. Graphene Supermarket // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: graphene-supermarket.com/Natural-Kish-Graphite.html.
9. ДСТУ 2891-94. Чавун для виливків. Терміни та визначення: Чугун для отливок. Термины и определения: чинний від 1996-01-01. Офіц. вид. – К.: Держстандарт України, 1995. – 35с.
10. Микроанализ чугунов // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://studopedia.org/4-83256.html>.
11. Чугуны // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.naukaspb.ru/spravochniki/Demo%20Metall/2_7.htm.
12. ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84). Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки: действующий с 1997-01-01. – М: Гос. Комитетом СССР по стандартам, 1997. – 5 с.
13. Закирничная М.М. Образование фуллеренов в углеродистых сталях и чугунах при кристаллизации и термических воздействиях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.02.01 «Материаловедение (машиностроение в нефтегазовой отрасли)» / М.М. Закирничная. – Уфа, 2001. – 48 с.
14. Дубровский С.А. Роль фуллеренов в процессе образования шаровидного графита в чугуне / С.А. Дубровский, А.Н. Роготовский, Ю.Н. Петрикян // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 9. – С. 28-31.
15. ASTM A247 Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.astm.org/Standards/A247.htm>.
16. Imasogie B.I. Characterization of graphite particle shape in spheroidal graphite iron using a computer-based image analyzer / B.I. Imasogie, U. Wendt // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. – 2004. – Vol. 3. – № 1. – P. 1-12.
17. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры: действующий с 1987-01-07. – М: Стандартинформ, 2005. – 43 с.
18. Макаренко К.В. Фрактальный анализ микроструктур графитизированных чугунов / К.В. Макаренко, Д.А. Плюшкин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 1(49). – С. 34-43.

19. Li Jianming. Fractal growth of graphite nodules in iron / Jianming Li, Li Lu and Man On L. // Philosophical Magazine Letters. – 2000. – V. 80. – № 9. – P. 633-640.
20. Смирнов А.Н. Производство отливок из чугуна / А.Н. Смирнов, И.В. Лейрих. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – с. 245.
21. Аникин А.А. Шаровидный графит – уникальное морфологическое образование углерода / А.А. Аникин, С.Б. Венис, Д.И. Биленко, А.Н. Грибов // Известия Саратовского университета. – 2012. – Т. 12. – Вып. 2. – С. 18-20.
22. Іванов В.Г. Будова вкраплень графіту у синтетичних чаунах / В.Г. Іванов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – №1. – С. 16-18.
23. Ivanov V.G. Cone-helix growth forms of graphite / V.G. Ivanov, D.D. Doublet, A. Hellawell // Acta Metallurgica. – 1974. – V. 22. – P. 481-486.
24. Pencea Ion. New Aspects Regarding the Structure of Spheroidal Cast Iron Carbon Inclusions Revealed by WAXD Investigations / Ion Pencea, Doru Michael Stefanescu, Roxana Ruxanda, Florina Violeta Anghelina // Key Engineering Materials. – 2011. – Vol. 457. – P. 120-125.
25. Kvasnitsa V.N. Spherical graphite from the Azov Sea region / V.N. Kvasnitsa and V.G. Yatsenko // Mineralogicheskii Zhurnal. – 1991. – V. 13(1). – P. 95-101.
26. Minfind // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mindat.org>.
27. Graphite: The future of nuclear power // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://northerngraphite.com>.
28. Чугуны с вермикулярным графитом // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://studopedia.org/1-4186.html>.
29. Why Compacted Graphite Iron? // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://web.archive.org/web/20071219013840/http://www.competitiveproduction.com/features/default.aspx?article_id=1388&volume_no=3&issue_no=2.
30. Vermicular Graphite Cast Iron // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=RU&site=kts&NM=263>.
31. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
32. Система железо – цементит // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/1865682/page:2/>.

Рукопись поступила в редакцию 14.01.2017

TECHNOGENIC GRAPHITE

© V.M. Shmalko, PhD in technical sciences, O.I. Zelenskii, PhD in technical sciences (SE «UKHIN»)

The types of technogenic graphite has been considered in the article. Descriptions of it morphology and formation has been given. The main technologies and sources of its formation has been indicated. The properties of technogenic graphite and the sphere of its application are described.

Keywords: carbon, graphite, properties, composition, morphology.

ТЕХНОГЕННИЙ ГРАФІТ

© В.М. Шмалько, к.т.н., О.І. Зеленський, к.т.н. (ДП "УХІН")

У статті розглянуто види техногенного графіту. Описано його морфологію та формування. Вказані основні технології, у яких формується техногений графіт. Описано властивості техногенного графіту та сфера його застосування.

Ключові слова: вуглець, графіт, властивості, склад, морфологія.

