

Особенности агрегативного механизма формирования структуры шаровидного и вермикулярного графита в модифицированных чугунах

Рассмотрен процесс агрегативного формирования включений вермикулярного и шаровидного графита в высокопрочном чугуне. Показано, что компьютерное моделирование формирования графитных включений по DLA процессу обеспечивает адекватность фрактальных моделей и реальных графитных включений разной морфологии.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, шаровидный графит, агрегация, вермикулярный графит, фрактальная структура

Механизм формирования структуры компактных графитных включений остается одним из основных в разработке общей теории модифицирования в производстве чугуна с шаровидной и вермикулярной формой графита. Критерием оценки адекватности гипотез является их способность объяснять все разнообразие морфологических особенностей строения компактных и вермикулярных форм графита с позиций единого механизма.

Более четырех десятилетий длится периодически возобновляющаяся дискуссия авторов – сторонников различных гипотез формирования шаровидного графита в модифицированных чугунах [1-4]. Авторы одного из первых критических обзоров отмечали недостаточную аргументацию наиболее распространенных гипотез, отдавая предпочтение гипотезе образования графита в микроскопических газовых пузырьках [1]. В работе [2], опубликованной спустя 20 лет со дня публикации первого критического обзора, отмечено противоречие теории и экспериментальных фактов в пузырьковой гипотезе. Автор данного обзора считает гипотезу формирования графита в газовых пузырьках несостоятельной в объяснении механизма процесса.

Тем не менее, в очередном критическом анализе «общепринятых» гипотез образования шаровидного графита [3], опубликованном по прошествии еще 20 лет, авторы предлагают не только очередной вариант процесса на основе пузырьковой теории, но и распространяют его на механизм формирования вермикулярного графита [4]. Циклическая периодичность возрождения пузырьковой гипотезы в прошлом и, вероятно, в будущем обусловлена настолько очевидной привлекательностью и «бесспорной» тождественностью формы газового пузырька и «идеального» графитного шарика, что попытки теоретического обоснования этой гипотезы будут продолжаться. Однако для объяснения механизма формирования включений графита различных «аномальных» форм в высокопрочном чугуне, например указанных в ГОСТ 3443-87, сторонникам пузырьковой гипотезы приходится использовать разные, часто экзотические механизмы.

Одно из направлений развития теории формирования шаровидных и вермикулярных графитных включений в модифицированных чугунах основано на представлении о коллоидном строении жидкого чугуна. Такая модель строения жидкого чугуна с дисперсной графитной фазой является объектом многолетней дискуссии. Значительный интерес вызвали также и процессы агрегации коллоидно-дисперсной графитной фазы в результате глобуляризирующей обработки чугуна [5-8].

С целью экспериментального подтверждения различных проявлений агрегационных процессов в расплаве чугуна исследовали морфологические особенности графитных образований в отливках каландровых и прокатных валков с бочкой \varnothing 600-1020 мм; цилиндрических образцах \varnothing 15-100, отлитых в сухие песчаные формы, а также в призматических образцах толщиной 0,5-0,8 мм, полученных «замораживанием» расплава в медных щелевых холодильниках методом вакуумвсасывания. Для глобуляризирующего модифицирования применяли магниевые лигатуры, ферроцерий и металлический магний. Перед заливкой в чугун вводили инокулирующий модификатор ФС75.

Для выявления общих и наиболее статистически устойчивых морфологических признаков провели анализ представительной выборки (> 1000 шт) случайных сечений графитных включений, сформировавшихся при различных скоростях охлаждения расплава и переменных концентрациях в нем глобуляризирующих и инокулирующих добавок. Для этого отбирали центральные или наибольшие сечения включений графита разных морфологических типов (от шаровидного до вермикулярного) с четко выраженными аномальными деталями, которые не так отчетливо выявляются в оптимальных условиях формирования шаровидных включений. Степень приближения случайного сечения графита к наибольшему оценивали в процессе послойного шлифования его с шагом 2-4 мкм [8].

Автор статьи предлагает рассмотреть основные положения и представления о коллоидно-агрегационной модели формирования компактного графита

та в модифицированных чугунах, более подробно изложенные в работе [9]. В этой модели системы «расплав-графит» постулируется наличие в жидком чугуне в предкристаллизационный период полимолекулярных первичных блоков или пакетов графита, которые можно обнаружить химическим анализом, но не всегда выявить оптическим микроскопом. Вследствие сорбционных процессов поверхностно-активных элементов на поверхности раздела «графит-расплав» образуется двойной электрический слой (ДС), создающий энергетический барьер, который препятствует коагуляции одноименно заряженных первичных блоков графита и обеспечивает агрегативную устойчивость всей системы.

В результате глобуляризирующей обработки чугуна вакуумированием, глубоким раскислением, десульфурацией и вводом редкоземельных металлов (РЗМ) физико-химические условия на межфазной границе «графит-расплав» изменяются [10]. Электрокинетический потенциал ДС снижается и может оказаться ниже порога коагуляции, вследствие чего агрегативная устойчивость системы нарушается. Это позволяет первичным графитным блокам агрегировать, реализуя свойство кристаллов – способность

формироваться дискретными отложениями относительно параллельных слоев полимолекулярной толщины с одной стороны кристаллизующегося объекта [11, 12].

Анизотропность свойств графита в расплаве [13] допускает значительное развитие процесса ориентированного укрупнения графитных включений с образованием из первичных полимолекулярных блоков вторичных анизодиаметрических блоков-поликристаллитов секториальной (в случайном сечении) или пирамидальной (в объеме) формы. Так как на боковую поверхность этих блоков выходят призматические грани первичных блоков графита с максимальной сорбционной способностью, а их базисные поверхности составляют основание пирамидального блока, то вследствие анизотропии свойств графита ДС такой анизодиаметрической частицы графита неодинаков. Вблизи вершины пирамидального блока ДС имеет минимальную величину, поэтому порог коагуляции в этой зоне преодолевается в первую очередь.

В процессе поступательного и вращательного движений пирамидальных блоков коллоидных размеров под действием концентрационных потоков, имеющих конвективную природу [11], и броуновского движения в условиях аномальной вязкости [14, 15] происходят хаотические столкновения графитных тел друг с другом и с неметаллическими включениями экзогенного и эндогенного происхождения. В дооптимальном диапазоне глобуляризирующей обработки чугуна столкновение блоков вершинами с минимальным энергетическим барьером приводит к формированию агрегатов разной степени упорядоченности. В результате образуются «вермикулообразные» или разреженные структуры графита (рис. 1; 2, а, д, е). При этом вероятность прилипания дисперсных частиц графита к формирующемуся агрегату графита близка к 100 %, то есть когда практически каждый контакт частиц приводит к их агрегации. При значительном уменьшении заряда ДС под действием модификатора в дооптимальном диапазоне микроструктурные блоки дисперсного графита при взаимном контакте агрегируют, образуя неупорядоченные структуры – перистые (рис. 2, д, з), «вермикулообразные» (рис. 1, а-е; 2, е), неупорядоченные (рис. 2, к).

«Вермикулярность» графитных включений в случайном сечении шлифа может не выявляться. Отдельные фрагменты включений воспринимаются как цепи скоплений отдельных включений (рис. 1, а-з). Однако стереологическая реконструкция таких образований на основе последовательных сошлифовываний образца чугуна показывает, что в действительности такое графитное включение является связанной структурой (рис. 1, д, е). Причем весь протяженный агрегат состоит из разориентированных фрагментов дисперсной фазы, образовавших в процессе агрегации секториально-пирамидальные структурные элементы (рис. 1, а-з).

В интервале оптимальных концентраций модификатора, например при вводе 0,04-0,05 % Mg, не каждый взаимный контакт частиц приводит к их

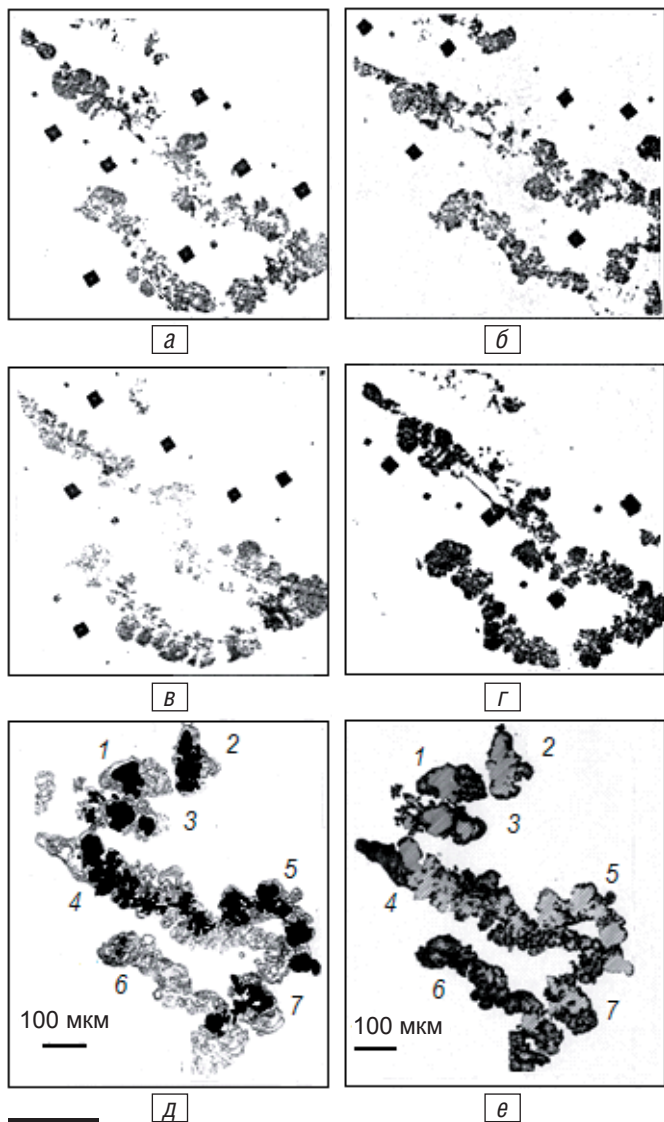


Рис. 1. Строение вермикулярного графитного агрегата в последовательных сечениях (а-з); контурная (д) и объемная реконструкция (е); автономные блоки агрегата (1-7)

агрегированию – слипанию. То есть, при меньшей вероятности слипания частиц формируются компактные квазиглобулярные структуры графита (рис. 2, а-в) и пространство между секторами «залечивается» – заполняется дисперсной графитной фазой (рис. 2, л, м).

Столкновения пирамидальных блоков поверхностями с более высоким зарядом, чем заряд в зоне вершин, не приводят к их коагуляции. Они продолжают участвовать в движении до реализации контакта «вершина-вершина» или «вершина – неметаллическое включение». Окончательное состояние процесса формирования включений графита фиксируется ауспенитной оболочкой (рис. 2, г, ж-и).

Для протекания гетерогенной коагуляции поликристаллических блоков по предположенному механизму кристаллографическое соответствие частицы инокулирующего модификатора и графитной фазы не является обязательным, что согласовано с выводами работы [16] и проиллюстрировано фрагментами центральных частей компактных графитных включений (рис. 3, д, е). Большое значение в этом случае имеют знак и величина электрокинетического потенциала ДС частицы [9].

По рассмотренной схеме образуются компактные, преимущественно секториально-моноцентрические, включения графита (рис. 2, а, б, и, л). При дефиците гетерогенных центров коагуляции, особенно при замедленном охлаждении расплава, пирамидальные блоки могут формироваться в виде наружных концентрических слоев с разной степенью плотности упаковки и ориентации главных осей (рис. 3, а-в). При этом реализуются контакты коагуляции «вершина-основание» пирамидального блока.

Моно- или полицентрическая агрегация автономных поликристаллических блоков зависит от гомо- или гетерогенной природы центра агрегации. Так, в центральных зонах одних включений графита инородные неметаллические частицы не обнаружены, в других – наблюдаются стеклообразные неметаллические включения, расположенные эксцентрично (рис. 3, д), или кристаллические – в центре графитного включения (рис. 3, е). Нередко пирамидальные поликристаллические блоки наружного слоя имеют признаки агрегирования в виде перистых (рис. 3, б) структур, аналогичных показанным на рис. 2, з, к. В качестве одного из таких признаков может быть характерная форма

участков матрицы на межблочных границах наружного слоя.

Особенности морфологии многослойных графитных включений свидетельствуют о дискретности их формирования. Исходя из единого агрегативно-коагуляционного механизма образования компактных форм графита, можно с достаточным основанием утверждать о дискретном формировании и ядра многослойных включений графита.

Анализ пространственно-геометрического расположения участков матрицы в графитных структурах показал, что форма и характер ее размещения в виде радиально ориентированных цепей и пластин (рис. 2, а, б, ж), колец в двухслойных включениях (рис. 3, а, б) и впадин на внешнем контуре сечения (рис. 3, а, д) не являются результатом прорыва расплава в пустотелые включения графита [1]. Это обусловлено фиксацией матричной жидкости в межблочном пространстве в процессе агрегативного формирования автономных пирамидальных блоков и смыкания их межблочных границ. Характерно, что

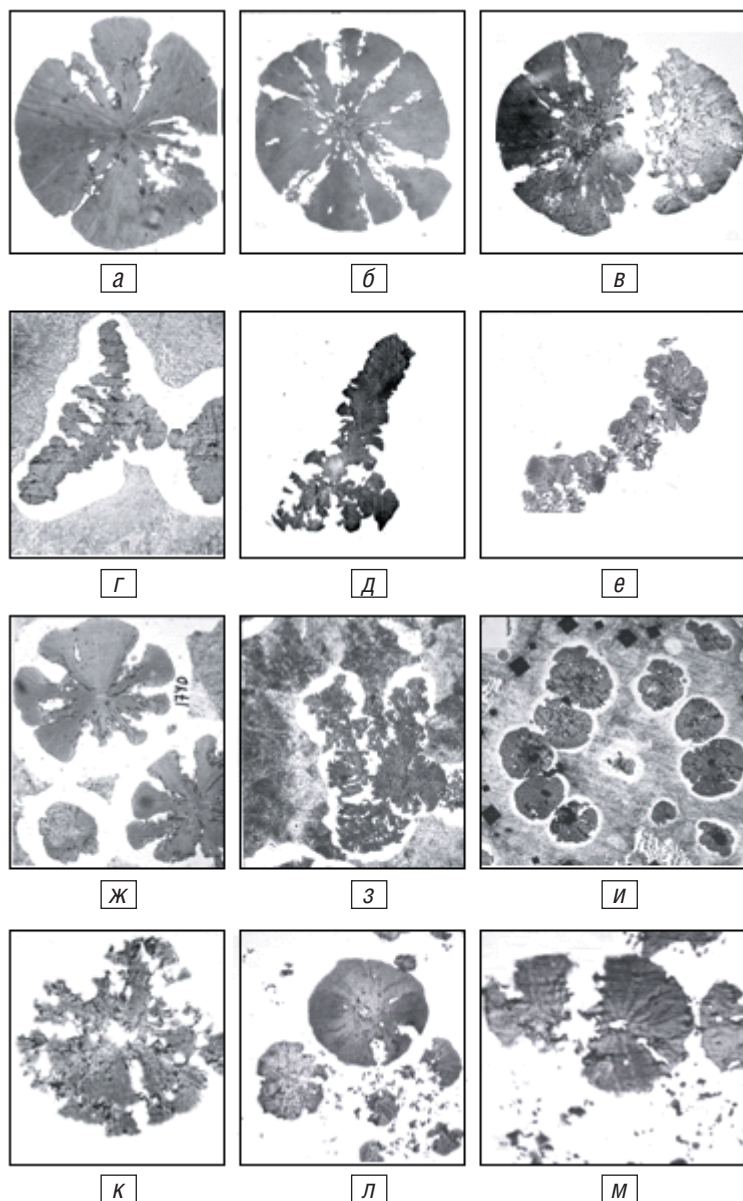


Рис. 2. Варианты строения графитных агрегатов: компактных (а-в, ж, и, л, м); вермикулярных (г-е); перистых (з, к)

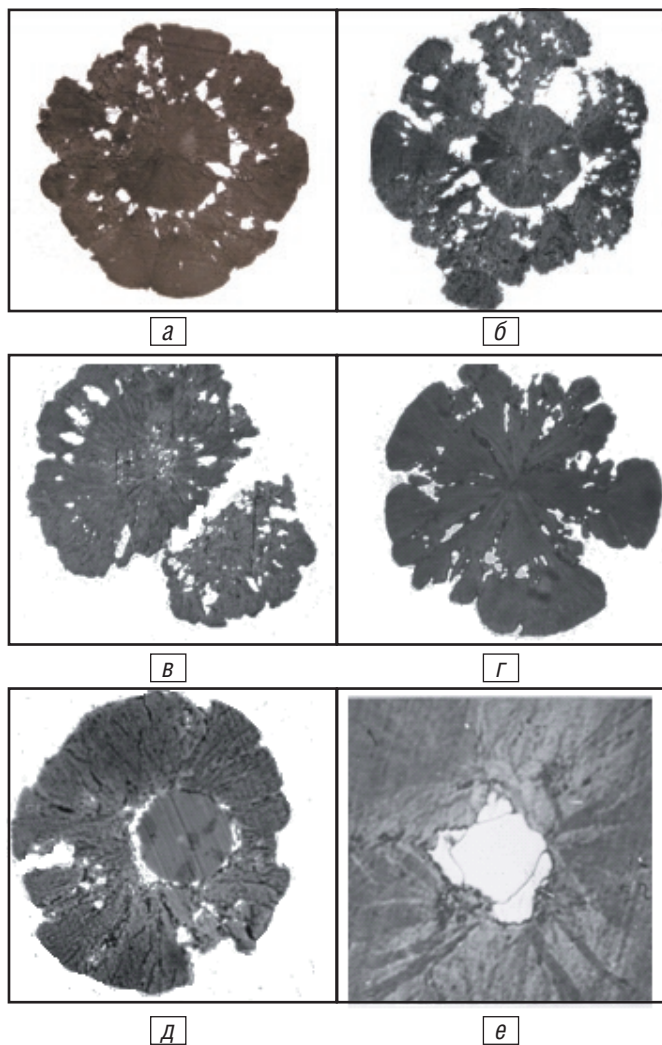


Рис. 3. Варианты строения графитных включений: двухслойных (а-б); с неметаллическими включениями (в, г)

на радиальной линии, проходящей через цепочки участков матрицы, в сечении графитного включения всегда находится соответствующий признак его наружного контура: квазиэпипциклоидальная впадина или разрыв границы (рис. 2, а, б).

Изложенный выше механизм формирования гра-

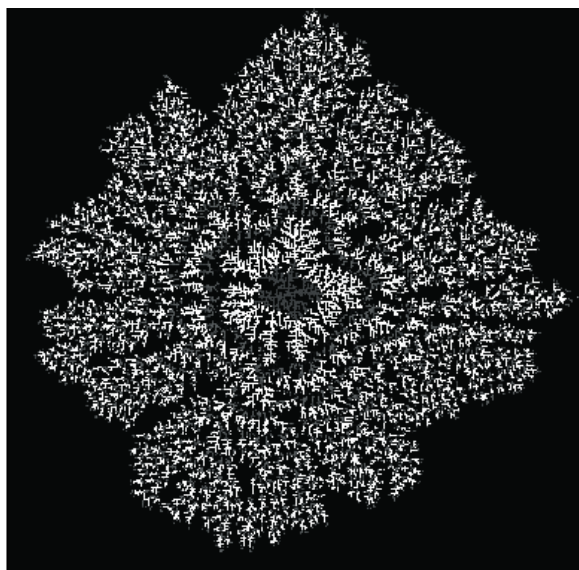
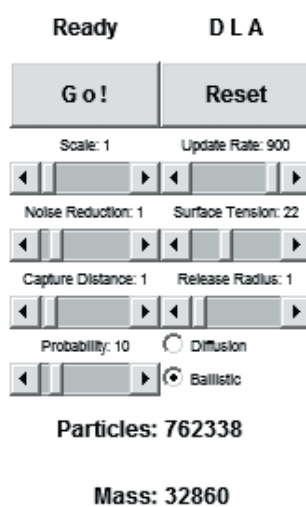


Рис. 4. Интерфейс апплета для моделирования DLA-процесса роста графитных включений



фитных включений с позиций классификации моделей относится к концептуальным или феноменологическим, хотя и опирающимся на экспериментальный материал. Эту модель можно дополнить детерминированной моделью процесса формирования графитных включений. Исследуемый процесс относится к многофакторным и весьма сложным в теоретическом описании металлургическим системам [17].

Представленные выше экспериментальные данные по морфологии реальных графитных включений дают основания для применения методов фрактальной геометрии к описанию особенностей строения включений графита в высокопрочном чугунах с шаровидным графитом (ВЧШГ). Фрактальный подход соответствует более высокому уровню анализа и понимания физической природы систем и явлений. Идеи и методы фрактального анализа успешно реализуют в материаловедении [18], оценке свойств металлов [19], металлловедении, металлургии, литейном производстве [20, 21] и др. В последние десятилетия количество публикаций о фракталах и приложениях фрактальной геометрии в науке и технике возрастает во всем мире экспоненциально. Фрактальный анализ позволяет намного упростить сложные процессы, что важно для понимания их сущности, моделирования, описания и управления.

Исследование ранних стадий формирования графитных включений показало, что этот процесс происходит в результате агрегации дисперсных субмикроскопических блоков-кристаллитов по диффузионному механизму [22, 23], что подтверждено приведенными выше экспериментальными данными (рис. 2; рис. 3, а-г). Для подобных агрегатов часто используют понятие фрактального кластера, под которым понимают структуру, образующуюся в результате ассоциации частиц при условии диффузионного характера их движения.

Для исследования и моделирования таких объектов часто применяют модельные фракталы. Смоделированному фрактальному кластеру, у которого есть своя фрактальная размерность, можно сопоставить реальный кластер или агрегат, который также имеет фрактальную структуру и такую же фрактальную размерность [24]. Таким образом, исследуя свойства модельного фрактального кластера, можно проанализировать свойства реальных кластеров с фрактальной структурой [25].

В 1981 г. Т. Виттен и Л. Сандер [26] предложили простую модель агрегации частиц, ограниченной диффузией (*DLA – diffusion limited aggregation*). Интерес к этой модели был вызван, во-первых, тем, что большое количество физических объектов формируется примерно по этому механизму. Во-вторых, при относительно простой модели можно учесть влияние многих факторов. Программно модельный

Интерес к этой модели был вызван, во-первых, тем, что большое количество физических объектов формируется примерно по этому механизму. Во-вторых, при относительно простой модели можно учесть влияние многих факторов. Программно модельный

DLA процесс реализуется многочисленными модификациями компьютерных программ (апплетов), доступных в сети Internet. Интерфейс одного из них [27], использованного в данной работе, представлен на рис. 4.

В простейшей постановке задачи способ построения фрактального кластера, образованного из отдельных частиц, в двумерной модели состоит из следующего. Ограниченное двумерное пространство разбивается на множество квадратных ячеек. В одну из них помещают частицу-затравку, а затем из удаленного источника на границе области периодически выпускаются частицы, которые совершают броуновское движение. Каждая новая частица передвигается в соседнюю клетку случайным образом, – ее путь выбирают методом Монте-Карло. Если частица достигла границы пространства, она отражается от нее. Движение частицы продолжается до тех пор, пока она не окажется по соседству с частицей-затравкой или с одной из частиц образующегося агрегата – кластера. Тогда «блуждающая» частица останавливается и закрепляется в данной ячейке, а в пространство запускается следующая частица. Таким образом, происходит рост DLA-кластера. Более подробно механизм этого процесса рассмотрен в работе [24].

Апплет [27] демонстрирует процесс стохастического роста в порядке, который определяется предпочтениями пользователя. В цветном варианте цвет каждой частицы в процессе агрегации представляет «историю» частиц, то есть на какой стадии частица присоединилась к агрегату. Движение частиц может быть задано одним из двух вариантов – баллистическим или диффузионным. Многовариантность апплета позволяет задавать значения основных параметров в достаточно широких пределах, что дает возможность имитировать влияние различных факторов, определяющих форму агрегата, моделирующего в нашем случае процесс формирования графитного включения.

Управляемые параметры процесса в интерфейсе программы реализуются командами с помощью кнопок и движков. К числу важных параметров процесса применительно к формированию модели графитного кластера можно отнести следующие опции: «радиус захвата» – работает как магнит, который притягивает частицы (диапазон 0-30) и позволяет частице присоединиться к агрегату, если она находится на некотором расстоянии от него; «радиус действия» – определяет расстояние, которое предстоит «пройти» частице через самые внешние части агрегата от области запуска до окружности, центром которой является частица-затравка (диапазон 1-40); «вероятность» – задает вероятность

присоединения (прилипания) частицы к агрегату (диапазон 1-100); «диффузия / баллистика» – в соответствии с выбранным вариантом определяет процесс роста агрегата (в режиме «диффузия» частица движется в разных направлениях до тех пор, пока не присоединится к агрегату или не покинет область построения агрегата на дисплее; в режиме «баллистика» – по прямому маршруту из случайной точки на дисплее и в случайном направлении).

В нижней части интерфейса апплета справа непрерывно указывается количество частиц, которые прошли через этот процесс на каждый момент времени (в том числе тех частиц, которые не присоединились к агрегату). Здесь же выводится информация о «массе» – количестве частиц, из которых состоит агрегат в своем текущем состоянии.

В качестве примера на рис. 5 показаны модели графитных кластеров, сформировавшихся при разных значениях опции, определяющей вероятность присоединения частиц дисперсной фазы к агрегату в процессе его роста. Серия моделей (рис. 5, а, б) формировалась в диффузионном режиме при 100 % вероятности присоединения (прилипания) частиц к агрегату. По форме и характерным элементам строения эти модели можно рассматривать как морфологические аналоги группы графитных агрегатов, показанных на рис. 2, д, е, з. Модельные агрегаты, приведенные на рис. 5, в-е, формировались в том же режиме, но при вероятности прилипания частиц в диапазоне 5...30. Эта группа моделей по морфологическим признакам может рассматриваться как аналог графитных включений, показанных на рис. 2, а, б.

В процессе формирования внутри модельного кластера между его радиально ориентированными секториальными блоками образуются поры – участки «матричной жидкости». По мере роста структуры число пор и их размеры увеличиваются,

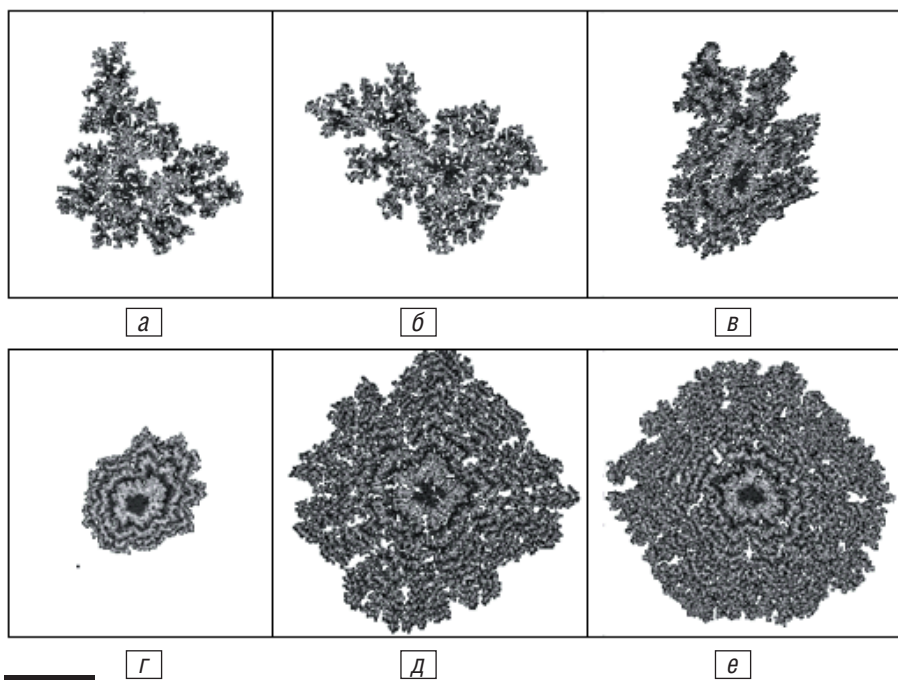


Рис. 5. Влияние вероятности (P , %) прилипания частиц дисперсной фазы на форму DLA-модели графитного включения в диффузионном режиме роста: $P = 100$ (а-б); $P = 5$ (в); $P = 10$ (д); $P = 30$ (е)

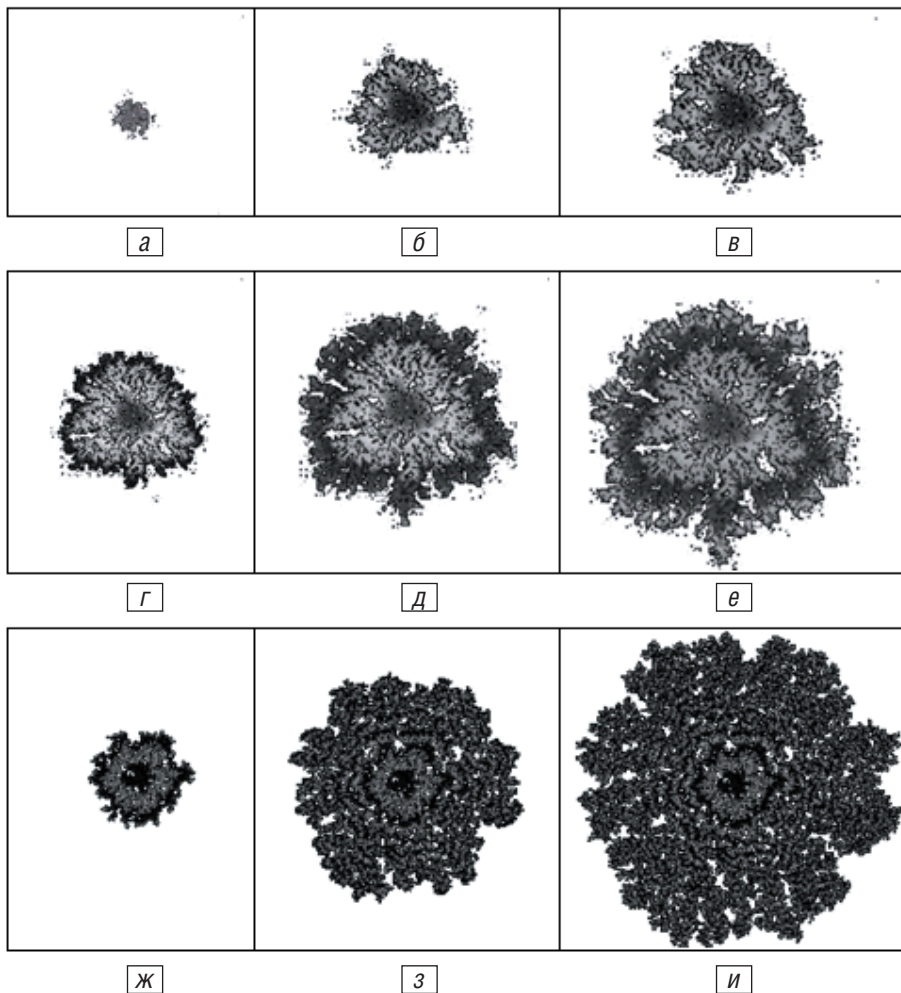


Рис. 6. Динамика формирования *DLA*-моделей компактных графитных включений по вариантам: № 1 (а-е); № 2 (ж-и)

что обусловлено эффектом экранирования. Экранированными оказываются элементы кластера, расположенные во впадинах его извилистой фрактальной поверхности, куда вероятность попадания частиц из окружающей матричной жидкости (макрофазы) очень

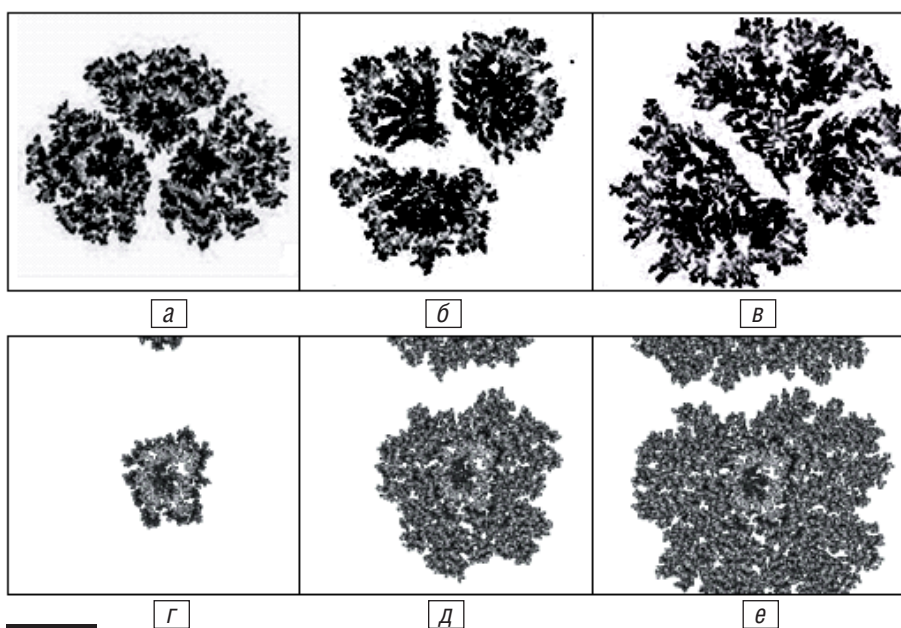


Рис. 7. Проявление эффекта экранирования при групповом росте смежных *DLA*-моделей графитных включений: три включения (а, б); два включения (в-е); последовательные стадии (з-е)

мала. Поэтому частицы дисперсной фазы присоединяются к тем центрам роста кластера, которые более доступны для контакта. Такие центры роста оказываются расположенными на выступах поверхности кластера. Поэтому экранированные активные центры роста фрактального кластера не реализуются. Они остаются во внутренних замкнутых порах. Этим и объясняется снижение средней плотности частиц фрактального кластера по мере удаления от образующего центра. Скриншоты последовательных этапов формирования кластерной модели компактного графитного включения приведены на рис. 6. Захват матричной жидкости растущими секториальными блоками проявляется уже на ранних стадиях формирования кластера (рис. 6, б, в). На последующих этапах роста (рис. 6, г-е) эти радиально расположенные участки матрицы замыкаются внутри агрегата, что аналогично замыканию матричной жидкости при формировании реальных графитных структур (рис. 2, а-в). Серия последовательных скриншотов формирования другой модели (рис. 6, ж-и) воспроизводит аналогичный механизм формирования компактного графитного включения.

Эффект экранирования наблюдают и при формировании рядом расположенных отдельных кластеров (рис. 7) и графитных включений (рис. 2, в, м).

В процессе формирования «строительный материал» не попадает в межкластерное пространство, и процесс завершается с сохранением разделительного слоя матричной жидкости.

Сравнение строения реальных графитных включений с разной степенью плотности смыкания секториальных элементов (рис. 8, а, в, д, ж) и соответствующих типов моделей *DLA*-кластеров (рис. 8, б, г, е, з) свидетельствует об идентичности процессов их формирования. Последовательная обработка фрактальных *DLA*-кластеров методом дилатации, имитирующей процессы коалесценции и уплотнения частиц в графитном кластере, позволяет получить кластеры аналогичные графитным структурам.

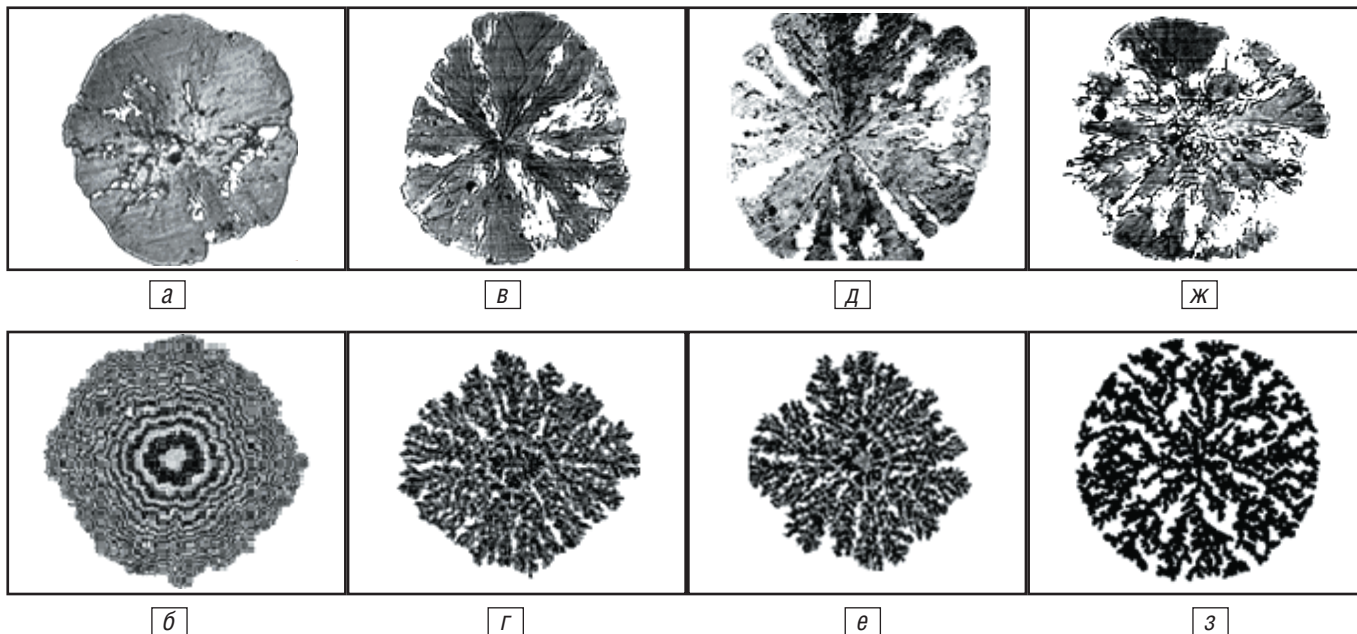


Рис. 8. Сопоставление строения: компактных графитных включений (а, в, д, ж); DLA-моделей (б, г, е, з)

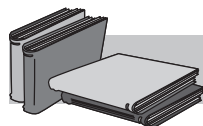
Выводы

Формирование включений графита в чугунах, подвергнутых глобуляризирующей обработке, реализуется путем агрегации дисперсной графитной фазы и построения пирамидальных поликристаллических блоков с моноцентрической или полицентрической их ориентировкой в квазиглобулярных или вермикулярных структурах графита.

Термодинамическим стимулом коагуляционного структурообразования компактных форм графита является стремление системы «расплав-графит»

к снижению свободной энергии путем уменьшения межфазной поверхности в результате ориентированной коагуляции и смыкания межблочных границ в графитных включениях.

Компьютерное моделирование процессов формирования графитных включений различной морфологии на основе DLA-модели позволяет не только создавать их адекватные фрактальные модели, но и управлять этими процессами на основе настраиваемых параметров, аналогичных параметрам реального структурообразования в чугуне.



ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по изготовлению отливок из высокопрочного чугуна / Под ред. А. А. Горшкова. – М.; К.: Машгиз, 1961. – 300 с.
2. Неижко И. Г. О теориях образования шаровидного графита // Кристаллизация, структурообразование и свойства модифицированного чугуна: Сб. – К.: ИПЛ АН УССР, 1982. – С. 3-14.
3. Баранов А. А., Баранов Д. А. К теории образования в чугуне шаровидного графита // Металл и литье Украины. – 2003. – № 9-10. – С. 42-45.
4. Баранов Д. А. О механизме формирования вермикулярного графита при затвердевании чугуна // Литейн. произв-во. – 2004. – № 10. – С. 2-3.
5. Епанчинцев О. Г., Шебашинов М. П. Исследование структуры графита в чугуне на растровом микроскопе // Там же. – 1971. – № 9. – С. 27.
6. Дибров И. А., Комиссаров В. А., Жевтунов П. П. Технологические возможности воздействия на включения графита в жидком чугуне при плавке в индукционных печах // Свойства расплавленных металлов. Тр. XVII совещания по теории литейных процессов: Сб. – М.: Наука, 1974. – С. 50-53.
7. Шебашинов М. П. Роль модификаторов в процессе формирования включений графита шаровидной формы // Литейн. произв-во. – 1979. – № 1. – С. 2.
8. Соценко О. В. Особенности массопереноса углерода в процессе формирования графита в ВЧШГ // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1988. – № 11. – С. 114-118.
9. Соценко О. В. Агрегативный механизм формирования графита в ЧШГ // Там же. – 1990. – № 8. – С. 71-74.
10. Ивахненко И. С. Роль сорбции примесных элементов в процессах зарождения включений графита в чугуне // Литейн. произв-во. – 1979. – № 3. – С. 2.
11. Процессы реального кристаллообразования / Н. Н. Шефталъ, В. Е. Кисенко, А. Н. Бузыкин и др. – М.: Наука, 1977. – 234 с.
12. Хуснутдинов Г. Д., Курепина В. В., Черновол А. В. Факторы, определяющие форму включений графита в рафинированных сплавах Fe-C-Si // Литейн. произв-во. – 1980. – № 8. – С. 3-4.

13. Межфазное натяжение и форма графита, кристаллизующегося в жидком чугуна / Б. С. Мильман, Н. Н. Александров, В. Т. Солонков, Л. В. Ильичева // Там же. – 1976. – № 5. – С. 3-6.
14. *Pu Хосен, Литвиненко А. Н., Мостовой Н. И.* Влияние кремния на строение и свойства модифицированных железоуглеродистых расплавов // Там же. – 1977. – № 9. – С. 1-2.
15. Гистерезис вязкости железоуглеродистых расплавов / В. С. Шумихин, В. М. Замятин, Б. А. Баум, А. К. Билецкий // Там же. – 1978. – № 6. – С. 4-5.
16. *Fransis B.* Heterogeneous Nuclei and Graphite Chemistry in Flake and Nodular Cast Irons. Metallurgical Transactions. – 1979. – V. 10 A, № 1. – P. 21-31.
17. Моделювання та оптимальні металургійні системи: Навч. посібник / Ред. В. Б. Охотський та ін. – К.: ІЗМН, 1998. – 156 с.
18. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 384 с.
19. *Барахтин Б. К., Мещеряков Ю. И., Савенков Г. Г.* Динамические и фрактальные свойства стали СП-28 в условиях высокоскоростного нагружения // Ж-л технической физики. – 1998. – Т. 68, № 10. – С. 43-49.
20. *Михалев А. И., Деревянко А. И., Помулєв В. В.* Применение методов фрактальной геометрии для анализа металлоструктур // Вестник ХГТУ. – 2001. – № 3 (12). – С. 178-180.
21. Фрактальная модель роста зерен при затвердевании сплавов / Ю. Н. Таран, А. И. Михалев, В. Е. Хрычиков, А. И. Деревянко // Современные проблемы металлургии. Научн. тр. НМетАУ. – 2001. – Т. 3. – С. 414-421.
22. *Соценко О. В.* Особенности формирования структуры графита в модифицированных чугунах // Литейн. произв-во. – 1983. – № 12. – С. 5-8.
23. *Соценко О. В.* Аномальные формы графита в модифицированном чугуна // Теория и практика металлургии. – 1998. – № 4. – С. 17-20.
24. *Соценко О. В.* Компьютерная DLA-модель формирования шаровидного графита в высокопрочном чугуна // Металл и литье Украины. – 2009. – № 9. – С. 3-9.
25. *Смирнов Б. М.* Фрактальные кластеры // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 149, Вып. 2. – С. 177-217.
26. *Witten T. A., Sander L. M.* Diffusion-limited aggregation as a kinetical critical phenomena // Phys. Rev. Lett. – 1981. – V. 47, № 19. – P. 1400-1403.
27. Welcome to the «Random Growth» applet. – Режим доступа: http://ory.ph.biu.ac.il/2000/English/main_index.html – Загл. с экрана. – Яз. англ.

Анотація

Соценко О. В.

Особливості агрегативного механізму формування структури кулястого та вермикулярного графіту в модифікованих чавунах

Розглянуто процес агрегативного формування включень вермикулярного та кулястого графіту у високоміцному чавуні. Показано, що комп'ютерне моделювання формування графітних включень по DLA процесу забезпечує адекватність фрактальних моделей і реальних графітних включень різної морфології.

Ключові слова

високоміцний чавун, кулястий графіт, агрегація, вермикулярний графіт, фрактальна структура

Summary

Sotsenko O. V.

Features of the aggregative mechanism of spherical and vermicular graphite forming in the modified cast irons

The process of formation of the aggregative inclusions and the vermicular graphite nodules in ductile iron is described. It is shown that a DLA computer simulation of formation of graphite inclusions ensures adequacy of fractal models and real graphite inclusions of various morphology.

Keywords

ductile iron, spherical graphite, aggregation, vermicular graphite, fractal structure

Поступила 17.10.12