

**О. В. Соценко**

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

## Компьютерная оценка формы графита в высокопрочном, ковком и сером чугунах

*Показана возможность компьютерной количественной оценки формы включений графита в высокопрочном, ковком и сером чугунах. Разработан комплексный критерий оценки формы включений, обеспечивающий сопоставимость с результатами визуальных оценок по эталонам действующих стандартов.*

**Ключевые слова:** чугун, форма графита, компьютерный анализ

При классификации графитных включений (ГВ) в высокопрочном (ВЧ), ковком (КЧ) и сером (СЧ) чугунах в соответствии с ГОСТ 3443-87 [1] исходят из сравнительной визуальной оценки реальных микроструктур со шкалами эталонных изображений. Такой метод сопряжен с риском субъективности оценок вследствие ограниченного количества эталонов в шкалах и многообразия реальных форм ГВ даже в чугунах одного и того же вида.

В связи с этим большое значение имеет точность сопоставления исследуемой структуры с эталонной соответствующей шкалы. Иными словами, точность визуального распознавания микрофотографии с включениями графита для идентификации ее по шкалам ГОСТ 3443-87. Принципы, особенности и недостатки сопоставительного распознавания микроструктур до настоящего времени не нашли должного освещения в публикациях по литейному металлостроению. Эффективность визуального сравнения эталонов шкал микроструктуры с анализируемыми структурами целесообразно рассматривать не только с позиций профессиональных навыков, но и с учетом психологических аспектов, а также визуальных особенностей распознавания изображений и их идентификации с эталонными структурами шкал.

Важнейшей функцией восприятия является распознавание зрительных конфигураций, ведущее, в частности, к узнаванию предметов и их категоризации, то есть отнесению к той или иной группе [2]. Предпосылкой того, что сечение ГВ на микрофотографии вообще будет идентифицировано, является его выделение в качестве фигуры из окружающего фона микрофотографии.

В числе основных факторов, влияющих на точность распознавания, – глобальное сходство, определяемое такими признаками, как распределение, форма и размеры ГВ. Небольшие различия элементов структуры практически не замечаются при узнавании, однако они служат хорошей основой для дифференциации соответствующих структур [2].

Одно из направлений решения задачи визуального распознавания микроструктур – идентификация «нечетких дубликатов» изображений и их фрагментов, то есть не строго совпадающих с эталоном.

Классификация «нечетких дубликатов» изображений по группам дает возможность выполнить задачу идентификации микроструктуры ГВ и соотнести их со шкалами ГОСТ 3443-87 с определенным уровнем вероятности такой оценки.

В качестве «нечетких дубликатов» могут рассматриваться изображения микроструктур, отличающиеся разрешением или наличием шума в виде нехарактерных мелких фрагментов случайных сечений ГВ. Фактически задача идентификации изображений микроструктур – сравнение их с визуальным образцом-эталонным, являющимся «четким дубликатом». В основном применение анализа по визуальному образцу реализуется в областях, где сходство важнее, чем семантика: в медицинских коллекциях, например, среди рентгеновских снимков; в дизайнерских коллекциях; в архивах правоохранительных органов [3]. Весьма сложной проблемой, затрудняющей эффективное и однозначное решение задачи поиска для анализа в коллекции изображений, является отсутствие однозначной связи между низкоуровневыми характеристиками и семантикой изображения. При этом увеличивается вероятность ошибок вследствие субъективности оценок. Значительно упростить задачу распознавания и идентификации графитных структур по ГОСТ 3443-87 может создание расширенных баз данных путем подбора «четких дубликатов» соответствующим шкалам эталонов. Однако их создание усложняется вследствие отсутствия общих, универсальных методов, подходящих для любых коллекций, наборов изображений. Для разных коллекций и разных задач необходимы свои методы обработки и поиска. Так, например, у коллекции рентгеновских снимков свои специфические особенности, которые не дают возможности использовать методы, подходящие для анализа любительских фотографий. Безусловно, специфические особенности имеют и микрофотографии графитных структур.

Активная разработка методов поиска, распознавания и идентификации на основе визуального образца началась в начале 90-х годов. За это время предложили множество различных методов выделения признаков изображений и сравнения полученных представлений. Так, например, для поиска изображений

по визуальному образцу предлагали использовать структуры данных инвертированных файлов и схемы определения весов признаков на основании частот встречаемости признаков в изображении-запросе и всей коллекции изображений [3].

Важнейшая задача при построении любой системы поиска и анализа изображений – выбор наиболее информативного их представления. В статье [4] предложена методика разработки алгоритма оценки визуальной близости пары изображений на основе машинного обучения. В работе [5] разработан алгоритм поиска изображений на основе нечетких главных цветовых гистограмм и набора дополнительных гистограмм, построенных для определенных участков изображения. В статье [6] использованы уменьшенные копии изображений для поиска похожих снимков. В основу работы положен тот факт, что человеческое восприятие позволяет с хорошей точностью понимать содержание изображений с маленьким разрешением. Для цветных изображений человеку достаточно разрешения  $32 \times 32$ , чтобы достичь точности распознавания превышающей 80 %. В работе [3] проанализированы признаки цветовых автокоррелограмм, гистограммы ориентаций градиентов и др.

Таким образом, существует достаточно большое количество признаков, которые можно использовать в задачах поиска и сопоставления изображений по визуальному образцу. Тем не менее, большинство работ включают лишь часть существующих признаков изображений, комбинируя их и разрабатывая на их основе сигнатуры – правила, приемы и рекомендации. В связи с тем, что многие признаки могут быть взаимосвязаны между собой, важной задачей является их рациональный отбор.

Поиск изображений по визуальному образцу заключается в извлечении существенных свойств изображений и построении на их основе сигнатур, используемых в дальнейшем для сравнения пар изображений. В каждую пару всегда входит изображение из коллекции и изображение-образец, подобное которому стремится найти или идентифицировать пользователь. Результатом сравнения является величина, называемая визуальным подобием изображений [4].

Опыт создания сигнатур для применения в производственной и исследовательской практике визуальной классификации ГВ в соответствии с ГОСТ 3443-87 отсутствует. Отдельные решения используются в компьютерных комплексах для металлографических исследований, а также в разработках по компьютерному распознаванию образов. Последние, имеющие большие перспективы и требующие весьма длительного этапа «самообучения», нашли практическое применение в материаловедении.

Рассмотренные особенности и проблемы визуальной идентификации структур ГВ по эталонам ГОСТ 3443-87 ставят перед необходимостью поиска достаточно простых инженерных путей решения проблемы, которые позволят выполнять сравнение пар микроструктур с допустимой (заданной) вероятностью точности распознавания.

В качестве определяющих признаков для пар (эталон – сопоставляемое изображение микроструктуры с включениями графита) наиболее эффективным может быть применение различных усредненных количественных оценок формы ГВ. Именно соответствие таких количественных признаков эталона и оцениваемой микроструктуры на основе достаточно высокой тесноты корреляционной связи может исключить или значительно снизить степень субъективности оценки формы ГВ и, соответственно, классификационной ошибки при идентификации микроструктуры по ГОСТ 3443-87. Опыт использования количественных признаков из шкалы эталонов и оцениваемой микроструктуры компактных форм графита в высокопрочном чугуна опубликован в работах [7, 8].

Наибольшее распространение в прикладном литейном материаловедении нашел подход к описанию размерно-топологических характеристик структуры с использованием безразмерных факторов формы или индекса формы ГВ в высокопрочном чугуна. Эти методы снижают риск фактора субъективности при классификации ГВ [9-12]. Однако для оценки формы графита в ковком и сером чугунах надежных аналитических методов не существует.

В последние годы все большее распространение получают различные аналитические компьютеризированные комплексы, предназначенные для металлографических исследований – «Квантимет-720», «Thixomet PRO», «Эпиквант» и др. Тем не менее, остается нерешенной проблема разработки и использования более доступных некоммерческих программ для компьютерной оценки структуры металла и формы графита, как одной из определяющих характеристик эффективности всего технологического процесса производства отливок из чугунов разных видов.

*Цель данной работы* – разработка обобщенного критерия для компьютерной идентификации формы ГВ в высокопрочном, ковком и сером чугунах с оценкой статистически значимой взаимосвязи этого критерия с эталонными изображениями шкал графитных структур по ГОСТ 3443-87.

*Методика проведения исследования.* Для количественной оценки различных индивидуальных и обобщенных характеристик ГВ в эталонных шкалах графитных структур по ГОСТ 3443-87 использовали компьютерную программу ImageJ (Freeware). Программа ImageJ – бесплатный инструмент для обработки цифровых изображений [13, 14]. Она может работать в виде либо онлайн-апплета, либо 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. Она может читать многие форматы изображений, включая TIFF, GIF, JPEG, BMP, PNG, PGM, DICOM, FITS, RAW и др. Программа 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-

эталоны из шкал ГОСТ 3443-87 (рис. 1, 2 – верхний ряд), предварительно переведенные из серых полутонов в черно-белые изображения. Эти изображения последовательно загружали в программу ImageJ (рис. 3, а, б), преобразовывали в 8-битный формат, бинаризировали и в результате получали контурные копии исходных ГВ с нумерацией (рис. 1, 2 – нижний ряд).

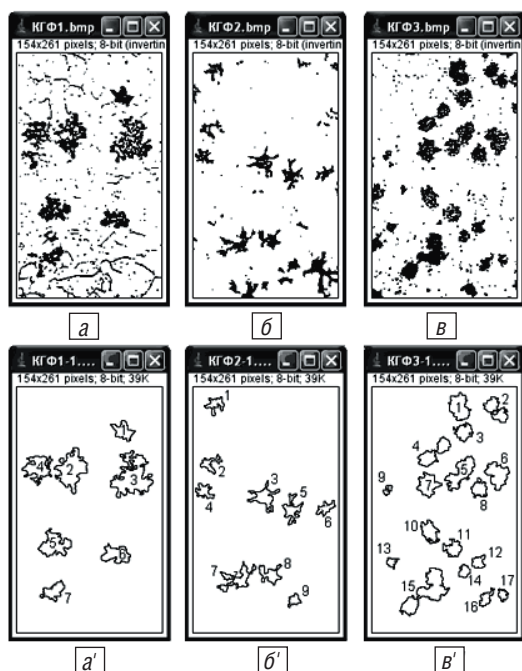


Рис. 1. Эталонные шкалы (а-в) и их контурные (а'-в') изображения графита в КЧ

Основные стадии обработки микроструктуры и соответствующие им команды в программе ImageJ выполняются в следующей последовательности.

1. Открытие файла микроструктуры для преобразований и анализа: *File => Open...*
2. Конвертирование изображения в 8-битный формат: *Image => Type => 8-bit*.
3. Бинаризирование изображения: *Process => Binary => Make Binary*.
4. Переход в меню анализа частиц графита: *Analyze => Analyze Particles* (рис. 3, в).

5. В открывшейся вкладке задаются параметры для анализа: ограничение на минимальную площадь анализируемых частиц (Size); интервал учитываемых значений фактора формы (Circularity); трансформирование изображения в контурное (Outlines).

6. После подтверждения заданных параметров микроструктуры графита на дисплей выводятся контурные изображения исследуемых включений с нумерацией для последующей идентификации их с индивидуальными количественными оценками в результирующем файле (рис. 3, г).

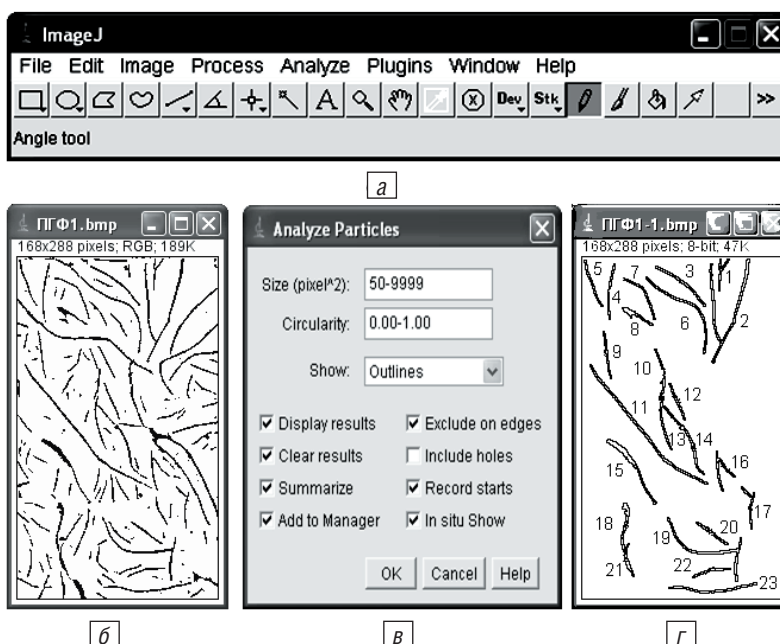


Рис. 3. Интерфейс программы (а); исходная структура графита в СЧ (б); меню *Analyze Particles* (в); контурная структура графита в СЧ (г)

7. Далее задаются параметры файла с результатами анализа (Results) перед их сохранением (качество изображения в формате JPEG, расширение файла таблицы *x/s* и др.): *File => Options*.

8. Для сохранения файла результатов Results указывают соответствующую папку и выполняют команды: *Files => Save as Text*. В результате числовые зна-

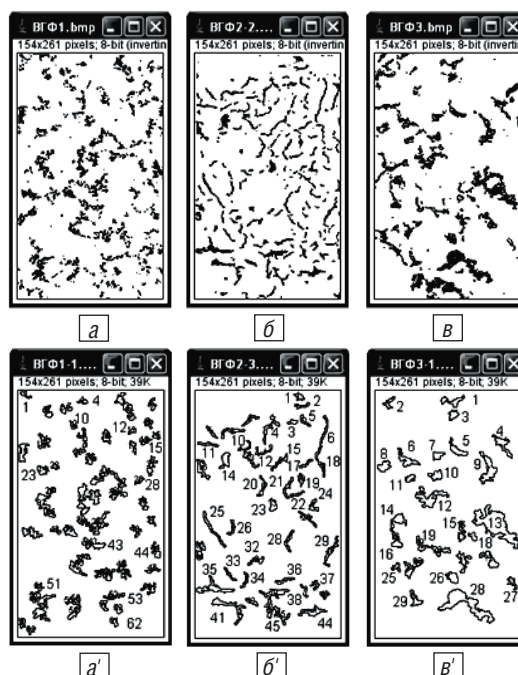


Рис. 2. Эталонные шкалы (а-в) и их контурные (а'-в') изображения графита в ЧВГ

чения заданного перечня характеристик микроструктуры графита автоматически заносятся в таблицу.

9. Для сохранения обобщающего файла результатов анализа (Summary) определяют соответствующую папку и выполняют команды: *File => Save As*.

В качестве индивидуальных параметров оценки формы всех ГВ использовали: фактор формы

$C = 4\pi P/p^2$ ; округлость  $R = 4P/\pi L^2$ ; плотность  $S = P/P_{во}$ , где  $P$  – площадь ГВ;  $P_{во}$  – площадь выпуклой области, охватывающей ГВ;  $p$  – периметр;  $L^2$  – главная ось включения. Для вывода значений этих параметров в итоговую таблицу необходимо внести соответствующие установки в меню *Analyze – Set Measurements – Analyze Particles* (рис. 3, в).

Для очистки эталонных шкал микроструктур от мелких, нехарактерных фрагментов графита, создающих «фонный шум» (рис. 3, б), в этом меню программы в окне *Size* указывали нижнюю границу размеров графитных включений (рис. 3, в), что в результате отражается на их контурных изображениях с автоматически проставляемой нумерацией (рис. 3, а).

**Результаты исследования.** Корреляционный анализ взаимосвязи индивидуальных и комплексных параметров формы ГВ с порядковыми номерами  $N_{эш}$  эталонных структур графита (ЭСГ) по шкалам ГОСТ 3443-87 (табл. 1) показал следующие результаты (рис. 4, 5): ЭСГ –  $f(C)$ ,  $r = 0,80$ ; ЭСГ –  $f(R, S)$ ,  $r = 0,94$ ; ЭСГ –  $f(R)$ ,  $r = 0,87$ ; ЭСГ –  $f(C, R, S)$ ,  $r = 0,92$ ; ЭСГ –  $f(S)$ ,  $r = 0,93$ .

Как следует из приведенных данных, наибольшую тесноту связи с порядковыми номерами  $N_{эш}$  эталонных шкал графитных включений по ГОСТ 3443-87 имеет комплексный критерий – параметр формы ( $\Pi_{ф}$ ) графитных включений на основе усредненных значений округлости  $R$  и плотности  $S$  графитных включений (рис. 5, б). Среди индивидуальных  $\Pi_{ф}$  наиболее слабая связь ( $r = 0,80$ ) наблюдается для фактора формы (рис. 4, а), а наиболее тесная ( $r = 0,93$ ) – для плотности (рис. 4, в). Уравнение регрессии, характеризующее взаимосвязь  $\Pi_{ф}$  графитных включений с  $N_{эш}$ , имеет вид

$$\Pi_{ф} = 0,038N_{эш} + 0,27 \pm 0,06. \quad (1)$$

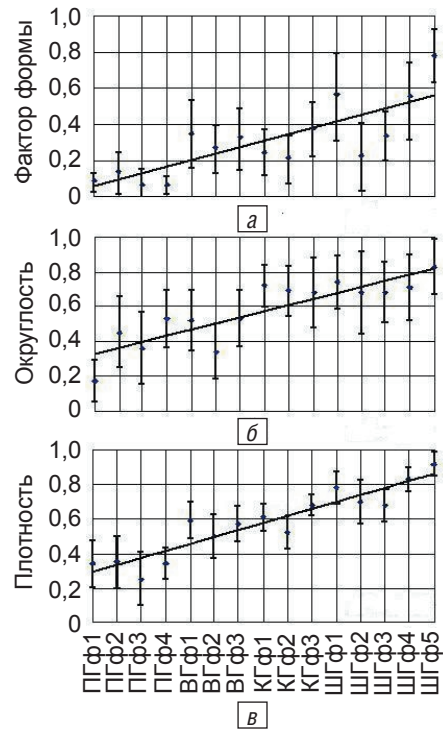
Форму взаимосвязи  $N_{эш}$  с  $\Pi_{ф}$  можно представить в виде

$$N_{эш} = 23,3\Pi_{ф} - 5,42 \pm 1,51. \quad (2)$$

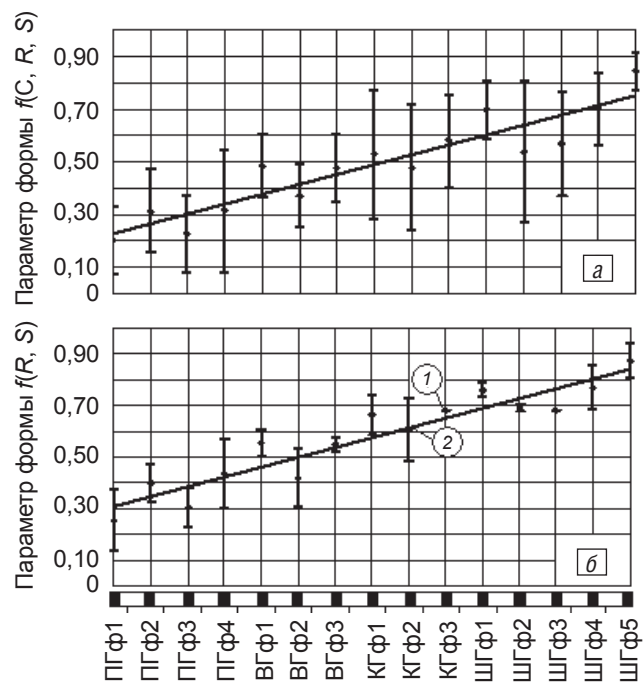
**Пример.** Необходимо определить, какому эталонной шкалы ГОСТ 3443-87 соответствуют микроструктуры графита в образцах КЧ-1 и КЧ-2 отливки из ковкого чугуна, приведенные на рис. 6, а, в.

В соответствии с процедурой работы в программе ImageJ, изложенной выше, найдены средние значения трех основных характеристик формы включений графита для этих микроструктур (табл. 2).

На рис. 5, б в диапазоне шкалы для ковких чугунов находим для микроструктуры КЧ-1 (рис. 6, а, б)



**Рис. 4.** Соотношение эталонных структур ГВ в разных чугунах по ГОСТ 3443-87 с фактором формы (а); округлостью (б) и плотностью (в) этих включений



**Рис. 5.** Соотношение эталонных структур ГВ в разных чугунах по ГОСТ 3443-87 с комплексными параметрами формы:  $f(C, R, S)$  (а);  $f(R, S)$  (б)

### Соотношение $N_{эш}$ и эталонов шкал ГОСТ 3443-87 на рис. 4, 5

$N_{эш}$	Эталон шкалы ГОСТ 3443-87	$N_{эш}$	Эталон шкалы ГОСТ 3443-87	$N_{эш}$	Эталон шкалы ГОСТ 3443-87
1	ПГф1	6	ВГф2	11	ШГф1
2	ПГф2	7	ВГф3	12	ШГф2
3	ПГф3	8	КГф1	13	ШГф3
4	ПГф4	9	КГф2	14	ШГф4
5	ВГф1	10	КГф3	15	ШГф5

**Таблица 1**

эталон КГф3, а для микроструктуры КЧ-2 (рис. 6, в, г) – эталон КГф2. Эти результаты отмечены на рис. 5, б соответственно цифрами 1 и 2.

Используя выражение (2) и значения  $\Pi_{ф1} = 0,68$  и  $\Pi_{ф2}$  из табл. 2, расчетным путем можно найти номера  $N_{эш}$  эталонов шкалы ГОСТ 3443-87 для этого примера:

Таблица 2

Определение фактора формы (С), округлости (R) и плотности (S) ГВ

Индекс микроструктуры	Количество ГВ, n	Средние значения			P <sub>ф</sub> = (R+S)/2
		С	R	S	
КЧ -1	12	0,24	0,70	0,65	0,68
КЧ -2	20	0,29	0,59	0,62	0,61

Традиционное визуальное сопоставление графитных структур КЧ-1 и КЧ-2 с эталонными шкалами КГф3 и КГф2 для ковкого чугуна свидетельствует о приемлемой адекватности расчетных данных для данного примера.

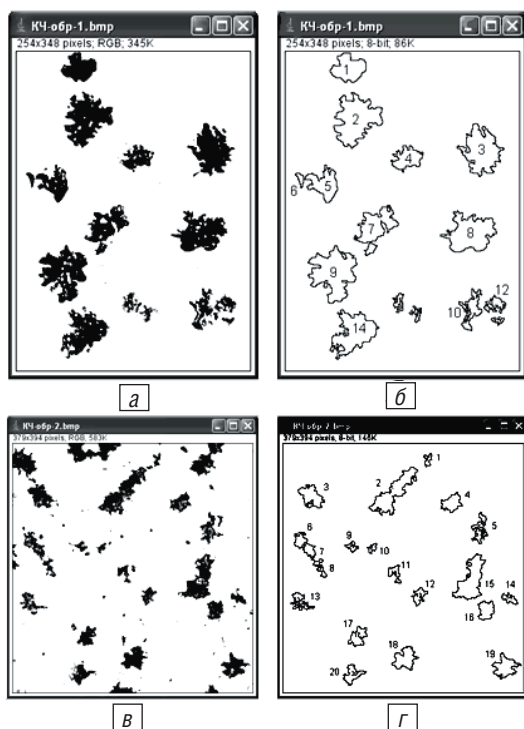


Рис. 6. Структура включений графита в контрольных образцах КЧ (а, в) и их контурные изображения (б, д)

Проведенный анализ статистической зависимости между эталонами шкал ГВ и расчетными их параметрами дал возможность установить регрессионно-корреляционную связь между комплексным параметром формы P<sub>ф</sub> и порядковым номером N<sub>эШ</sub> эталонных структур из шкал ГОСТ 3443-87. Наличие графической (рис. 5, б) и аналитической (в виде уравнений регрессии (1)-(2)) форм такой взаимосвязи позволяет выполнять практически «прецизионное» по сравнению с визуальным методом компьютерное сопоставление реальных ГВ с эталонными структурами шкал ГОСТ 3443-87, и наоборот, – переходить от эталонных структур к комплексному параметру формы P<sub>ф</sub> (рис. 5, б).

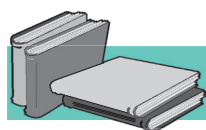
**Выводы**

Разработана методика оценки формы графита по комплексному критерию в чугунах с разной формой графита на основе некоммерческой программы ImageJ.

Установлена корреляционная взаимосвязь между комплексным критерием формы и соответствующим эталоном шкалы для оценки формы графита по ГОСТ 3443-87.

Предложены графические зависимости для перехода от значений комплексного критерия формы графита к соответствующим эталонным структурам шкал ГОСТ 3443-87, и наоборот, – от эталонных структур к комплексному параметру формы.

N<sub>эШ1</sub> = 10,42 ± 1,51 и N<sub>эШ2</sub> = 8,79 ± 1,51. По табл. 1 находим соответствующие этим номерам эталоны шкалы КГф3 и КГф2 для ковкого чугуна.



**ЛИТЕРАТУРА**

1. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – ГОСТ 3443-87. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2005. – 42 с.
2. Величковский Б. Когнитивная наука: Основы психологии познания. – Режим доступа: [http://www.gumer.info/bibliotek\\_Vuks/Psihol/velich/03.php](http://www.gumer.info/bibliotek_Vuks/Psihol/velich/03.php).
3. Мельниченко А., Гончаров А. Методы поиска изображений по визуальному подобию и детекции нечетких дубликатов изображений // ЛММИИ на РОМИП. Тр. РОМИП (Петрозаводск, 16 сентября 2009 г.) – С.-Пб.: НУ ЦСИ, 2009. – С. 108-121.
4. Варламов А. Д., Шарапов Р. В. Поиск визуально подобных изображений на основе машинного обучения // Тр. 14-й Всерос. научн. конф. «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции». (15-18 октября 2012). – Переславль-Залесский (Россия): RCDL-2012. – С. 113-120.
5. Пименов В. Ю. Простые методы поиска изображений по содержанию // Рос. семин. по оценке методов информационного поиска. Тр. РОМИП. (15 октября 2010 г.) – Казань, 2010. – С. 69-79.
6. Яндекс на РОМИП 2010: Поиск похожих изображений и дубликатов / А. В. Слесарев, И. Б. Мучник, Д. К. Михалев и др. // Российский семинар по оценке методов информационного поиска. Тр. РОМИП. (15 октября 2010 г.) – Казань, 2010. – С. 148-153.
7. Соценко О. В., Куркострига И. А., Посыпайко И. Ю. Компьютерная оценка формы графита в высокопрочном чугуне // Процессы литья. – 2010. – № 6. – С. 33-40.
8. Соценко О. В. Оперативный контроль формы графитных включений в высокопрочном чугуне // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 4 (30). – С. 49-53.

9. Соценко О. В. Оценка компактности включений графита в высокопрочном чугуна // Литейн. пр-во. – 1982. – № 6. – С. 5-7.
10. Литовка В. И. Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. – Киев: Наук. думка, 1987. – 206 с.
11. Волчок И. П. Сопротивление разрушению стали и чугуна. – М.: Metallurgy, 1993. – 192 с.
12. Макаренко К. В. Идентификация графитных включений в чугунах // Литейн. пр-во. – 2009. – № 4. – С. 2-4.
13. ImageJ. Image Processing and Analysis in Java. – Режим доступа: <http://rsb.info.nih.gov/ij>.
14. ImageJ 1.43m. Processing and Analysis in Java. – Режим доступа: [http://portablevv07.ucoz.ru/news/imagej\\_143m/2009-12-09-1637](http://portablevv07.ucoz.ru/news/imagej_143m/2009-12-09-1637).

### Анотація

Соценко О. В.

Комп'ютерна оцінка форми графіту у високоміцному, ковкому та сірому чавунах

Показано можливість комп'ютерної кількісної оцінки форми включень графіту в високоміцному, ковкому та сірому чавунах. Розроблено комплексний критерій оцінки форми включень, що забезпечує порівняння з результатами візуальних оцінок за еталонами діючих стандартів.

### Ключові слова

чавун, форма графіту, комп'ютерний аналіз

### Summary

Sotsenko O. V.

Computer evaluation of graphite form in high-duty, malleable and gray cast irons

The possibility of quantitative evaluation of computer forms of graphite in ductile, gray and malleable cast irons. A complex evaluation criteria form inclusions, which provides compatibility with the results of visual assessments of standards applicable standards.

### Keywords

cast iron, the form of graphite, computer analysis

Поступила 20.05.13

### **Вниманию читателей и подписчиков!**

Статьи в редакцию журнала «Металл и литье Украины»  
необходимо присылать по адресу:

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

Телефон: (044) 424-04-10, 424-34-50 факс: (044) 424-35-15

E-mail: [mlu@ptima.kiev.ua](mailto:mlu@ptima.kiev.ua) сайт: [www.ptima.kiev.ua](http://www.ptima.kiev.ua)