
ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 621.74.002:669.131.7

О. В. Соценко, И. А. Куркострига, И. Ю. Посыпайко

Национальная металлургическая академия Украины, Днепрпетровск

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОЦЕНКА ФОРМЫ ГРАФИТА В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ

Разработана методика индивидуальной и групповой оценки фактора формы графита в высокопрочном чугуна на основе некоммерческой программы ImageJ. Установлены графические и аналитические зависимости для перехода от значений фактора формы графита к соответствующим эталонным структурам, и наоборот, – от эталонных структур к фактору формы.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, шаровидный графит, фактор формы, компьютерная оценка.

Розроблена методика індивідуальної та групової оцінки фактора форми графіту у високоміцному чавуні на основі некомерційної програми ImageJ. Встановлено графічні та аналітичні залежності для переходу від значень фактора форми графіту до відповідних еталонних структур, і навпаки, – від еталонних структур до фактора форми.

Ключові слова: високоміцний чавун, кулястий графіт, фактор форми, комп'ютерна оцінка.

The technique of individual and group assessment form factor of graphite in ductile iron, based on a non-profit program ImageJ. Established graphic and analytic expressions for the transition from the values of the form factor of graphite to the corresponding reference structures and vice versa - from the reference structures to the form factor.

Keywords: ductile iron, nodular graphite, form factor, estimation of compater.

Постановка проблемы и анализ последних публикаций. Форма, размеры, количество и характер распределения графитовых включений (ГВ) в высокопрочном чугуна 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.

При классификации ГВ в соответствии с ГОСТом 3443-87 исходят из сравнительной оценки реальных микроструктур с эталонными изображениями. Такой метод требует от исследователя определенных навыков и высокой квалификации при идентификации многообразных форм ГВ в реальной структуре высокопрочного чугуна и весьма ограниченном их количестве на эталонных микроструктурах. Особенно высокий риск субъективности оценок при классификации ГВ в переходных структурах между вермикулярным и шаровидным графитом.

В прикладном литейном металлостроении наибольшее распространение нашел

подход к оценке компактности ГВ с использованием безразмерных факторов или коэффициентов формы. Наиболее простой метод предложил С. А. Салтыков [1], основой которого является безразмерный коэффициент формы K_{ϕ} . Он используется для оценки ГВ в соответствии с формулой

$$K_{\phi} = 3,545\sqrt{S/P}, \quad (1)$$

где S – площадь включения; P – периметр включения.

Исходя из простейших преобразований, очевидно, что для включений идеальной сферической формы $K_{\phi} = 1$.

О. В. Соценко [2] предложил помимо безразмерного фактора формы включений использовать фактор их компактности: $\Phi_k = S/S_0$, где S – площадь включения и S_0 – площадь круга, описанного вокруг включения. На базе этого метода он разработал эталонную шкалу, в которой представлены разнообразные графические модификации форм ГВ, наблюдаемые в высокопрочных чугунах. Аналогичную эталонную шкалу для идентификации формы ГВ и оценки их влияния на физико-механические свойства чугунов разработал В. И. Литовка [3]. И. П. Волчок [4] применил индекс графита, который позволяет определить одновременно количество и форму графита. Индекс графита по его методике рассчитывают как отношение суммы максимальных размеров ГВ к длине произвольной секущей, пересекающей эти включения. Эти методы не снижают субъективности при классификации ГВ и требуют высокой квалификации исследователя, так как основаны на визуальном сопоставлении многообразных реальных структур ГВ с большим, но все же ограниченным набором эталонных микроструктур или их графических эквивалентов.

Все рассмотренные методы довольно трудоемкие 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 широкое распространение получают различные аналитические компьютеризированные комплексы [5], предназначенные для металлографических исследований. Задача идентификации включений на изображениях микроструктуры решается на основе программного обеспечения (ПО), при разработке которого используют разные подходы и алгоритмы расчета. Количество изучаемых параметров, относящихся к описанию ГВ в структуре материала, может возрастать в несколько раз. Например, программа *Macros 111 (Carl Zeiss, Vienna, Austria)* для анализа оценки сферичности ГВ в ЧШГ использует более 10-ти различных параметров.

Программное обеспечение иностранных аналитических комплексов часто несовместимо с ГОСТом 3443-87, что создает определенные трудности в их использовании на отечественных предприятиях. Алгоритмы большинства программ ориентированы на идентификацию только сферических ГВ в чугуне, но не эффективны при количественной оценке структуры чугунов с вермикулярным и смешанным типом графита [5].

Н. Н. Александров считает [6], что одной из определяющих характеристик структуры высокопрочного чугуна является высокое значение коэффициента формы графита K_{ϕ} , принятого в практике как мера степени приближения графитных включений к идеальной сфероидальной форме. Эта характеристика в полуавтоматическом режиме определяется различными компьютерными программами или специализированными анализаторами микроструктуры. В частности, на количественном анализаторе «Квантимет-720» K_{ϕ} рассчитывается по соотношению между площадью отдельного включения графита и периметром условного круга с равновеликой включением площадью. О чувствительности метода свидетельствуют результаты исследования влияния толщины стенки отливки на форму графита. Показано, что

с увеличением толщины стенки отливки из высокопрочного чугуна K_{ϕ} снижается от 0,82 до 0,55.

В работе [5] дан критический 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 анализа изображений, который в последние годы все больше привлекает внимание материаловедов и литейщиков [7-9]. Результаты метода, по утверждению автора, могут быть использованы для определения взаимосвязи структуры и свойств графитизированных чугунов.

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, как одной из определяющих характеристик эффективности всего технологического процесса производства отливок из ЧШГ.

Цель работы – разработка методики компьютерного анализа графитных включений в высокопрочном чугуне с оценкой количественной статистически значимой взаимосвязи коэффициента формы графита с эталонными изображениями графитных структур по ГОСТу 3443-87.

Методика проведения исследования. Для количественной оценки различных индивидуальных и обобщенных характеристик графитных включений в эталонных изображениях графитных структур по ГОСТу 3443-87 использовали компьютерную программу *ImageJ (Freeware)*. Программа *ImageJ* – бесплатный инструмент для обработки цифровых изображений [10, 11]. Она 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.

Программа может отображать, редактировать, анализировать, обрабатывать, сохранять и распечатывать 8-, 16- и 32-битные изображения, читать многие форматы изображений, включая *TIFF, GIF, JPEG, BMP, PNG, PGM, DICOM, FITS, RAW* и др. Она является многопоточной и одновременно может выполнять такие операции, как чтение файла изображения параллельно с другими операциями обработки.

Для загрузки в программу изображений исследуемых объектов использовали микрофотографии-эталонные, предварительно переведенные из серых полутонов в одноцветные черно-белые изображения, которые последовательно загружали в программу *ImageJ*, преобразовывали в 8-битовый формат, бинаризировали и в результате получали контурную копию исходного изображения.

Фактор формы F_{ϕ} отдельных графитных включений и их группировок в полях оцифрованных микрофотографий, выполненных при постоянном увеличении, оценивали в полуавтоматическом режиме по формуле

$$F_{\phi} = 4\pi S/P^2, \quad (2)$$

где S – площадь графитного включения; P – периметр включения.

Результаты исследования и их обсуждение. Эталонные изображения микроструктуры графитных включений ШГф1-ШГф5 приведены на рис. 1 (верхний ряд).

Скриншоты последовательных стадий обработки электронных изображений структуры в программе *ImageJ* представлены на рис. 2.

Основные стадии обработки микроструктуры и соответствующие им команды в программе *ImageJ* выполняли в следующей последовательности:

- открывали файл микроструктуры для преобразований и анализа: *File => Open...* (рис. 2, а);
- конвертировали изображение в 8-битовый формат: *Image => Type => 8-bit* (рис. 2, б);

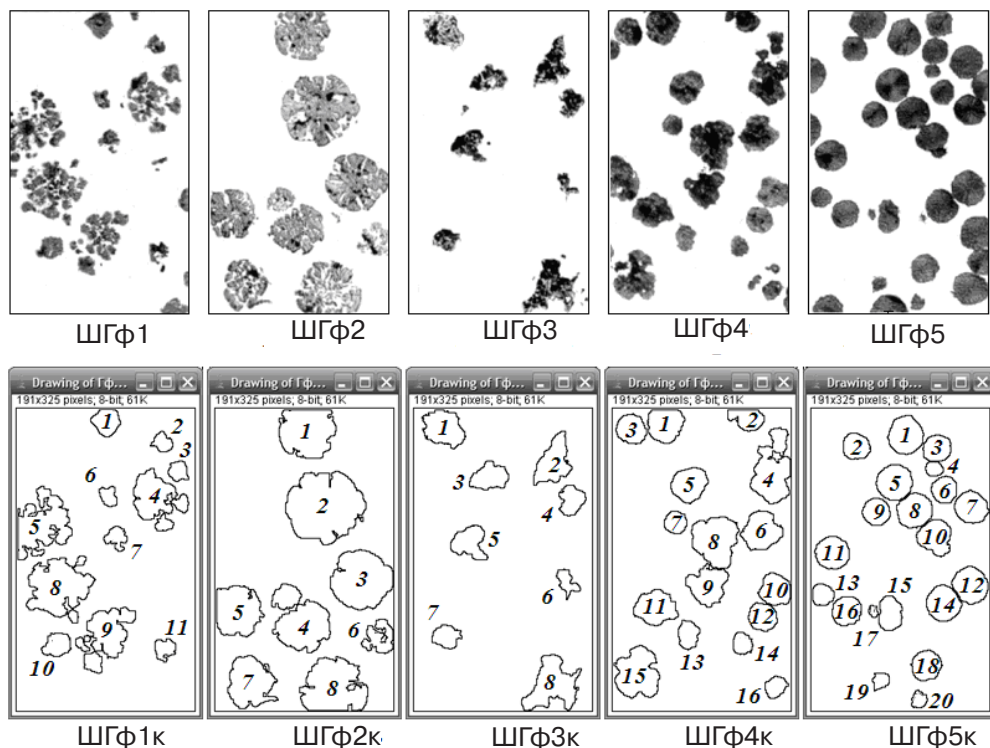


Рис. 1. Эталонные изображения микроструктуры включений шаровидного графита ШГф1-ШГф5 (верхний ряд) и их контурные изображения ШГф1к-ШГф5к (нижний ряд)

– бинаризовали изображение: *Process* => *Binary* => *Make Binary* (рис. 2, в, г);
 – переходили в меню анализа частиц графита: *Analyze* => *Analyze Particles* =>... (рис. 2, д).

– в открывшейся вкладке (рис. 2, е) задавали параметры для анализа: ограничение на минимальную площадь анализируемых частиц (*Size*), интервал учитываемых значений фактора формы (*Circularity*) и трансформирование изображения в контурное (*Outlines*);

– после подтверждения заданных параметров микроструктуры графита на дисплей выводились (рис. 1, нижний ряд) контурные изображения исследуемых включений в эталонах ШГф1-ШГф5 с нумерацией для последующей идентификации их с индивидуальными количественными оценками в результирующем файле;

– задавали параметры файла с результатами анализа (*Results*) перед их сохранением (качество изображения в формате *JPEG*, расширение файла таблицы *xls* и др.): *File* => *Options*;

– для сохранения файла результатов *Results* указывали соответствующую папку и выполняли команды: *Files* => *Save as Text*, в результате числовые значения заданного перечня характеристик микроструктуры графита автоматически заносились в таблицу;

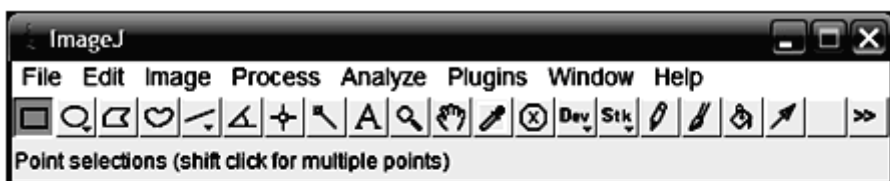
Таблица 1. Статистические оценки формы графита на эталонах по ГОСТу 3443-87

Индексы эталонов	Характеристики		
	<i>n</i>	$F_{\text{ф.ср}}$	σ^2
ШГф1	11	0,499	0,0741
ШГф 2	8	0,442	0,0225
ШГф 3	8	0,554	0,0167
ШГф4	16	0,725	0,0241
ШГф5	20	0,860	0,0026

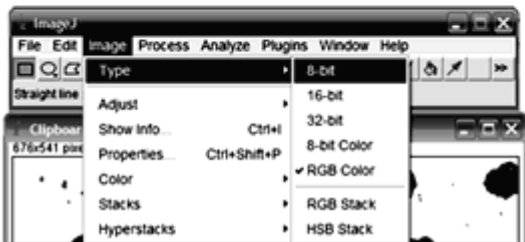
– для сохранения обобщающего файла результатов анализа (*Summary*) определяли соответствующую папку и выполняли команды: *File* => *Save As*.

Средние значения фактора формы $F_{\text{ф.ср}}$ и дисперсии σ^2 для *n* включений в структуре различных эталонов приведены в табл. 1.

Для решения вопроса о случайном или



а



б



в



г



д



е

Рис. 2. Интерфейс программы (а) и скриншоты (б-е) последовательных стадий обработки микроструктуры чугуна

неслучайном различии средних значений фактора формы F_{ϕ} графитных включений для двух серий (выборок) при неизвестных генеральных дисперсиях, то есть проверки нуль-гипотезы $H_0: F_{\phi_{x1}} = F_{\phi_{x2}}$, использовали t -отношение Стьюдента. Анализ различия средних значений $F_{\phi_{cp}}$ выполняли для серий графитных включений, представленных на смежных микрофотографиях-эталонах из ГОСТа 3443-87 (см. рис. 1, а). Проверку осуществляли при дополнительном условии равенства этих дисперсий. Такое допущение можно считать приемлемым, так как оценка коэффициента формы осуществлялась с помощью одной и той же компьютерной программы при неизменной методике оцифровки микрофотографий графита. Вычисления t -отношение выполняли по формуле [12]

$$t_p = \frac{|x_{1cp} - x_{2cp}| \sqrt{n_1 + n_2 - 2}}{\sqrt{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}}, \quad (3)$$

где σ_1^2 и σ_2^2 – выборочные дисперсии первой и второй серий определения F_{ϕ} . Критическое значение t -отношения находим при значении уровня доверительной вероятности $\beta = 0,95$ и числе степеней свободы, равном $f = n_1 + n_2 - 2$. Нуль гипотеза принималась, если $t_p < t(\beta, f)$.

Таблица 2. Проверка статистических гипотез о равенстве средних значений $F_{Фрп}$

Номера микроструктур	Проверка гипотезы H_0				Проверка гипотезы H_1				Проверка гипотезы H_2					
	$n_1 \cdot n_2$	t_p	f	$t_{0,95}$	H_0	$F_{набл}$	k_1	k_2	$F_{кр}$	H_D	t_p	k	$t_{макр}$	H_2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ШПФ1-ШПФ2	11-8	0,53	17	2,11	+	3,29	10	7	3,63	-	0,51	17	2,11	-
ШПФ2-ШПФ3	8-8	1,60	14	2,15	+	1,35	7	7	3,79	-	1,50	14	2,18	-
ШПФ3-ШПФ4	8-16	2,68	22	2,06	-	1,44	15	7	3,57	-	2,57	22	2,07	+
ШПФ4-ШПФ5	16-20	5,09	34	2,02	-	9,27	15	19	2,38	+	3,55	36	2,02	+

Расчетные t_p и табличные $t_{0,95}$ значения t -отношения для доверительной вероятности 0,95 представлены в табл 2.

В качестве примера приведем расчет t -отношения для пары микроструктур ШГФ1-ШГФ2 (табл. 2). Для этих микроструктур получены результаты $F_{Фрп1} = 0,499$, $F_{Фрп2} = 0,442$; $\sigma_1^2 = 0,0741$; $\sigma_2^2 = 0,0225$; $n_1 = 11$, $n_2 = 8$; $f = 11+8-2 = 17$; $t_p = 0,53$, $t_{0,95} = 2,11$. Так как $t_p < t_{0,95}$, то с надежностью $\beta = 0,95$ различие между средними значениями $F_{Фрп1}$ и $F_{Фрп2}$ для микроструктур ШГФ1 и ШГФ2 статистически незначимо, то есть нуль-гипотеза H_0 подтвердилась. В первой строке графы 6 (табл. 2) такой результат отмечен знаком «+». Если гипотеза о равенстве средних значений $H_0 : F_{Фрп1} = F_{Фрп2}$ отвергается, то в этой графе записывается знак «-». Подтверждение нуль-гипотезы в приведенном примере свидетельствует о том, что обе эталонные микроструктуры ШГФ1 и ШГФ2 при кажущемся визуальном различии одинаковы и на практике не могут быть использованы для статистически обоснованной дифференцированной оценки компактности графита в представленном диапазоне структур.

Аналогичный результат получен и для пары микроструктур ШГФ2-ШГФ3. Для пар микроструктур ШГФ3-ШГФ4 и ШГФ4-ШГФ5 различия средних значений фактора формы оказались статистически значимыми.

Для подтверждения надежности полученных результатов проверили гипотезу $H_0 : F_{Фрп1} = F_{Фрп2}$ при конкурирующей гипотезе $H_2 : F_{Фрп1} \neq F_{Фрп2}$ [13]. При этом для рассмотренного выше примера исходили из того, что по двум независимым малым выборкам $n_1 = 11$, $n_2 = 8$, извлеченным из нормальных генеральных совокупностей, найдены выборочные средние $F_{Фрп1} = 0,499$, $F_{Фрп2} = 0,442$ и исправленные дисперсии $\sigma_1^2 = 0,0741$, $\sigma_2^2 = 0,0225$. При доверительной вероятности $\beta = 0,95$ проверяли нулевую гипотезу о равенстве средних значений коэффициента формы при конкурирующей гипотезе, постулирующей их неравенство.

Так как выборочные дисперсии различны, предварительно проверили нулевую гипотезу о равенстве генеральных дисперсий по критерию Фишера-Снедекора. Для этого нашли отношение большей дисперсии к меньшей $F_{набл} = 0,0741/0,0225 = 3,29$. Поскольку первая дисперсия больше второй, то в качестве конкурирующей приняли гипотезу $H_D : D_1 > D_2$, где D_1 и D_2 – генеральные дисперсии. По таблице [13] для доверительной вероятности $\beta = 0,95$ и числа степеней свободы $k_1 = 11-1 = 10$ и $k_2 = 8-1 = 7$ находим критическую точку $F_{кр}(0,95; 10; 7) = 3,63$. Так как $F_{набл} < F_{кр}$, то нет оснований отвергать нулевую гипотезу о равенстве генеральных совокупностей. В графе 11 этот результат отмечен знаком «-».

Поскольку предположение о равенстве генеральных дисперсий выполняется, можно сравнивать средние значения фактора формы для рассматриваемых выборок. Расчетное значение критерия Стьюдента находим с использованием выражения [13]

$$t_p = \frac{|x_{1cp} - x_{2cp}|}{\sqrt{n_1\sigma_1^2 + n_2\sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1n_2(n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \quad (4)$$

Подставив числовые значения величин, входящих в эту формулу, получаем $t_p = 0,507$. По условию конкурирующая гипотеза имеет вид $F_{\phi x1} \neq F_{\phi x2}$. Поэтому критическая область является двусторонней. По уровню доверительной вероятности $\beta = 0,95$ и числу степеней свободы $k = 11+8-2 = 17$ находим по таблице [13] критическую точку $t_{\text{двуст. кр}}(0,95;17) = 2,11$. Так как $t_p < t_{\text{двуст. кр}}$, то нулевую гипотезу H_1 о равенстве средних значений фактора формы для эталонов ШГф1-ШГф2 принимаем, а конкурирующую H_2 отклоняем. Это подтверждает статистическую незначимость различия между ними. Такой вывод совпадает с приведенным выше, и в первой строке графы 15 (табл. 2) результат отмечен символом «-». Аналогичные расчеты выполнены и для остальных пар смежных эталонов структур графита из ГОСТа 3443-87.

Проведенный анализ статистической значимости различий между эталонными структурами графита позволяет найти регрессионно-корреляционную связь между фактором формы F_ϕ и номером эталонной структуры из ГОСТа 3443-87. Наличие графической и аналитической форм такой взаимосвязи позволяет выполнять по сути «прецизионное» компьютерное определение фактора формы реальных включений графита и с достаточно высокой точностью переводить их значения в эталонные оценки, регламентируемые ГОСТом. Такой подход является еще одним «мостом» между исследователем и практиком, решающими общую проблему повышения качества отливок из высокопрочного чугуна.

На рис. 3, а представлена зависимость номера эталонной структуры графита от фактора формы для всех 5-ти эталонов ШГф, регламентируемых ГОСТом 3443-87. Зависимость имеет достаточно высокую величину достоверности аппроксимации – 0,92. Если учесть статистическую незначимость различия факторов формы для пар эталонов ШГф1-ШГф2 и ШГф2-ШГф3, то целесообразно усреднить значения фактора формы для этих пар эталонов микроструктуры графита. На рис. 3, б показаны результаты такого усреднения – линия тренда более строго вписывается в «полукресты» среднего квадратического отклонения среднего арифметического для каждого значения фактора формы графита, и величина достоверности аппроксимации повышается до 0,98.

Выводы

- Разработана методика индивидуальной и групповой оценок фактора формы графита в высокопрочном чугуне на основе некоммерческой программы *ImageJ*. Освоение программы и практическое использование ее могут быть осуществлены в течение 1 ч любым оператором, имеющим элементарные навыки работы на ПК.
- Определены значения фактора формы графитных включений для эталонных структур ШГф1-ШГф5, регламентируемых ГОСТом 3443-87. Установлены графиче-

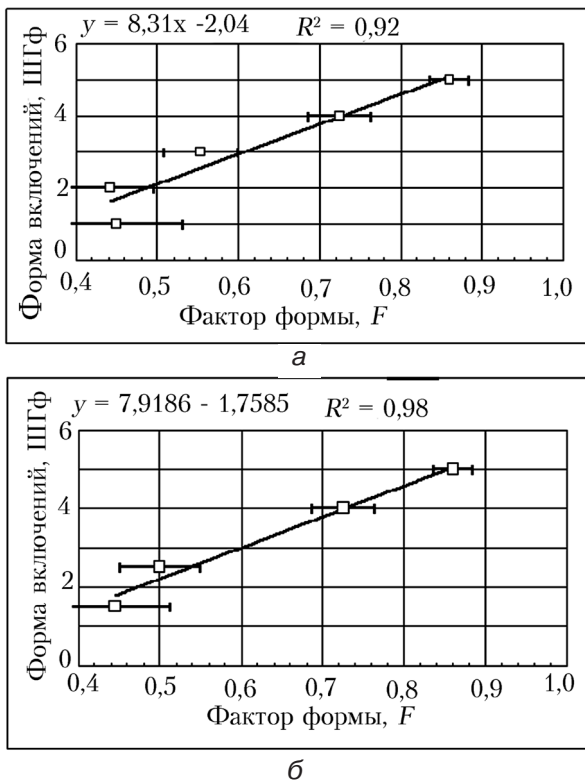


Рис. 3. Зависимость номера эталонной структуры графитных включений от фактора формы (а) и после усреднения (б) данных для пар эталонных структур с незначимым различием средних значений фактора формы

ческие и аналитические зависимости для перехода от значений фактора формы графита к соответствующим эталонным структурам ГОСТа и наоборот – от эталонных структур к фактору формы.



Список литературы

1. *Салтыков С. А.* Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
2. *Соценко О. В.* Оценка компактности включений графита в высокопрочном чугуна // Литейн. пр-во. – 1982. – № 6. – С. 5-7.
3. *Литовка В. И.* Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. – Киев: Наук. думка, 1987. – 206 с.
4. *Волчок И. П.* Сопротивление разрушению стали и чугуна. – М.: Металлургия, 1993. – 192 с.
5. *Макаренко К. В.* Идентификация графитных включений в чугунах // Литейн. пр-во. – 2009. – № 4. – С. 2-4.
6. *Александров Н. Н.* Высокопрочный чугун с шаровидным графитом – перспективный конструкционный материал XXI века // Материалы в арматуростроении. – 2008. – № 2 (53). – С. 72-74.
7. *Соценко О. В.* О фрактальной структуре шаровидного графита в высокопрочном чугуна // Теория и практика металлургии. – 2006. – № 4-5. – С. 133-135.
8. *Соценко О. В.* Компьютерная DLA-модель формирования шаровидного графита в высокопрочном чугуна // Металл и литье Украины. – 2009. – № 9. – С. 3-9.
9. *Соценко О. В.* Фрактальна структура кулястого графіту у високоміцному чавуні (огляд) // Металознавство та обробка металів. – 2009. – № 3. – С. 18-24.
10. *ImageJ.* Image Processing and Analysis in Java. – Режим доступа: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>. – Загл. с экрана.
11. *ImageJ 1.43m.* Processing and Analysis in Java. - Режим доступа: http://portablew07.ucoz.ru/news/imagej_143m/2009-12-09-1637. – Загл. с экрана.
12. *Белай Г. Е., Дембовский В. В., Соценко О. В.* Организация металлургического эксперимента: Учебное пособие для вузов / Под ред. В. В. Дембовского. – М.: Металлургия, 1993. – 256 с.
13. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1977. – 479 с.

Поступила 07.06.2010

УДК 669.162.275:669.14

Ю. В. Моисеев, А. И. Личак, В. А. Твердохвалов

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ПОТОКА ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ ПО МЕТОДУ “ТОЧЕЧНОГО ПОЛЮСА”

Рассмотрено устройство для намагничивания железоуглеродистых сплавов методом “точечного полюса” с регулируемой плотностью магнитного потока. Приведены результаты его применения для исследования поля остаточной намагниченности на плоской поверхности образцов.

Ключевые слова: магнитный поток, метод «точечного полюса», сталь, чугун, железоуглеродистые сплавы.