

---

# ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 621.74:669.131.622

**О.В. Соценко**

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННО- МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВКЛЮЧЕНИЙ ГРАФИТА В МИКРООБЪЕМАХ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

*С применением компьютерной программы ImageJ определены основные количественные характеристики включений компактного графита в микрообъемах высокопрочного чугуна. Выявлены размерная неоднородность включений графита и объединение их в пространственные сферические структуры.*

**Ключевые слова:** компьютерный анализ, фактор формы включений графита, высокопрочный чугун.

*Із застосуванням комп'ютерної програми ImageJ визначені основні кількісні характеристики включень компактного графіту в мікрооб'ємах високоміцного чавуну. Виявлено розмірну неоднорідність включень графіту та об'єднання їх в просторові сферичні структури.*

**Ключові слова:** комп'ютерний аналіз, фактор форми включень графіту, високоміцний чавун.

*With the use of a computer program ImageJ identified the main quantitative characteristics of compact graphite inclusions in the ductile cast iron. Spotted dimensional heterogeneity of graphite inclusions, and combining them into a spatial spherical structure.*

**Keywords:** computer analysis, the shape factor of graphite inclusions, ductile iron.

**П**остановка проблемы и анализ публикаций. Форма, размеры, количество и характер распределения графитовых включений (ГВ) в высокопрочном чугуне (ВЧ) наряду с типом металлической основы определяют механические и эксплуатационные свойства отливок. В условиях промышленного производства литья из высокопрочного чугуна указанные характеристики ГВ регламентируются ГОСТом 3443-87. В исследовательской практике для оценки пространственно-морфологических и размерно-топологических характеристик ГВ в структуре ВЧ применяются методы количественной металлографии [1, 2]. Исследователи и практики особое внимание уделяют оценке формы графита как важнейшей характеристике, определяющей эффективность технологии производства литья из ВЧ. Большое коли-

чество работ [3-7] посвящено разработке и использованию в исследовательской практике различных модификаций безразмерных критериев, факторов формы, округлости и компактности ГВ.

В прикладном литейном металловедении для оценки компактности ГВ получили развитие три основных направления. Первое основано на разработке эталонов или шкал визуального сравнения формы сечений реальных ГВ со стандартным набором микроструктур или стилизованных графических изображений с дискретными значениями характеристик компактности [3, 8, 9]. Второе направление оценки компактности ГВ основано на весьма трудоемких металлографических измерениях сечений реальных ГВ на микрофотографиях или матовом стекле светового микроскопа с последующим расчетом соответствующей характеристики или параметра. При этом оценивают степень приближения формы анализируемого сечения к форме идеального круга, имеющего значение компактности, равное 1.

Все рассмотренные методы либо весьма трудоемки, либо не обеспечивают необходимой точности и требуют от исследователя практических навыков и высокой квалификации. При этом они не гарантируют объективности оценки структуры ГВ, что на практике часто приводит к конфликтным ситуациям между поставщиком и потребителем изделий из высокопрочного чугуна.

В последние годы большое развитие и распространение получает третье направление, основанное на использовании различных аналитических компьютеризированных комплексов, анализаторов изображений, предназначенных для металлографических, биологических и других исследований [6, 7]. Количество изучаемых параметров, относящихся к описанию ГВ в структуре металла, может быть весьма представительным. Например, программа *Macros 111 (Carl Zeiss)* для оценки сферичности ГВ в ВЧ использует более 10-ти различных параметров [10].

В работе [6] приведен обзор предыстории методов количественной оценки формы графита в модифицированных чугунах, включая их различные варианты. Автор работы предлагает метод идентификации графитных включений в чугунах на основе фрактального моделирования и анализа изображений ГВ, который в последние годы все больше привлекает внимание материаловедов и литейщиков [11-13].

Анализ публикаций, исследовательского опыта и производственной практики показывает, что для получения объективных количественных оценок ГВ в высокопрочных чугунах необходима разработка доступных и объективных методов автоматизированной оценки структуры металла и формы графита. Известные методы компьютерной оценки формы компактного графита в ВЧШГ предусматривают, как правило, анализ ГВ в нескольких полях зрения оптического микроскопа, расположенных в одном плоском сечении шлифа. При этом анализу подвергаются случайные сечения ГВ разных размеров и форм, то есть находящиеся на различном расстоянии от их максимального сечения, соответствующего «экваториальному».

Такой анализ не может определить, являются ли размеры ГВ различными или одинаковыми в данном объеме чугуна, в какой мере оценка формы случайного сечения характерна для ГВ в целом. Эта неопределенность особенно возрастает при анализе реальных ГВ, значительно отличающихся по форме и размерам от «идеальных» шаровидных включений, которые обычно служат объектом разработки многочисленных гипотез формирования графитной фазы в ВЧШГ.

Попытка внесения ясности в этот вопрос ставит перед необходимостью оценки реальной формы ГВ не по серии микрофотографий в плоскости шлифа, а в объеме металла, то есть по серии микрофотографий в последовательных сечениях микрообъема металла, многократно рассекающих каждое ГВ. При этом количество срезов – сошлифований образца должно быть достаточно большим, чтобы исследовать серию ГВ, расположенных на разном удалении от исходной поверхности шлифа с сохранением их пространственного взаимного расположения. Результаты одного из таких исследований опубликованы автором в работе [14]. Однако отсутствие доступных компьютерных методов оценки формы больших массивов ГВ в период

опубликования указанной работы не позволило выполнить задачу комплексного количественного определения различных характеристик графитной фазы в микрообъемах чугуна.

*Цель работы* – комплексный компьютерный стереологический анализ формы, площади, периметра, равноосности, округлости последовательных сечений ГВ, а также особенностей пространственного размещения ГВ в микрообъемах отливки из ВЧШГ.

*Методика проведения исследования.* Количественные характеристики ГВ исследовали в бескарбидной зоне на удалении 50 мм от рабочей поверхности массивного вала с диаметром бочки 450 и длиной 3360 мм. Чугун содержал (в %) 3,25 С; 1,20 Si; 0,40 Mn; 3,47 Ni; 0,40 P; 0,024 S; 0,07 Mg; 0,03 Se. **Общий объем исследованного металла** имел форму цилиндра с диаметром 500 и высотой 150 мм. При этом было выполнено 40 сошлифованных образцов чугуна, в результате чего подвергнуто прецизионному компьютерному анализу около 300 сечений 19 ГВ, расположенных на разном удалении от исходного сечения шлифа. Количество последовательных сечений – сошлифованных отдельных ГВ достигало 26-38.

Схема регистрации последовательных сечений 19-ти графитных включений, характеризующая их исходное состояние в начальных стадиях при последовательных сошлифовываниях (ГВ № 1-5, 7-10), появление (ГВ № 6, 11-19), исчезновение (ГВ № 1-11, 14, 15) или конечное состояние (ГВ № 12, 13, 16-19) после завершающего сошлифовывания, приведена на рис. 1.

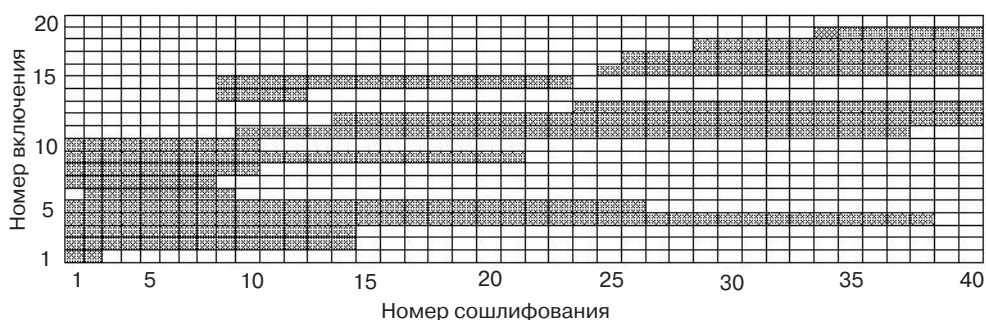


Рис. 1. Регистрация ГВ в последовательных сечениях микрообъема чугуна в процессе 40 сошлифовываний

В качестве последовательных сечений исследуемых микрообъемов чугуна использовали оцифрованные микрофотографии структуры с включениями графита после сошлифовывания очередного слоя толщиной  $3,6 \pm 0,15$  мкм (рис. 2, а-е). Для точного совмещения изображений структуры на матрицу в области изучаемых объектов наносили 4-5 отпечатков алмазного индентора микротвердомера ПМТ-3. Одновременно сошлифовывали исследуемый объект и часть пирамидального углубления отпечатка алмазной пирамиды. Вследствие того, что очертания исследуемых объектов в каждом слое разные, а форма сечения отпечатка четырехгранной пирамиды независимо от его размеров не изменяется, точки пересечения диагоналей квадратных отпечатков использовали в качестве реперных в процессе стереологической реконструкции. По этим точкам осуществляли относительную угловую и линейно-плоскостную ориентацию изображений последовательных сечений графита.

Кроме относительной ориентации при совмещении изображений последовательных сечений объектов микроструктуры в горизонтальной плоскости разницу размеров диагоналей отпечатков индентора в смежных слоях чугуна использовали при определении шага сошлифовывания [14-15] — фактической толщины сошлифованного слоя (в мкм). В процессе сошлифовывания исследуемых объемов металла, когда суммарная толщина удаленного слоя достигала глубины проникновения

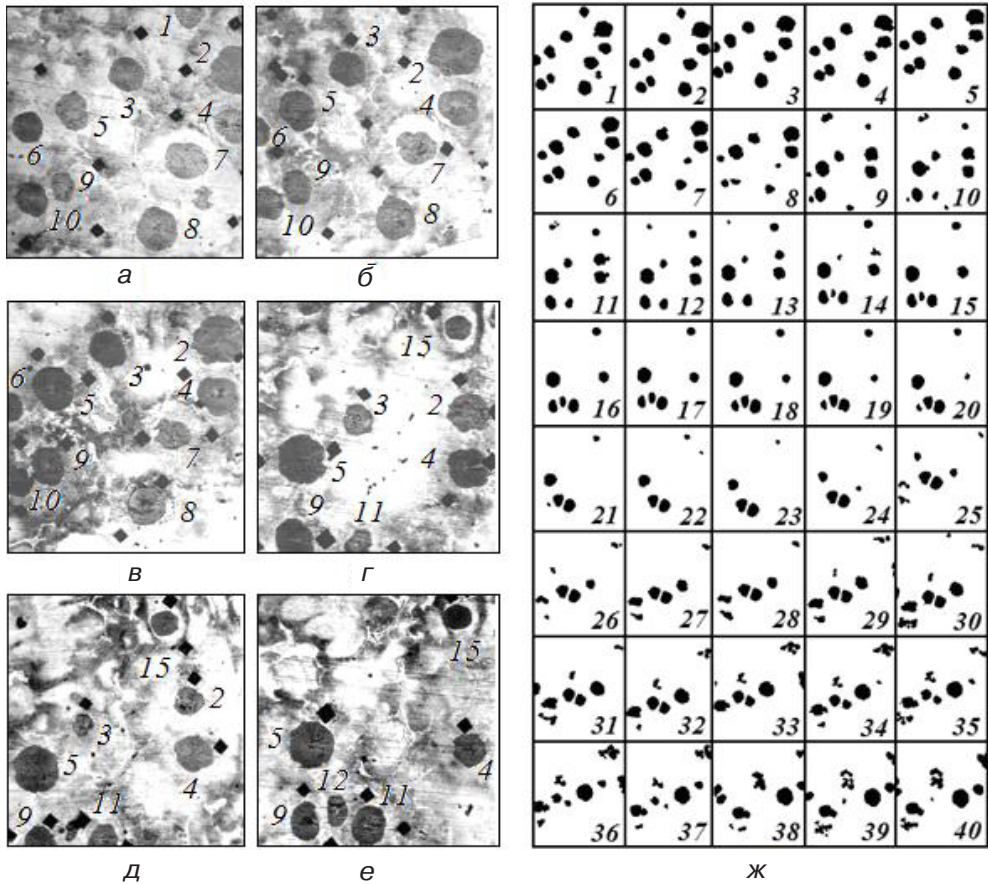


Рис. 2. Выборочные фотографии микроструктуры ГВ № 1-12, 16 в сечениях (а-е) после сошлифований, мкр: 1 (а), 3 (б), 5 (в), 11 (г), 13 (д), 16 (е); ж – структура ГВ после сошлифований 1-40; не травлено

алмазного индентора в материал образца, реперные точки возобновляли нанесением дублирующих наколов индентором. Эту операцию выполняли до полного сошлифовывания предшествующих отпечатков, что позволило сохранить исходную угловую и линейно-плоскостную ориентацию при 40 сошлифовываниях слоев металла. Суммарная толщина сошлифованного слоя в несколько раз превышала максимальный диаметр сечения единичного графитного включения (рис. 2, ж).

Для количественной оценки различных индивидуальных и обобщенных характеристик ГВ в исследуемом микрообъеме чугуна использовали компьютерную программу *ImageJ (Freeware)* – бесплатный инструмент для обработки цифровых изображений [16-17]. Программа может работать либо в виде онлайн-апплета, либо в виде загружаемого приложения на любом компьютере с *Java 1.4* или более поздней версией виртуальной машины.

Для загрузки в программу изображений исследуемых объектов использовали микрофотографии (рис. 3, а-г) нетравленых шлифов, предварительно переведенные из серых полутонов в черно-белые изображения. Эти изображения последовательно загружали в программу *ImageJ*, преобразовывали в 8-битовый формат и бинаризовали. В результате получали контурные копии исходных изображений ГВ, на которые внутри контура программно записывался номер, которому после выполнения вычислений соответствовал комплекс искомым индивидуальных характеристик (рис. 3, а'-г').

Площадь (*Area*) сечений ГВ в программе подсчитывали в квадратных пикселях. Можно изменить параметры измерения, например, на квадратные миллиметры. Выполняется также подсчет (*Count*) анализируемых частиц, их периметр (*Perimeter*), ISSN 0235-5884. Процессы литья. 2012 № 4 (94)



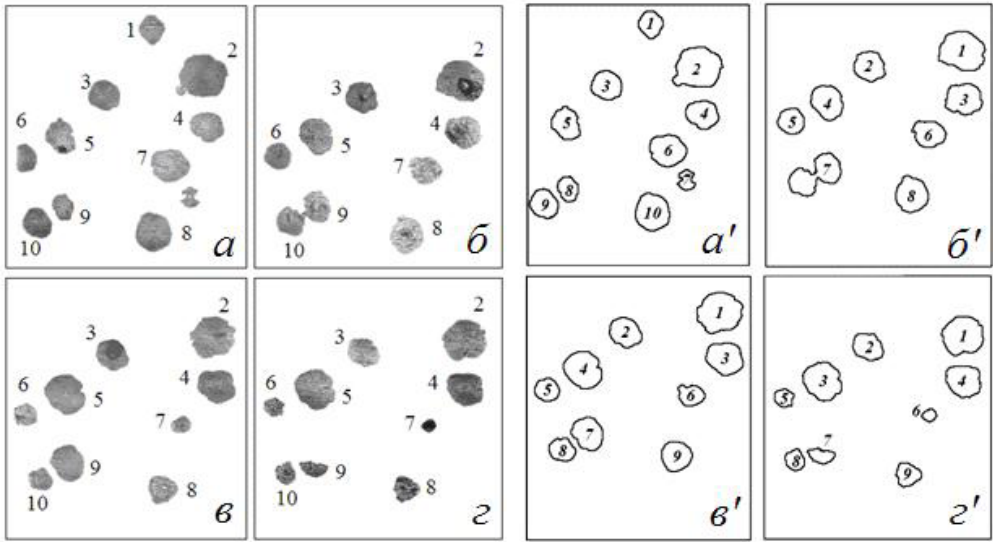


Рис. 3. Выборочные фотографии микроструктуры ГВ № 1-10 в сечениях (а-г) после сошлифований 1 (а), 5 (б), 6 (в), 8 (г); а'-г' – контурные изображения этих ГВ с автоматической нумерацией в результате программной обработки, не травлено

средний размер (*Average size*) и плотность (*Solidity*), которые характеризуют отношение площади выделенной области к выпуклой области.

Для описания одной из основных характеристик формы ГВ в программе использовали понятие округлости, которое может быть реализовано несколькими методами. Первый метод оценки фактора формы ГВ – округлости (*Circularity*) предусматривает расчет по формуле

$$F_{\phi} = \frac{4\pi S}{P^2}, \tag{1}$$

где  $S$  – площадь частицы;  $P$  – периметр частицы; значение  $F_{\phi} = 1,0$  указывает на то, что контуром сечения ГВ является идеальная окружность. Чем ближе значение округлости к 0, тем более вытянутым или деформированным будет контур сечения ГВ.

Второй метод оценки округлости (*Round*) основан на выражении

$$F_R = \frac{4S}{\pi l_{\max}^2}, \tag{2}$$

где  $l_{\max}$  – большая ось частицы.

Легко показать, что оба метода обеспечивают идентичные результаты для частиц, имеющих форму правильного круга. Для частиц, существенно отклоняющихся по форме от круга, используется характеристика соотношения сторон (*AR*), которая показывает величину отношения основной оси к малой.

Фактор формы  $F_{\phi}$  отдельных графитных включений и их группировок в полях оцифрованных микрофотографий, выполненных при постоянном увеличении, оценивали в полуавтоматическом режиме по формуле (1). Методика и основные стадии определения количественных характеристик ГВ в структуре высокопрочного чугуна с использованием программы *ImageJ* подробно рассмотрены в работе [10].

В качестве примера в табл. 1 приведены результаты определения основных количественных характеристик ГВ № 5, полученные на основании анализа микро-

**Таблица 1. Количественные характеристики ГВ № 5 (фрагмент)**

Номер сошлифования	Номер в контуре	Площадь в пикселях	Периметр в пикселях	Фактор формы	Округлость	Соотношение	Плотность
1	5	762	107	0,83	0,78	1,28	0,93
2	5	837	110	0,87	0,79	1,27	0,95
3	3	924	117	0,85	0,80	1,26	0,95
4	4	928	117	0,85	0,81	1,24	0,94
5	4	1092	125	0,87	0,86	1,17	0,95
23	2	655	98	0,86	0,93	1,08	0,94
24	2	536	88	0,87	0,86	1,17	0,94
25	2	331	72	0,81	0,75	1,34	0,92
26	2	170	59	0,62	0,59	1,68	0,81
Среднее	1011,88	119,64	0,85	0,85	1,18	0,94	–
Среднее квадратное отклонение	309,00	20,70	0,05	0,07	0,12	0,03	–

структур графита в процессе 26-ти сошлифований (см. рис. 1). Как следует из табл. 1, средние значения фактора формы и округлости ГВ № 5 совершенно одинаковы, хотя индивидуальные характеристики в отдельных сечениях заметно отличаются. Результаты обобщенного анализа этих характеристик для 300 сечений всех 19-ти исследованных ГВ в процессе 40 сошлифований также показывают практически полное совпадение этих характеристик (табл. 2).

**Таблица 2. Усредненные результаты по 300 сечениям ГВ**

Параметр	Соотношение осей	Фактор формы	Округлость	Периметр, пиксели	Площадь, пиксели	Плотность
Среднее значение	1,3474	0,7726	0,7754	101,8310	672,090	0,9002
Стандартное отклонение	0,323	0,154093	0,143442	37,23072	391,06	0,073129

На рис. 4, а показан характер изменения количества ГВ в полях зрения оптического микроскопа (x135) в 40 последовательных сечениях исследуемого микрообъема чугуна. На удалении 72-90 мкм от начальной плоскости (20-25 сошлифований) количество ГВ снижается с 10 до 4, а затем вновь возрастает до 8-9 в поле зрения микроскопа. Изменение значений средней площади отдельных включений (рис. 4, б) в этом же интервале сошлифований имеет аналогичный характер, но величина достоверности аппроксимации  $R^2$  полиномиальной моделью второй степени этой зависимости несколько больше.

Среднее значение фактора формы ГВ в исследованном объеме по мере сошлифовывания снижается при одновременном возрастании стандартного отклонения (рис. 4, в). Величина достоверности аппроксимации для этой зависимости наиболее высокая среди трех зависимостей ( $R^2 = 0,82$ ), представленных на рис. 4.

На рис. 5, а показано изменение площади отдельных сечений шести ГВ по мере сошлифований. Все сечения для этих ГВ проходят через максимум площади, то есть через сечение с максимальным («экваториальным») диаметром. О величине ГВ свидетельствует также количество сечений, которое проходит через каждое из них. Крупные включения рассекаются большее число раз, чем мелкие при одинаковом

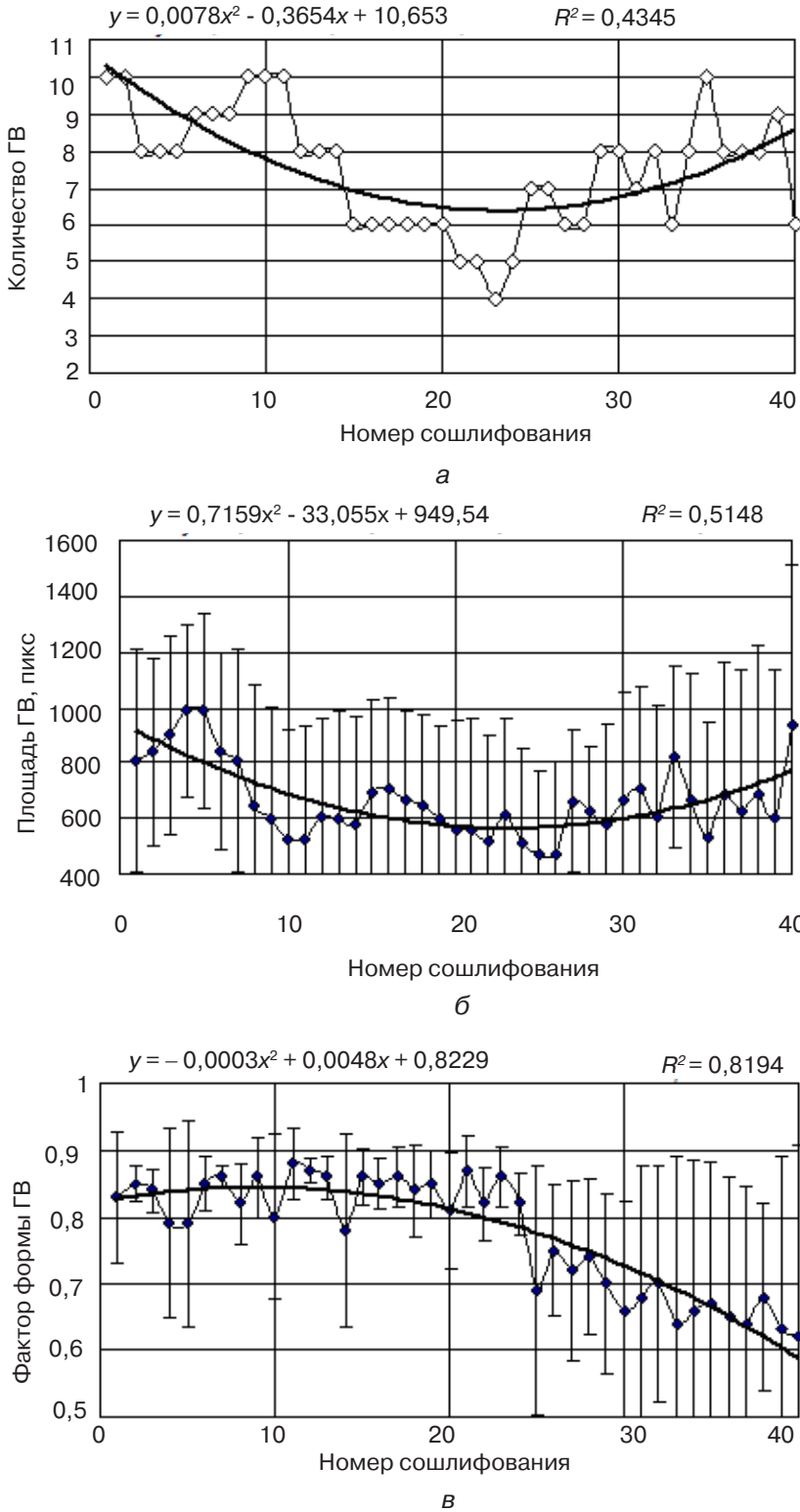


Рис. 4. Изменение количества (а), средней площади (б) и среднего фактора формы (в) ГВ в сечениях микрообъема чугуна после 1-40 сошлифований

для всех ГВ шаге сошлифования. Это дает основания утверждать, что ГВ являются полиразмерными или полиглобулярными в микрообъеме металла, затвердевающего в одинаковых условиях.

Из рис. 5, б видно, что независимо от площади (диаметра) сечения фактор формы большинства представленных на рисунке ГВ изменяется в относительно узких пределах (0,8-0,9), что свидетельствует об их компактности, но не шаровидности. Эти ГВ имеют «шероховатость» поверхности, что проявляется на локальных искажениях контура сечения. Характерно, что резкое снижение фактора компактности наблюдается в последних сечениях ГВ № 3, 5 и 11, что также связано с большой их деформированностью вследствие указанной шероховатости. Это подтверждается практически полной независимостью  $F_{\phi}$  от площади сечения ( $R^2 = 0,057$ ) для линейной модели (рис. 5, в).

*Оценка воспроизводимости результатов.* Установленные выше особенности распределения ГВ в объеме чугуна, неоднородности их размерных и морфологических характеристик целесообразно дополнить проверкой воспроизводимости оценки фактора формы в смежных слоях металла. Суть такой проверки для рассматриваемой задачи сводится к следующему. В одинаковых условиях проводится несколько серий параллельных измерений или опытов. Для каждой серии вычисляют среднеарифметическое значение измеряемой величины  $x$  и дисперсию  $\sigma^2$ . Обычно минимальное число серий измерений (испытаний) составляет  $m = 2 \dots 4$ , а количество измерений в каждой серии –  $n = 3 \dots 4$ . Для повышения надежности выводов количество серий и измерений в них может быть увеличено [18].

Для оценки воспроизводимости рассчитывали критерий равноточности Кохрена, который с заданной доверительной вероятностью позволяет определить, принадлежит ли выборка с максимальной дисперсией к той же самой генеральной совокупности, что и остальные выборки с меньшими значениями дисперсий. Расчетное значение критерия Кохрена вычисляли по формуле

$$G_p = \frac{\sigma^2 \max}{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2}, \quad (3)$$

где в числителе – максимальная дисперсия из числа рассматриваемых параллельных серий  $m$ ; в знаменателе – сумма всех дисперсий, включая и максимальную; опыты (измерения) считают воспроизводимыми при условии, что расчетное значение критерия меньше или равно табличному  $G_p \leq G_t$ . Табличное значение критерия Кохрена принимают в зависимости от доверительной вероятности  $P_{\text{дов}}$  или уровня значимости  $\alpha$ ,  $m$  и числа степеней свободы  $q = n-1$ .

В табл. 3 приведены средние значения и построчные дисперсии оценок фактора формы ГВ в сечениях микрообъема чугуна в процессе 40 сошлифований. Экспериментальные данные сгруппированы в 4 серии через каждые 10 сошлифований. Первая серия включает результаты оценок фактора формы ГВ в процессе 1-10 сошлифований, вторая отражает результаты по 11-20 сошлифованиям, третья и четвертая, соответственно, по 21-30 и 31-40.

**Таблица 3. Исходные данные и предварительные расчеты для оценки воспроизводимости**

Групповая серия	Средние значения $F_{\phi}$ графитных включений в плоскости сошлифований										Среднее	Дисперсия
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0,83	0,85	0,84	0,79	0,79	0,85	0,86	0,82	0,86	0,80	0,83	0,0008
2	0,88	0,87	0,86	0,78	0,86	0,85	0,86	0,84	0,85	0,81	0,85	0,0009
3	0,87	0,82	0,86	0,82	0,69	0,75	0,72	0,74	0,70	0,66	0,76	0,0055
4	0,68	0,70	0,64	0,66	0,67	0,65	0,64	0,68	0,63	0,62	0,66	0,0006



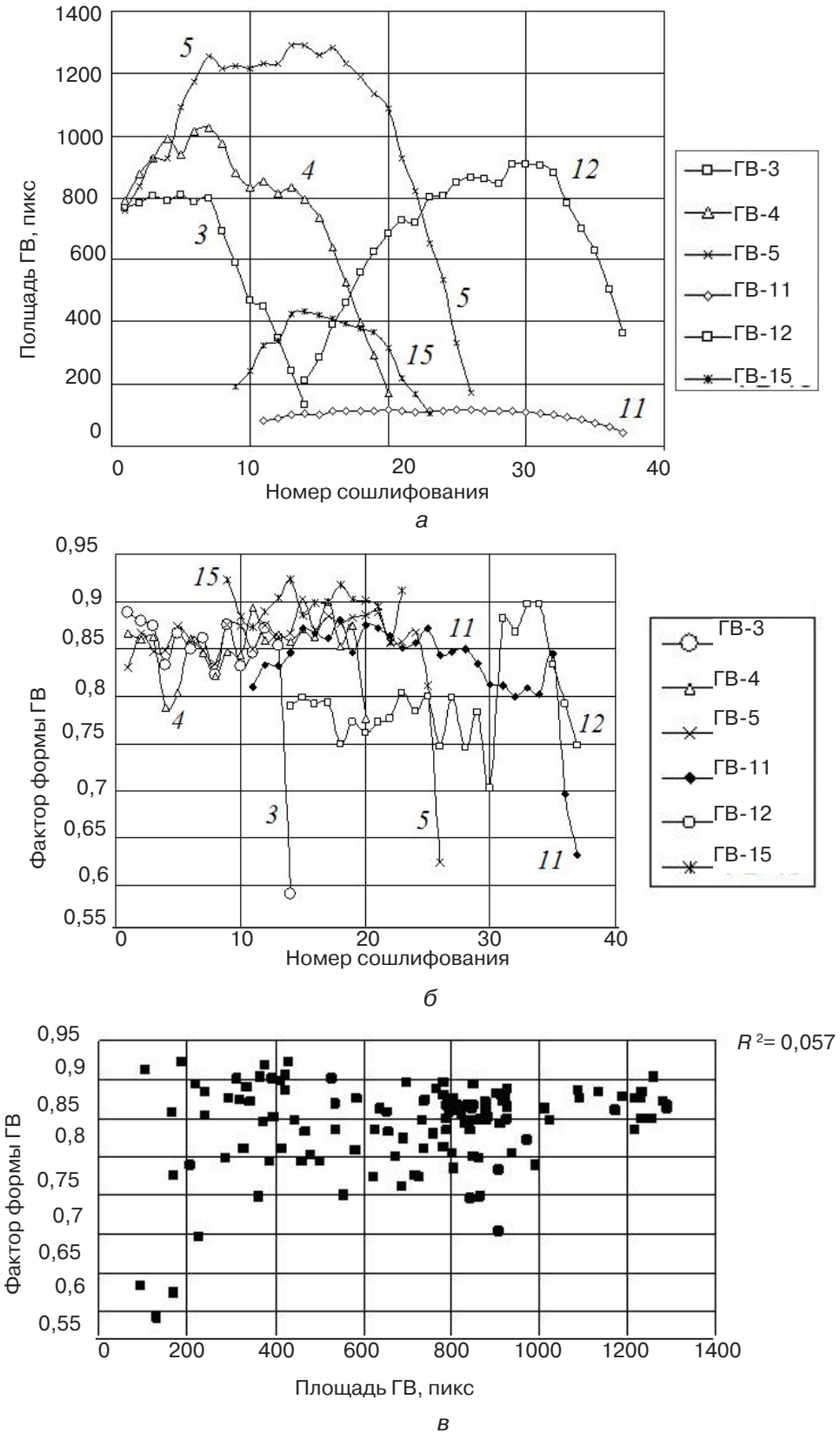


Рис. 5. Изменение площади (а) и фактора формы (б) ГВ № 3-5, 11, 12, 15 в сечениях микрообъема чугуна после 1-40 сошлифований; оценка корреляционной связи между фактором формы и площадью отдельных сечений ГВ (в)

Расчеты, выполненные для четырех серий, показали, что дисперсия в третьей серии слишком велика, чтобы считать результаты оценок фактора формы ГВ воспроизводимыми даже при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ :

$$G_p = 0,0055 / (0,0055 + 0,0008 + 0,0009 + 0,0006) = 0,71;$$

для  $m = 4; q = 9; \alpha = 0,05; G_T = 0,5017; G_p > G_T; 0,7060 > 0,5017;$

для  $m = 4; q = 9; \alpha = 0,01; G_T = 0,5702; G_p > G_T; 0,7060 > 0,5702.$

Аналогичные расчеты, выполненные для 1, 2 и 4-й серий (без третьей), дали основание утверждать воспроизводимость результатов оценки фактора формы ГВ в микрообъемах чугуна без «аномального» слоя, соответствующего областям 21-30 сошлифований:

$$G_p = 0,0009 / (0,0009 + 0,0008 + 0,0006) = 0,39;$$

для  $m = 3; q = 9; \alpha = 0,05; G_T = 0,6167; G_p < G_T; 0,39 < 0,6167;$

для  $m = 3; q = 9; \alpha = 0,01; G_T = 0,6912; G_p < G_T; 0,39 < 0,6912.$

*Стереологическая реконструкция ГВ.* В работе [14] приведены результаты пространственной реконструкции расположения ГВ в исследованном микрообъеме чугуна. Реконструкция осуществлялась по контурным изогипсограммам ГВ, выполненным в ручном варианте в «до компьютерный» период в литейном металловедении.

На рис. 6, а показана детализированная изогипсограмма группы компактных включений графита в микрообъеме массивной отливки, а на рис. 6, б — стереологическая реконструкция этой же группы включений, выполненная на основе изогипсограммы. В работе были отмечены закономерности дальнейшей координации формы и распределения включений графита. Все включения графита в исследованном объеме чугуна расположены на поверхности четырех попарно концентрических условных сфер. Радиусы внутренних сфер составляют 80-100 мкм. В зонах взаимного пересечения внешних сфер наблюдается подстраивание размеров и формы V-VIII включений, обеспечивающее их принадлежность одновременно к обеим сферам. Включения XX и IX также формируются в соответствии с тенденцией к квазисферическому пространственному размещению на поверхности малых сфер. Крупные включения графита распределяются на поверхности внешних сфер в соответствии с установленной закономерностью. Так, включение III размещается напротив впадины между включениями XI и XII, включение VI — напротив зоны контакта включений XIII и XIV и т. д.

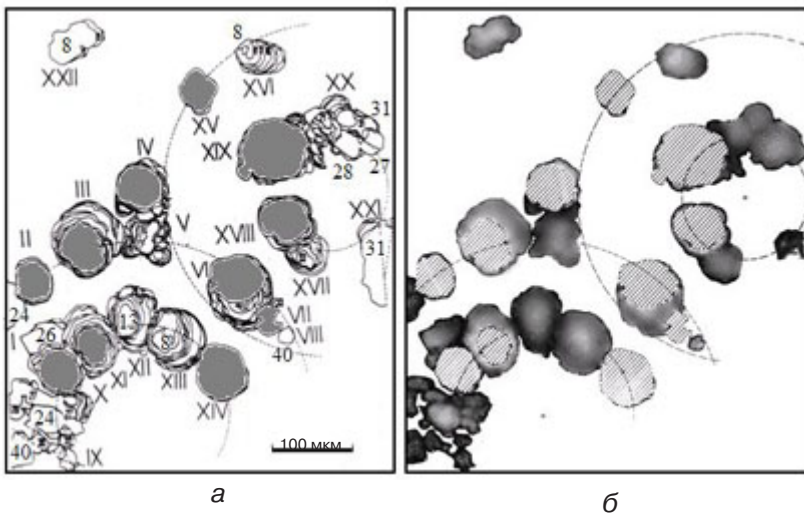


Рис. 6. Изогипсограмма (а) и стереологическая реконструкция (б) группы ГВ в микрообъеме ВЧ; арабскими цифрами обозначены номера сошлифований, римскими – номера ГВ

В работе [14] пришли к выводу, что пространственное распределение графита в чугунах разного химического состава, подвергнутых сфероидизирующему моди-

фицированию, имеет ряд общих закономерностей. При формировании смежных ГВ проявляется ближнедействующее влияние – эффект взаимного экранирования, фронты роста соседних включений не смыкаются между собой, а, как правило, разделены слоем матричной жидкости. Распределение ГВ в микрообъемах чугуна в основном не является случайным, беспорядочным, а происходит образование квазисферических пространственных концентрических ячеек нередко с планетарным размещением мелких включений вокруг крупных. При этом наблюдается бесконтактное подстраивание формы включений под рельеф окружающих их частиц.

Отсутствие общей теории жидкого состояния металлических систем железо-углерод не позволяет однозначно толковать механизм формирования графитных включений и их распределение в объеме металла в виде пространственных квазисферических ячеек. Установленные закономерности применительно к чугунам, подвергнутым сфероидизирующей обработке, можно объяснить с позиций классической теории коллоидно-дисперсных систем [19, 20] и электрохимической теории металлических жидкостей [21, 22]. Ближне- и дальнедействующая координация формы, размеров и распределения графитных включений дает основание допустить в качестве рабочей гипотезы наличие остаточного заряда на поверхности элементарных поликристаллических блоков графита и образовавшихся из них графитных структур разной степени компактности. Источником такого заряда может быть не полностью нейтрализованный в результате сфероидизирующей обработки потенциал двойного электрического слоя на межфазной поверхности графит-расплав. Опыт компьютерного моделирования процессов формирования ГВ в высокопрочном чугуне на основе DLA моделей (агрегация ограниченной диффузией) Виттена-Сандера показал возможность воспроизведения основных закономерностей строения и роста компактных ГВ [11-13].

### Выводы

- Некоммерческая компьютерная программа *ImageJ* характеризуется универсальностью и высокой точностью оценки количественных характеристик как единичных включений графита, так и для их группировок в микрообъемах высокопрочного чугуна.
- Анализ представительной выборки из 300 последовательных сечений группы графитных включений, полученных в результате послойного сошлифовывания микрообъема высокопрочного чугуна, показал их размерную неоднородность с выраженной шероховатостью и деформированностью очертаний.
- Недостаточная воспроизводимость количественных оценок сечений графитных включений в смежных микрообъемах чугуна обусловлена как размерной неоднородностью графитных включений, так и неравномерностью их распределения с тенденцией к формированию пространственных квазисферических структур.



### Список литературы

1. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
2. Чернявский К. С. Стереология в металловедении. – М.: Металлургия, 1977. – 280 с.
3. Соценко О. В. Оценка компактности включений графита в высокопрочном чугуне // Литейн. пр-во. – 1982. – № 6. – С. 5-7.
4. Литовка В. И. Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. – Киев: Наук. думка, 1987. – 206 с.
5. Волчок И. П. Сопротивление разрушению стали и чугуна. – М.: Металлургия, 1993. – 192 с.
6. Макаренко К. В. Идентификация графитных включений в чугунах // Литейн. пр-во. – 2009. – № 4. – С. 2-4.
7. Александров Н. Н. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом – перспективный конструкционный материал XXI века // Материалы в арматуростроении. – 2008. – № 2 (53). – С. 72-74.

8. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2005. – 43 с.
9. Бунина Ю. К., Лузырьков-Уваров О. В., Ермолин И. Г. Оценка формы графита в массивных отливках из высокопрочного чугуна // Литейн. пр-во. – 1977. – № 5. – С. 25.
10. Соценко О. В., Куркострига И. А., Посыпайко И. Ю. Компьютерная оценка формы графита в высокопрочном чугуне // Процессы литья. – 2012. – № 6. – С. 33-40.
11. Соценко О. В. О фрактальной структуре шаровидного графита в высокопрочном чугуне // Теория и практика металлургии. – 2006. – № 4-5. – С. 133-135.
12. Соценко О. В. Компьютерная DLA-модель формирования шаровидного графита в высокопрочном чугуне // Металл и литье Украины. – 2009. – № 9. – С. 3-9.
13. Соценко О. В. Фрактальная структура кулястого графіту у високоміцному чавуні (огляд) // Металознавство та обробка металів. – 2009. - № 3. – С. 18-24.
14. Соценко О. В. Пространственное распределение графита в отливках из ВЧШГ // Литейн. пр-во. – 1983. – № 11. – С. 4-6.
15. Соценко О. В. Компьютерная 3D-реконструкция формы включений графита в высокопрочном чугуне // Процессы литья. – 2011. – № 4. – С. 40-46.
16. Image J. Image Processing and Analysis in Java. – Режим доступа: <http://rsb.info.nih.gov/ij> - Загл. с экрана.
17. ImageJ 1.43m. Processing and Analysis in Java. - Режим доступа: [http://portablew07.ucoz.ru/news/imagej\\_143m/2009-12-09-1637](http://portablew07.ucoz.ru/news/imagej_143m/2009-12-09-1637) - Загл. с экрана.
18. Грушко И. М., Сиденко В. М. Основы научных исследований. – Харьков: Вища школа, 1983. – 224 с.
19. Наука о коллоидах. Необратимые системы / Под ред. Г. Р. Кройта. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955. – Т. 1. – 538 с.
20. Воющий С. С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1975. – 517 с.
21. Ершов Г. С, Черняков В. А. Строение и свойства жидких и твердых металлов. – М: Металлургия, 1978. – 248 с.
22. Соколов В. М. Об электрокинетических свойствах графита // Литейн. пр-во. – 1959. – № 10. – С. 40-42.

Поступила 15.03.2012

\*\*\*\*\*

### ***Уважаемые подписчики!***

*Подписаться на журнал «Процессы литья»  
через Интернет  
можно на сайте ГП «Пресса» [www.presa.ua](http://www.presa.ua)  
с помощью сервиса «Подписка On-line».*

\*\*\*\*\*