

Исследование структуры и свойств

Физические методы исследования и контроля

УДК 51-74:669.017.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ

© Т. С. Скобло, О. Ю. Ключко, Е. Л. Белкин, А. И. Сидашенко¹*Статья поступила 28 июня 2016 г.*

Предложен подход для описания фазового состава гетерогенных сплавов на примере высокохромистого чугуна с использованием оптико-математического анализа. На основе математической обработки металлографических изображений структур сплавов разработаны оценочные параметры, позволяющие учитывать значительный разброс составляющих по концентрации (степень неоднородности) в выявляемых фазах. Предложенный метод может быть использован как в качестве экспресс-анализа, так и как часть комплексного исследования структуры, включающего различные методы изучения структурных компонентов в локальных областях гетерогенного сплава с учетом термодинамических процессов, происходящих при его кристаллизации и термообработке.

Ключевые слова: гетерогенный сплав; высокохромистый чугун; оптико-математический анализ; металлографические изображения; структурная неоднородность; оценочные параметры; изменчивость.

В ранее опубликованных работах по исследованию образования структур в гетерогенных сплавах обсуждались базовые подходы к оценке соотношения фаз с использованием математического анализа фотографий, полученных методами оптической и электронной микроскопии. На примере высокохромистого сплава (16 – 18 % Cr) был предложен аналитический аппарат, основанный на компьютерном анализе металлографических изображений для количественной и качественной оценок фазового состава. Методика компьютерного исследования базировалась на использовании гидродинамических аналогий (диффузионный процесс, изменение плотности), отмеченных при формировании фаз.

Для анализа структур [1] были введены дивергенция и лапласиан:

$$Dv = \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y}, \quad (1)$$

$$Lp = \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (2)$$

(c — величина условного цвета при оцифровке фотографии, x, y — координаты), а также аналогичные функции более высоких порядков. Функции представ-

ляли в конечно-разностной форме. При этом в качестве координаты принимали пиксель изображения.

Такой подход позволяет проводить более глубокий анализ металлографических изображений, оценивать состав фаз и их доли, которые формируются на различных этапах в процессе кристаллизации при отливке и термообработке. Было показано [2], что между карбидными фазами и ферритом, отличающимися степенью легированности, существуют сильные связи. Это дало возможность выявить сочетания фаз, присутствующих в данных структурах, и сделать заключение, в частности, об их структурной неоднородности.

Эффективность метода подтверждена исследованиями фазового состава и путем сравнения полученных результатов с данными микрорентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализов [3 – 11].

Гетерогенные структуры имеют сложное строение, поскольку из-за высокой степени легированности морфология и стехиометрический состав образующихся в них отдельных включений зависят от множества факторов, предсказать которые не всегда возможно. Для учета значительного разброса по концентрации компонентов в выявляемых однотипных фазах был предложен критерий, оценивающий степень неоднородности — изменчивость [12, 13].

Изменчивость фазы — микроликвация в ней химических элементов и формирование дефектов кри-

¹ Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, г. Харьков, Украина; e-mail: vklochko@yandex.ua

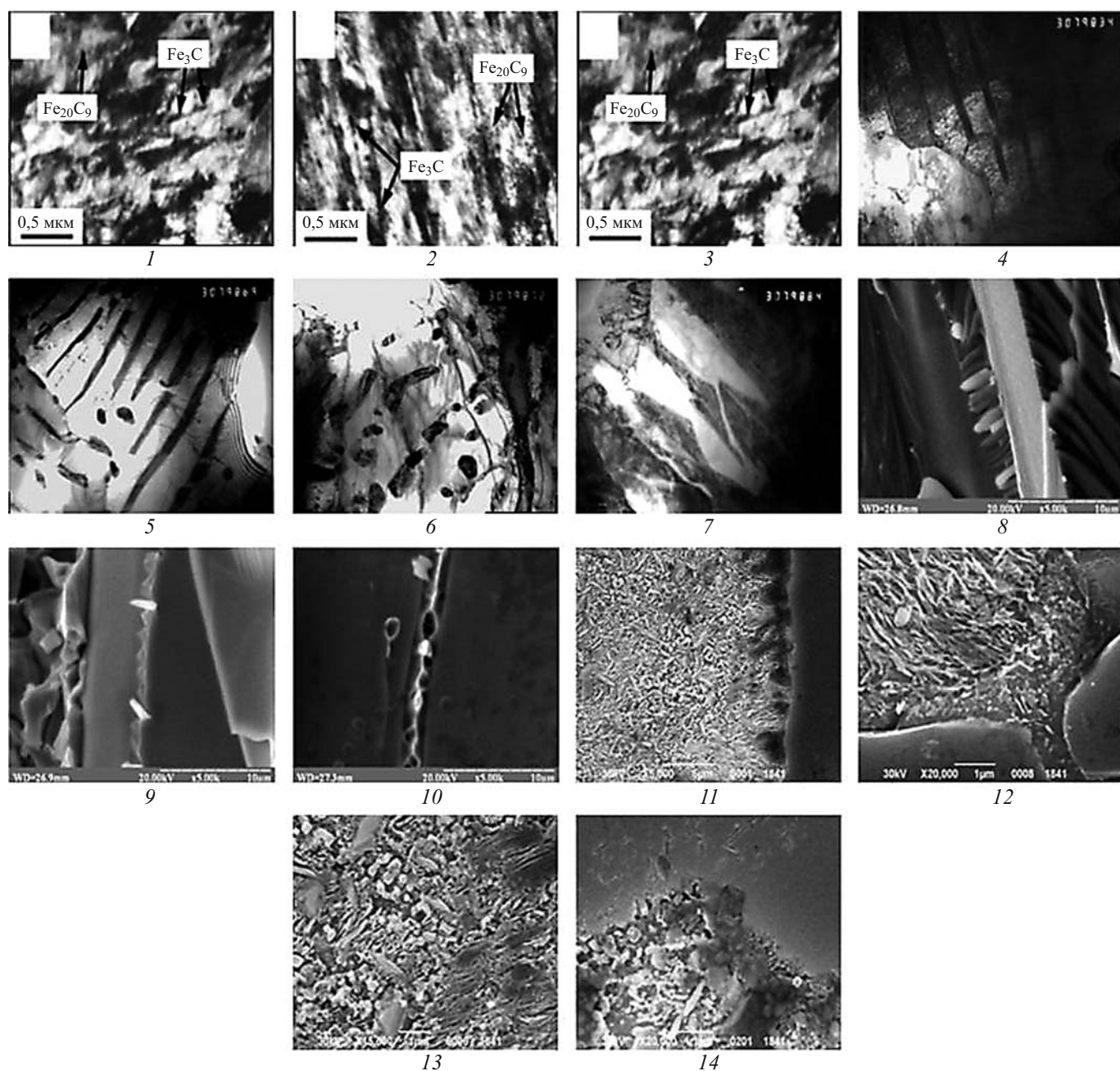


Рис. 1. Изображения микроструктур высокохромистых чугунов, полученные методами электронной микроскопии: 1 – 3 — чугун ИЧХ28Н2 в литом состоянии [14]; 4 – 8 и 9 – 10 — чугун 28Х32Н3Ф в литом состоянии и после высокотемпературной термообработки [15]; 11 – 14 — чугун валковый [7] (на фотографиях 1 – 3 Fe_3C и Fe_{20}C_9 — карбидные фазы цементитного типа)

сталлического строения (дислокаций) с выделением компонентов, их декорирующих. К таким компонентам в первую очередь относятся углерод и кислород, что подтверждают исследования с использованием микрорентгеноспектрального анализа, оптической и электронной микроскопии, термоэлектронной эмиссии после специального вакуумного травления.

Цель работы — уточнение оценочных параметров, позволяющих при исследовании структур гетерогенных сплавов учитывать степень неоднородности в выявляемых однотипных фазах.

Микроструктуру образцов высокохромистых (16,0 – 32,0 % Cr) чугунов изучали с помощью метал-

лографического микроскопа Neophot-21. Микрорентгеноспектральный анализ структурных составляющих проводили на растровых электронных микроскопах JEOL JSM-6390LV ($\times 5000$ – $20\,000$, ускоряющее напряжение — 30 кВ) и JSM-820 Link JEOL с системой рентгеновского микроанализа Link AN10/85S, рентгеноструктурный фазовый анализ — на дифрактометре «Дрон-3» в монохроматизированном медном излучении ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$).

За основу расчетов взяли схему расположения вычисляемых значений условного цвета на изображениях металлографической структуры [2].

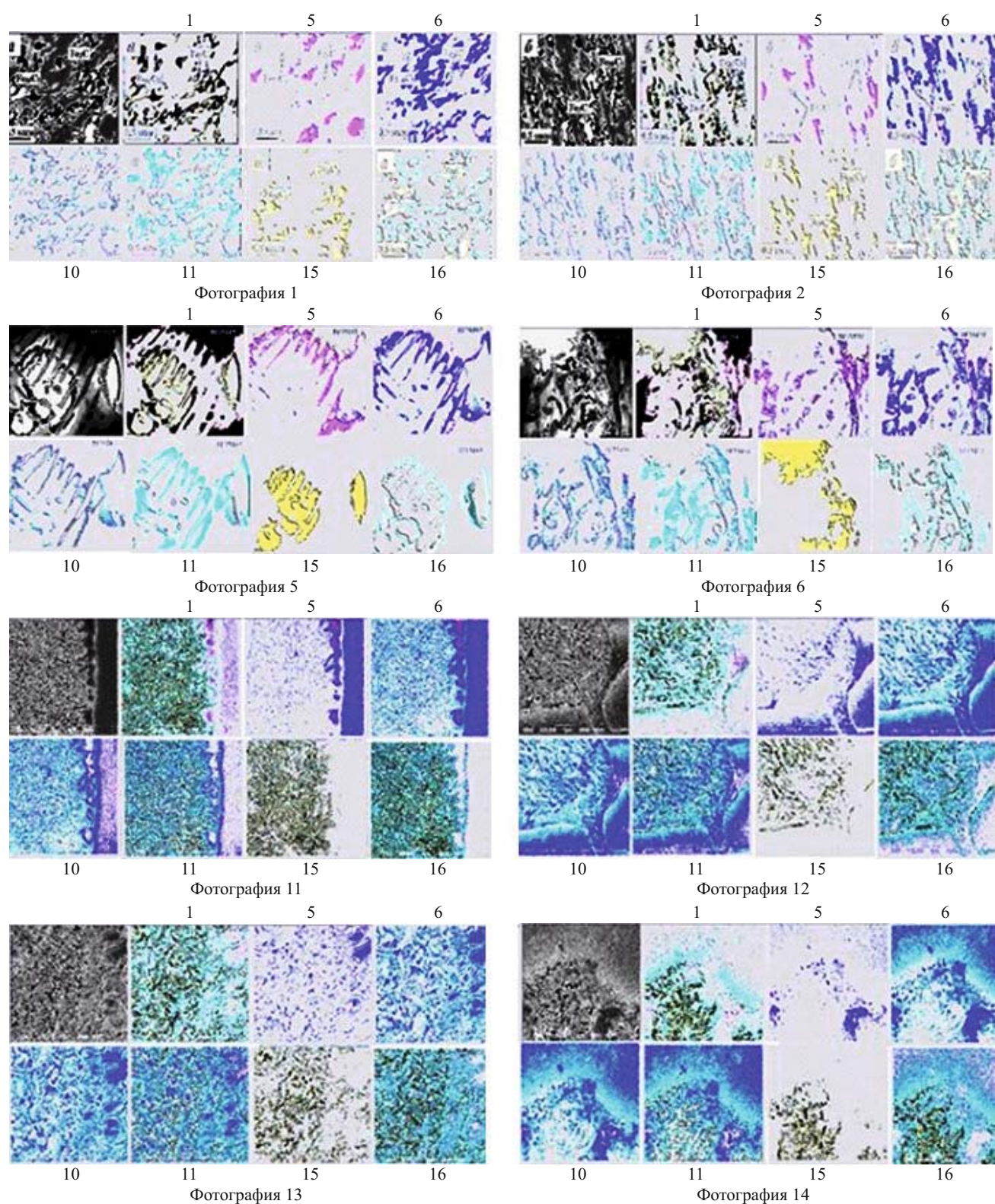


Рис. 2. Гистограммы изменчивости 2 для выявленных условных цветов (1, 5, 6, 10, 11, 15 и 16) в ячейке размерностью 3×3 (по 9 точкам) для высокохромистых чугунов (изображения без номера — фото структуры, см. рис. 1)

Изображение в цифровом виде разбивали на области с определенным количеством пикселей (матрица размерностью $n \times m$). Каждый пиксел сканировали, задавая его как среднюю точку, находящуюся внутри ячейки небольшого размера (например, 3×3 пикселя).

Под изменчивостью состава в той или иной точке фазы в выбранной области изображения понимали соотношение так называемого показателя изменчивости (числа совпадений условного цвета средней точки с цветами окружающих ее $n \times m - 1$ точек) к количеству всех точек в области. Анализ проводили при

помощи оптико-математического метода (значения условного цвета в каждой точке описывали согласно методике, основанной на положениях гидродинамики [2]).

Структуру исследовали с использованием гистограмм условных цветов и изменчивостей, рассчитанных с применением распределения Пирсона. С их помощью проводили статистический анализ полученных данных для оценки степени неоднородности структуры в локальных зонах и разброса концентраций компонентов в фазах.

Диапазон получаемых при цифровой обработке полутонов серого (от 0 до 255) разбивали на 16 дискретных интервалов — номеров условного цвета [3, 4, 9], которые объединяли в группы: 0 – 8 — цвета 0 – 146; 9 – 10 — цвета 147 – 164; 11 – 16 — цвета 165 – 255. Группы интервалов соответствовали трем группам фаз: 1) феррита (α -фазы с различным типом совершенства кристаллической решетки (α -фаза эвтектоида, игольчатые структуры), различающиеся химическим составом); 2) аустенита (также неоднородна по химическому составу); 3) карбидных фаз (интервал 11 – 12 — карбидные фазы цементитного типа, 13 – 16 — принадлежат к различным фазам спецкарбидов всех типов, выделяющимся при кристаллизации).

Корреляционные зависимости, полученные с учетом результатов анализа гистограмм цветов и изменчивостей, позволили предварительно оценить степень неоднородности фазового состава образцов [12].

Расчетные параметры характеризовали число совпадений условного цвета группы фаз средней точки в выбранной области изображения размером $m \times n$ пикселей с цветами окружающих ее точек (изменчивость I).

Для уточнения параметров, учитывающих при исследовании структур гетерогенных сплавов разброс по концентрации компонентов в выявляемых фазах, применяли подход, включающий оценку типа и соотношения фаз. Для этого при расчете степени неоднородности использовали критерии (изменчивость 2), показывающие число совпадений условных цветов групп фаз внутри выбранной области (под условным цветом понимали номер соответствующего цветового интервала). Для каждой выбранной области определяли также соотношения выявленных фаз.

Изображения микроструктур, полученные при анализе неоднородности с использованием показателя изменчивости I , представлены на рис. 1.

Учитывая сложность строения сплавов, приняли следующее упрощение: все выявленные структуры привели к трем группам фаз, включающим 16 интервалов цветов (группы феррита, аустенита и карбидных фаз). Переход к фазовым группам можно рассматривать как процесс обработки изображения в трех цветовых интервалах, им соответствующих, т.е. полученные матрицы значений условных цветов были приведены к трехцветным. Каждый пиксель (точку) матрицы фотографии последовательно сканировали. При обработке изображение разбивали на области (ячейки)

Таблица 1. Возможные сочетания цветов групп фаз внутри ячейки изображения 3×3 пикселя

Комбинация цветов	Возможные сочетания цветов групп фаз для девяти пикселей	Пример сочетаний
1	Все цвета соответствуют группе фаз феррита (1)	1 1 1
		1 1 1
		1 1 1
2	Все цвета соответствуют группе фаз аустенита (2)	2 2 2
		2 2 2
		2 2 2
3	Все цвета соответствуют группе карбидных фаз (3)	3 3 3
		3 3 3
		3 3 3
4	Цвета соответствуют группам фаз феррита и аустенита (1 и 2)	1 2 2 1 2 2
		2 1 2 2 2 1
		1 1 1 1 1 1
5	Цвета соответствуют группам фаз феррита и карбидных фаз (1 и 3)	1 3 3 1 3 3
		3 1 3 3 3 1
		1 1 1 1 1 1
6	Цвета соответствуют группам фаз аустенита и карбидных фаз (2 и 3)	2 3 3 2 3 3
		3 2 3 3 3 2
		2 2 2 2 2 2
7	Цвета соответствуют группам фаз феррита, аустенита и карбидных фаз (1, 2 и 3)	1 3 2 1 3 2 1 3 2
		2 1 3 2 2 3 2 3 3
		1 3 1 1 3 1 1 3 1

размером 3×3 пикселя. Изменчивость вычисляли как соотношение показателя изменчивости к каждой из девяти точек. Схема нумерации точек вокруг выбранной c_1 приведена ниже:

$$\begin{array}{ccc} c_3 & c_4 & c_5 \\ c_2 & c_1 & c_6 \\ c_9 & c_8 & c_7 \end{array}$$

В результате получали гистограммы совпадений цветов в точках $c_2 \dots c_9$ относительно c_1 . Исходя из заданных условий разбиения цветов, внутри каждой ячейки размером 3×3 пикселя могут наблюдаться только семь комбинаций цветов (табл. 1).

При оценке количественного соотношения выявленных фаз гистограммы, состоящие из трех значений, соответствующих каждой из групп фаз, получали по следующему алгоритму. Количество цветов первой группы фаз поочередно суммировали с количеством цветов второй и третьей групп. Далее количество каждой из групп делили на эту сумму и умножали на 100 %. Например, пусть матрица сочетаний цветов со-

ответствует седьмой комбинации (см. табл. 1). Количество цветов сочетаний фаз составит: 10 цветов фаз группы феррита, 7 — группы аустенита и 10 — группы карбидов. В результате вычислений значения внутри выбранной ячейки изображения размером 3×3 пикселя следующие: $10/27 \cdot 100\%$ — число групп фаз феррита и карбидов; $7/27 \cdot 100\%$ — число групп фаз аустенита.

Рассчитанные соотношения выявленных фаз для изображений 11–14 (см. рис. 1) представлены в табл. 2.

Для более точной оценки неоднородности фазового состава сплава необходимо рассматривать все сочетания условных цветов, входящих в группы фаз. В табл. 3 представлено соответствие выявленных сочетаний групп фаз интервалам условных цветов внутри каждой ячейки изображения размером 3×3 пикселя.

При оценке изменчивости I для каждой анализируемой области получали три (по числу цветов групп фаз) либо 16 (по числу условных интервалов цветов групп фаз) гистограмм по девять чисел (по количеству

Таблица 2. Количественное соотношение выявленных фаз внутри ячейки 3×3 пикселя

Выявленные сочетания по фазам, %										Номер фото на рис. 1
По первому сочетанию			Σ по первому сочетанию	По двум сочетаниям			Σ по двум сочетаниям	По трем сочетаниям	Σ по трем сочетаниям	
1	2	3		1 – 3	2 – 3	1 – 2				
27,5	0,0	14,8	42,5	14,7	9,6	12,7	37,1	20,4	20,4	11
4,6	0,0	41,3	46,3	7,7	24,5	5,7	37,9	15,8	15,8	12
1,3	0,0	42,1	44,0	3,3	40,1	2,7	46,4	9,9	9,9	13
0,0	0,0	50,1	51,3	1,1	43,5	0,0	45,4	3,3	3,3	14

Таблица 3. Соответствие выявленных сочетаний групп фаз интервалам условных цветов

Сочетание групп фаз	Интервал условных цветов				Сочетание групп фаз	Интервал условных цветов			
1	1	0	0	0	5	5	6	11	0
1	6	0	0	0	5	1	11	15	0
1	5	6	0	0	5	1	6	11	0
1	1	5	0	0	5	1	11	15	16
1	1	5	6	0	5	1	6	11	16
2	10	0	0	0	5	1	6	15	16
3	11	0	0	0	5	1	6	11	15
3	16	0	0	0	5	1	5	6	11
3	15	0	0	0	5	5	6	11	16
3	11	16	0	0	6	10	11	16	0
3	15	16	0	0	6	10	11	0	0
4	6	10	0	0	7	6	10	11	0
4	5	6	10	0	7	1	10	16	0
4	1	5	6	10	7	1	10	11	0
5	1	16	0	0	7	1	6	10	11
5	1	11	16	0	7	1	10	15	16
5	6	11	16	0	7	5	6	10	11
5	1	15	0	0	7	1	10	11	16
5	6	11	0	0	7	6	10	11	16
5	1	11	0	0	7	1	6	10	16
5	1	15	16	0					

пикселей в ячейке размерностью 3×3). Обходя область точку за точкой (в зависимости от числа совпадений с окружающими восемью точками), прибавляли единицу к тому из девяти чисел, какому случаю соответствовала ситуация и, таким образом, находили показатели изменчивости. Затем полученные значения делили на число точек выбранной области и определяли среднюю изменчивость в каждой точке этой фазы. Далее число совпадений суммировали по столбцам, затем каждый элемент столбца делили на сумму показателей изменчивости (вероятность совпадений цвета) и умножали на 100.

Среднее значение изменчивости (математическое ожидание) находили по следующей формуле:

$$\bar{x} = \sum_{k=1}^n kp_k, \quad (3)$$

где p_k — показатель изменчивости; $n = 9$ — число точек (пикселей).

Изменчивость 2 состава сплава вычисляли аналогично. Различие заключалось в том, что гистограммы строили между группами фаз (по распределению цветов, в соответствии с определенной точкой ячейки внутри каждой фазы). По сути, в программу расчета изменчивости 1 добавляли блок построения гистограмм окружающих точек. Поэтому в отличие от изменчивости 1 для каждой группы фаз вычисляли по три гистограммы (по количеству возможных случаев для каждой группы — гистограммы числа совпадений цветов точек с номерами цвета средней точки, т.е. гистограммы в гистограмме). Это позволило при расчете дополнительно учесть неоднородность распределения элементов в локальных областях каждой фазы (внутри группы).

Рассмотрим пример алгоритма расчета. Предположим, что на изображении выделена область размерностью 4×4 пикселя, для которой получена следующая гистограмма цветов:

12	9	10	5
5	13	1	13
14	12	1	7
14	13	6	16

Здесь четыре внутренних точки (две во втором ряду и две в третьем) с цветами 13, 1, 12, 1, т.е. имеем три гистограммы для цветов 1, 12, 13.

Первые девять точек, соответствующих принятой схеме расположения (см. рис. 2):

12	9	10
5	13	1
14	12	1

Поскольку нет совпадений с центральной точкой цвета 13, то в соответствии с алгоритмом к гистограмме

цвета 13 прибавляем 1. Так как рассматриваются только цвета 1, 12 и 13, то для цвета 13 гистограмма, показывающая число совпадений по цвету, следующая: 2, 1, 1 (два совпадения цвета с номером 1, одно — с номером 12 и одно — с номером 13).

Рассмотрим вторые девять точек:

9	10	5
13	1	13
12	1	7

Аналогично, к гистограмме цвета 1 добавляем 2. Поскольку рассматриваются только цвета 1, 12, 13, то для цвета 1 гистограмма следующая: 2, 1, 2 (два совпадения цвета с номером 1, одно — с номером 12 и два — с номером 13).

Рассмотрим третьи девять точек:

5	13	1
14	12	1
14	13	6

К гистограмме цвета 12 добавляем 1. Среди цветов 1, 12, 13 для цвета 12 гистограмма числа совпадений следующая: 1, 1, 2 (одно совпадение с номером 1, одно — с номером 12 и два — с номером 13).

И, наконец, четвертые девять точек:

13	1	13
12	1	7
13	6	16

К гистограмме цвета 1 добавляем 2. Среди цветов 1, 12, 13 для цвета 1 гистограмма следующая: 2, 1, 2 (два совпадения с номером 1, одно — с номером 12 и два — с номером 13).

Суммируем гистограммы, соответствующие цвету с номером 1 (2, 1, 2 и 2, 1, 2), и переписываем гистограммы цветов 12 и 13. Получаем:

1	1	2
2	1	1

Общее число случаев совпадений составит: $4 + 2 + 4 + 1 + 1 + 2 + 2 + 1 + 1 = 18$. Гистограмма распределения внутри каждого цвета, т.е. средняя изменчивость цвета в цвете (однородность каждой группы цвета внутри этой группы фаз), следующая:

4/18	2/18	4/18
1/18	1/18	2/18
2/18	1/18	1/18

Суммируем число совпадений по строкам. Каждый элемент строки делим на эту сумму (вероятность события) и умножаем на 100.

Среднее значение изменчивости 2 находим так же, как для изменчивости 1, — по формуле (3). Однако при этом $n = 3$ (число групп фаз) и средних значений будет три (по числу групп фаз).

По гистограммам, рассчитанным при помощи распределения Бозе, находили распределение одинаковых цветов независимо от их цвета. Например, если в ячейке 3×3 присутствуют шесть цветов с номером 6 и три с номером 11, то цвет 6 можно заменить, например, на цвет 1, а цвет 11 оставить тем же (или заменить на цвет 15).

Таким образом, для гистограмм Бозе можно заранее составить описание матрицы цветовых сочетаний. Так, для ячейки 3×3 пикселя возможные варианты сочетаний цветов (число 9 разбивается обязательно на целые части) представлены ниже:

9	=	9
8 + 1	=	9
7 + 2	=	9
6 + 3	=	9
5 + 4	=	9
7 + 1 + 1	=	9
6 + 2 + 1	=	9
5 + 3 + 1	=	9
5 + 2 + 2	=	9
4 + 4 + 1	=	9
4 + 3 + 2	=	9
6 + 1 + 1 + 1	=	9
5 + 2 + 1 + 1	=	9
4 + 3 + 1 + 1	=	9
4 + 2 + 2 + 1	=	9
3 + 2 + 2 + 2	=	9
5 + 1 + 1 + 1 + 1	=	9
4 + 2 + 1 + 1 + 1	=	9
3 + 3 + 1 + 1 + 1	=	9
3 + 2 + 2 + 1 + 1	=	9
4 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	=	9
3 + 2 + 1 + 1 + 1 + 1	=	9
2 + 2 + 2 + 1 + 1 + 1	=	9
3 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	=	9
2 + 2 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	=	9
2 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	=	9
1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	=	9

Всего вариантов 27, при этом матрица сочетаний состоит из двух одномерных матриц распределения (по столбцам распределение близко к распределению Пирсона, а по строкам — Бесселя, поскольку немонотонно и с увеличением номера строки уменьшается, но в отличие от функции Бесселя максимум находится не в первой точке).

При построении гистограммы Бозе для ячейки размером 2×3 пикселя схема разбиения числа 6 на целые части показана ниже:

6	=	6
5 + 1	=	6
4 + 2	=	6
3 + 3	=	6

4 + 1 + 1	=	6
3 + 2 + 1	=	6
2 + 2 + 2	=	6
3 + 1 + 1 + 1	=	6
2 + 2 + 1 + 1	=	6
2 + 1 + 1 + 1 + 1	=	6
1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	=	6

В этом случае имеем две матрицы, состоящие из 6 столбцов и 11 строк.

Полученные результаты показывают, что применение распределения Бозе при построении гистограмм изменчивости существенно упрощает вычисления в отличие от других, требующих проведения громоздких (из-за огромного числа возможных сочетаний) операций по описанию матрицы сочетаний цветов (см. табл. 3). Также при вычислении количества сочетаний условных цветов с использованием других, отличных от Бозе, распределений вероятность того, что количество одного и того же цвета в ячейке будет целым числом, почти равна нулю.

В табл. 4 приведены рассчитанные значения гистограммы Бозе для изображения 12 (см. рис. 1). Матрица сочетаний включает две одномерные матрицы распределения (по строкам и столбцам) размерами 27 и 9 соответственно (при составлении таблицы учитывали только ненулевые значения).

На рис. 2 представлены гистограммы изменчивости 2, полученные при расчете гистограмм Бозе для изображений 1, 2, 5, 6, 11 – 14 (см. рис. 1). Для структур высокохромистых чугунов выявленные цвета (1, 5, 6, 10, 11, 15 и 16) входят во все три группы основных фаз. Очевидно, что при расчете изменчивости (изменчивость цвета в цвете каждой из групп фаз) точность возрастает (можно провести аналогию с более высоким разрешением на фотографии, когда ста-

Таблица 4. Расчетные значения гистограммы Бозе (ячейка 3×3 пикселя)

Выявленные варианты сочетаний одинаковых условных цветов (согласно приведенным схемам)				Количество сочетаний условного цвета, %
3	3	2	1	0,7
3	3	3	0	1,1
4	2	2	1	0,7
4	3	1	1	0,8
4	3	2	0	6,1
4	4	1	0	3,8
5	2	1	1	0,9
5	2	2	0	3,0
5	3	1	0	7,5
5	4	0	0	10,1
6	2	1	0	7,3
6	3	0	0	10,9
7	1	1	0	3,8
7	2	0	0	11,4
8	1	0	0	14,0
9	0	0	0	16,9

Таблица 5. Результаты анализа матриц скалярных произведений изменчивости цветов

Σ скалярных произведений по строкам значений изменчивостей цветов																Σ скалярных произведений по всей матрице	Фото (см. рис. 1)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
153	109	0	0	109	147	0	0	0	108	114	109	0	0	124	133	1105	1
155	109	0	0	103	152	0	0	0	112	117	113	0	0	127	130	1117	2
157	100	0	0	107	143	0	0	0	107	115	114	0	0	126	126	1094	3
106	0	0	0	104	111	0	0	0	92	105	0	0	0	99	92	708	4
111	0	0	0	95	107	0	0	0	93	105	0	0	0	99	95	705	5
114	0	0	0	92	114	0	0	0	92	109	0	0	0	100	95	716	6
115	0	0	0	97	108	0	0	0	90	103	0	0	0	89	105	707	7
127	0	0	0	98	124	0	0	0	90	111	0	0	0	85	104	740	8
109	0	0	0	92	115	0	0	0	94	120	0	0	0	84	108	720	9
110	0	0	0	97	139	0	0	0	102	148	0	0	0	91	111	797	10
118	0	0	0	115	132	0	0	0	110	113	0	0	0	101	117	805	11
117	0	0	0	112	131	0	0	0	118	123	0	0	0	95	122	817	12
110	0	0	0	123	144	0	0	0	124	122	0	0	0	89	115	827	13
107	0	0	0	116	136	0	0	0	124	128	0	0	0	87	117	815	14

Таблица 6. Гистограммы показателей изменчивостей 1 и 2 для изображения высокохромистого чугуна 11 (см. рис. 1)

Показатель изменчивости 1			Показатель изменчивости 2		
55,6	6,6	37,8	55,6	6,6	37,8
0,7	14,3	0,8	78,8	3,2	18,0
2,1	25,6	2,5	26,9	34,3	38,8
4,7	25,2	6,8	26,4	6,8	66,8
7,7	17,4	12,2			
10,2	9,9	16,8			
11,3	4,9	19,4			
10,0	2,1	17,1			
9,1	0,5	13,9			
44,2	0,1	10,6			

новятся видны имеющиеся незначительные отклонения в составе фазы).

Исследуемые области изображений имели значительные размеры (например, 1024×1024 пикселей). Размерность получаемой матрицы изменчивости цветов при этом велика. Расчет сочетаний заметно ускоряется, если при обходе ячеек вместо накопления новых сочетаний условных цветов использовать матрицу сочетаний, размерность которой обязательно начинается с нуля. Несмотря на то что операцию сортировки по возрастанию номеров элементов сочетаний, на которую затрачивается основное время, избежать не удастся, время расчета можно сократить за счет отбрасывания слишком большого числа сочетаний (однако это может привести к ошибкам при анализе мелкодисперсных структур).

Для уменьшения размера матрицы вычисляли скалярные произведения строк, исключая, таким образом, из гистограммы в гистограмму (изменчивость 2) цвета, которые не сочетались с аналогичными другими. Затем проводили симметризацию, вычисляя

отношение скалярных произведений и произведений суммы квадратов строк матрицы:

$$p_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{16} a_{ik} a_{jk}}{\sum_{k=1}^{16} a_{ik}^2 \sum_{k=1}^{16} a_{jk}^2},$$

где p_{ij} — показатель изменчивости; a_{ik} , a_{jk} — элементы полученной матрицы (i и j — номера строк и столбцов).

Для изображений структур высокохромистых чугунов (см. рис. 1) рассчитывали гистограммы изменчивостей 2 и представляли их в виде симметризованных матриц. Количество изменчивости для интервалов условных цветов каждой группы фаз оценивали с учетом полной размерности исследуемого изображения. При этом главную диагональ матриц составляли значения, соответствующие максимальному количеству изменчивости данного цвета, т.е. показывающие степень неоднородности распределения компонентов цвета в данной группе фаз по всему изображению.

Результаты анализа матриц скалярных произведений изменчивостей цветов представлены в табл. 5.

Из полученных обобщенных значений распределения степени неоднородности (изменчивости 2) групп фаз видно, что чем больше сумма квадратов скалярных произведений изменчивости цветов, тем четче проявляется неоднородная структура, значительней изменчивость цвета (тем из большего числа сочетаний цветов состоит их гистограмма вокруг каждой точки). При этом фотографии 1 – 3 отличаются от остальных наличием цветов изменчивостей 2 и 12, что можно объяснить более высокой чувствительностью при съемке с меньшим ускоряющим напряжением. По сумме элементов матрицы скалярных произведений видно, что зависимость от термообработки (фотографии 8 и 9) незначительна. Это свидетельствует о том,

Таблица 7. Параметры корреляционных уравнений для функций, описывающих исследуемые структуры, по трем группам фаз

Функция	Группа фаз			Значение свободного члена	Коэффициент при			Значимость группы фазы			$R_{\text{мн}}$
	1	2	3					1	2	3	
	Аргумент				a_1	a_2	a_3				
1	3	5	8	1,218	-0,220	-0,592	0,923	7,686	4,374	6,436	0,735
2	1	5	8	311,159	-23,807	-112,240	68,814	67,140	65,934	17,197	0,974
3	1	2	5	4,961	-0,288	-0,061	-1,408	23,274	2,130	24,453	0,725
4	1	7	8	139,568	10,981	-127,103	88,750	3,265	9,966	5,338	0,846
5	3	6	7	-1,740	-0,247	-0,202	1,773	108,113	2,743	259,285	0,985
6	1	7	8	-0,126	-0,110	1,058	-0,619	5,507	13,249	5,163	0,880
7	1	7	8	186,893	8,816	-139,479	86,990	3,008	15,848	6,731	0,922
8	1	7	8	640,165	33,075	-490,721	307,374	2,997	13,989	6,056	0,908
9	1	7	8	1016,090	53,130	-787,218	506,810	2,957	13,692	6,220	0,905
10	1	7	8	1971,483	101,098	-1511,631	964,750	2,946	13,856	6,196	0,907
11	3	5	8	0,934	-0,160	-0,494	0,749	6,148	4,431	6,238	0,659
12	3	5	8	0,779	-0,099	-0,307	0,474	4,354	3,230	4,529	0,583
13	1	7	8	333,356	17,581	-260,212	166,754	3,026	14,111	6,342	0,908
14	1	2	5	6,006	-0,360	-0,093	-1,735	27,824	3,039	28,567	0,817
15	2	6	7	397,019	2,878	30,600	-53,842	1,238	1,360	3,138	0,698
16	3	6	7	995,454	70,021	75,736	-463,003	37,776	2,048	76,068	0,933
17	3	6	7	2217,692	229,035	177,210	-1375,720	111,503	2,611	187,129	0,957
18	3	4	7	5824,508	724,095	-147,103	-3424,915	230,207	9,253	240,397	0,954
19	3	4	7	294,435	40,586	-7,034	-195,623	104,074	3,701	112,793	0,904
20	3	4	7	1177,311	162,511	-28,136	-782,850	104,371	3,703	112,989	0,904
21	3	4	7	1866,096	259,719	-41,393	-1256,102	111,931	3,458	122,137	0,906
22	3	4	7	3654,015	508,778	-81,786	-2457,718	114,834	3,566	125,011	0,908
23	3	4	7	588,296	81,153	-14,090	-390,967	103,706	3,701	112,288	0,904

что процессы, протекающие при быстрой кристаллизации сплава, в большей степени определяют его неоднородность.

В табл. 6 представлены гистограммы показателей изменчивостей 1 и 2 для ячеек 3×3 пикселя (9 точек) на примере изображения 11 (см. рис. 1).

В обеих матрицах: 1-й столбец — количество цветов (%) из группы феррита, приходящихся на остальные цвета; 2-й — из группы аустенита, 3-й — из группы карбидных фаз; 1-я строка — гистограмма цветов (характеризует процент каждого цвета) в выбранной области изображения.

Для определения значимых факторов (использовали в дальнейшем при построении корреляционных уравнений) по изменчивости 1 (см. табл. 6) сначала находили сумму значений в каждом столбце (строки 2 – 10 — изменчивости относительно каждой из девяти точек ячейки, например, 2-я строка — изменчивость, т.е. процент совпадения цветов во всех точках с цветом точки 1, относительно точки 1), затем делили ее на 100 и умножали на номер строки. Найденные три числа — средние значения изменчивостей по каждой из трех групп фаз. Далее умножали их на соответствующее значение 1-й строки (среднее значение цвета для данной группы фаз в выбранной области фотографии), деленное на 100 (в нашем случае 0,556, 0,066, 0,378, см. табл. 6). В итоге получили по изменчивости 1 четыре фактора (аргумента): три средних

обобщенных значения изменчивостей по группам фаз и их суммарное значение.

Для изменчивости 2 (см. табл. 6) значения матрицы (кроме 1-й строки) соответствуют средней изменчивости по группам фаз: феррита, аустенита и карбидов соответственно. Для определения факторов (аргументов) значения 1-го столбца (строка 2 – 4) суммировали построчно с удвоенными значениями 2-го и утроенными 3-го. Получили три аргумента (по количеству строк) — средние значения изменчивости 2 (цвета в цвете) для каждой группы фаз. Затем умножали их на соответствующее число 1-й строки (гистограммы цветов) и делили на 100. В итоге находили еще три числа — обобщенные средние значения изменчивости цвета в цвете для каждой группы фаз. Суммы по первой и второй тройкам дали еще два аргумента. Итого получили восемь аргументов (факторов).

Поскольку изменчивость цветов — критерий, оценивающий степень неоднородности сплава, определяли корреляционные связи такими функциями, как нейтральность, однородность и др. [8, 9]. Расчет вели по выборке изображений структур валковых высокохромистых чугунов, включающей 49 фотографий.

Для каждой фотографии функции содержат по восемь аргументов (табл. 7): 1, 2, 3 — средние обобщенные значения изменчивости группы цветов феррита аустенита и карбидов (по изменчивости 1); 4 — суммарный показатель по аргументам 1, 2 и 3; 5, 6, 7 —

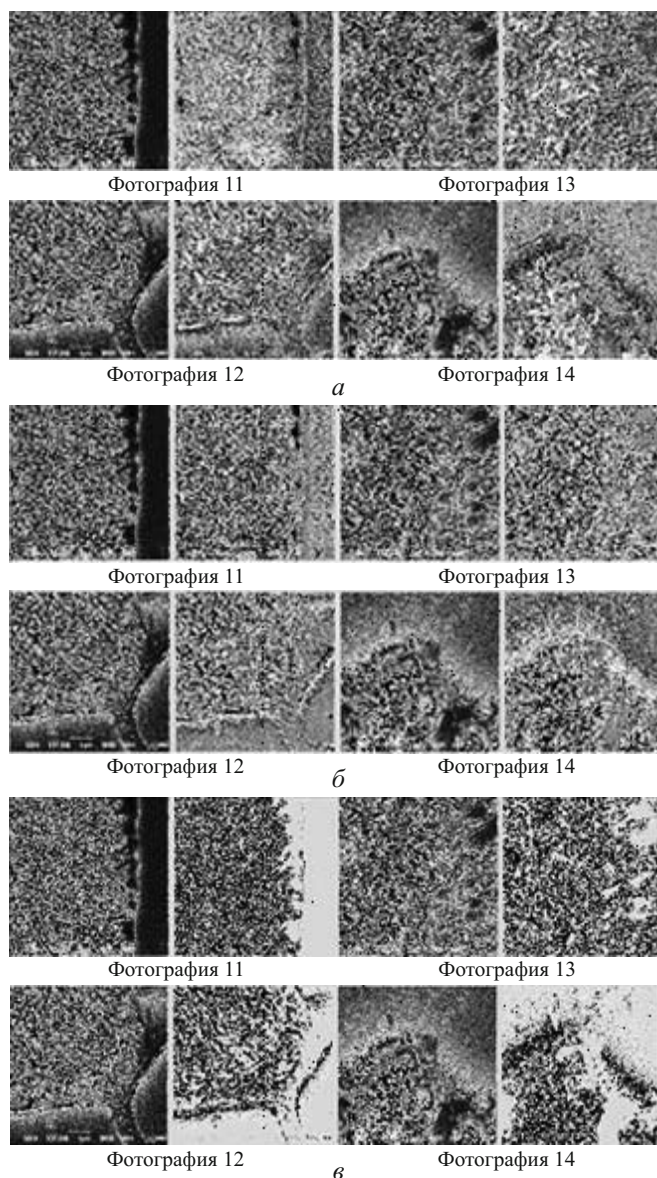


Рис. 3. Графическое представление гистограмм изменчивости цветов 2 (а) и абсолютных величин конечно-разностного лапласиана со значениями в интервалах 255 – 500 (б) и >500 (в) (слева — исходное фото, справа — расчетное изображение)

обобщенные средние значения изменчивости цвета в цвете в группе цветов фаз феррита, аустенита и карбидов (по изменчивости 2); 8 — суммарный показатель по аргументам 5, 6 и 7.

Из полученных корреляционных уравнений для функций, описывающих исследуемые структуры, по трем группам фаз (1 — феррит; 2 — аустенит; 3 — карбиды) отобрали те, которые имели максимальные коэффициенты множественной корреляции $R_{\text{мн}}$ (всего 23 функции): 1 — нейтральность; 2 — условный цвет; 3 — нейтральность под углом 90° ; 4 — разброс значений; 5, 6 — однородности горизонтальная и вертикальная; 7 — обобщенный градиент; 8 — лапласиан; 9, 10 — 3-й и 4-й лапласианы; 11, 12 — нейтральности 3-го и 4-го лапласианов; 13 — дивергенция; 14 — нейтральность дивергенции; 15 — дивергенция, >255;

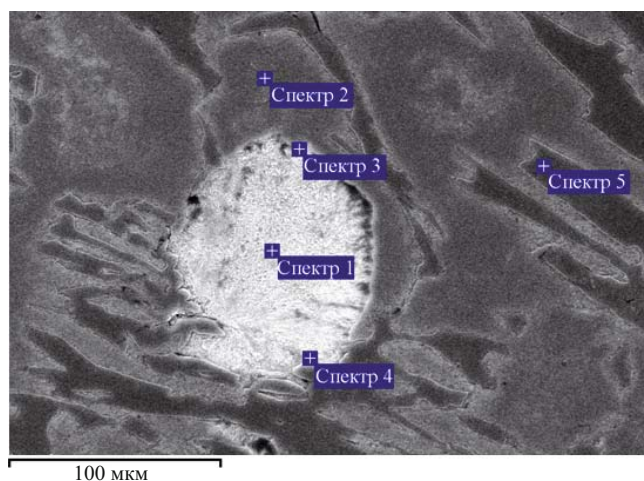


Рис. 4. Изображение микроstructures высокохромистого сплава с указанием зон анализа

16 — лапласиан, >255; 17, 18 — 3-й и 4-й лапласианы, >255; 19, 20 — отношение цвета к обобщенному градиенту; 21, 22, 23 — отношение цвета к 3-му и 4-му лапласианам, дивергенции (см. табл. 7).

Видно, что введенные параметры изменчивости, оценивающие разброс по концентрации компонентов в выявляемых фазах одинакового состава, имеют тесную корреляционную связь со всеми рассматриваемыми функциями, выражаемую через абсолютное значение лапласиана, характеризующее структурную неоднородность по горизонтали.

На рис. 3 приведены графические представления гистограмм изменчивости 2 и абсолютных величин конечно-разностного лапласиана для областей (размерность 3×3) изображений 11 – 14 (см. рис. 1). Для визуализации фаз с определенным интервалом разброса по концентрации компонентов использовали значения гистограмм изменчивости, ограниченные фильтром 0,125 (см. рис. 3, а). Для гистограмм абсолютных величин конечно-разностного лапласиана, описывающего диффузию химических элементов, — фильтры, при которых выводимые значения находились в интервалах 255 – 500 (см. рис. 3, б) и больше 500 (см. рис. 3, в).

Видно, что существенные значения изменчивости цвета связаны с группой фаз феррита с повышенным содержанием углерода (например, бейнитом [11]), имеющей высокие значения абсолютной величины лапласиана. Это очевидно, поскольку высокая ликвация в высокохромистых чугунах при кристаллизации не связана с карбидообразующими химическими элементами, наибольшее количество которых сконцентрировано в карбидных фазах.

Для оценки степени неоднородности исследуемых структур измерили микротвердость образцов и провели их микрорентгеноспектральный анализ. На рис. 4 представлено изображение микроstructures с отмеченными областями измерения. Результаты приведены в табл. 8.

На рис. 5 показана связь степени неоднородности, выраженной при помощи критерия изменчивости 2, с выявленными группами фаз (а также интервалами условных цветов), иллюстрирующая неоднородность распределения концентрации компонентов (для структуры, представленной на рис. 4).

Измерения микротвердости непротравившейся области, идентифицированной при металлографическом анализе как аустенит, показали, что разброс значений достигает 11,6 % (см. табл. 8). Это свидетельствует о значительной неоднородности этой структурной составляющей.

Микрорентгеноспектральный анализ зоны спектра 2 (см. рис. 4) выявил, %: 16,5 — Cr, 0,4 — V, 0,8 — Mo. При содержании углерода в интервале 2,7 – 3,0 % это указывает на присутствие карбидных фаз в исследуемой области, что подтверждает и математический анализ изображения (отсутствуют сочетания интервалов условных цветов, относящиеся только к группе фаз аустенита). Были установлены три группы сочетания фаз: 4, 6 и 7 (см. табл. 1), включающие интервалы условных цветов аустенита. Отклонения в степени неоднородности (изменчивость 2 для интервала условного цвета 6, соответствующего группе фаз феррита) в сочетании групп фаз под номером 4 достигали 71 % (см. табл. 1, рис. 5).

Известно [16], что образовавшаяся в результате дисперсионного твердения феррито-карбидная смесь в границах аустенитного зерна имеет разброс значений микротвердости по его объему вследствие переменного состава легирующих элементов в исследуемом чугуна. Исследования выявили определенный разброс значений в локальных зонах по всему зерну. Об этом свидетельствуют результаты анализа металлографического изображения (сочетания групп фаз 3 и 5, частично 6 и 7, см. рис. 5). Так, разброс значений микротвердости при анализе группы карбидов составил 23 % (см. табл. 8, спектр 5). Это говорит о степени неоднородности карбидной фазы (см. рис. 5, интервал условного цвета 6 в группе сочетания фаз 1), величина изменчивости 2 при этом достигает 81 % (более полные исследования неоднородности карбидной фазы в высокохромистых чугунах приведены в [13]).

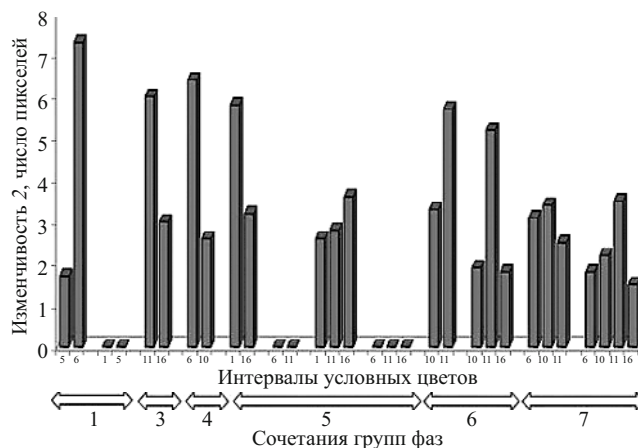


Рис. 5. Диаграмма, иллюстрирующая неоднородность распределения концентрации компонентов (ячейки 3 × 3 пикселей)

Таким образом, дополнена разработанная ранее методика исследования фазового состава и оценки неоднородности в гетерогенных сплавах с использованием оптико-математического анализа. При помощи параметра изменчивости, описывающего локальное распределение условных цветов и сочетания фаз, определена степень неоднородности по концентрации компонентов внутри выявленных фаз даже одинакового типа. Предложен подход для описания фазового состава гетерогенного сплава на примере высокохромистого чугуна.

Полученные данные показывают, что гистограммы изменчивости 1 дают наибольшие коэффициенты корреляции. Очевидно, что при расчете изменчивости 2 (изменчивость цвета в цвете) точность возрастает.

При применении только математического анализа металлографических изображений для исследования структур невозможно учесть в полной мере все факторы, влияющие на визуальное изображение (например, такие как различная ориентация структурных составляющих в области анализируемого сечения сплава, оптические эффекты при различных методах и режимах получения изображения и др.). Предложенный подход можно использовать, во-первых, в качестве экспресс-анализа, а во-вторых, более точного изучения структурных компонентов в локальных областях гетерогенного сплава с учетом термодинамических

Таблица 8. Результаты исследования структуры методами микрорентгеноспектрального анализа (% масс.) и измерения микротвердости

Спектр	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Cu	Микротвердость, кН/мм ² (при нагрузке 0,49 Н в области зоны спектра)
1	0,90	0,00	9,00	0,95	86,80	1,30	0,70	0,35	2,100 – 2,200
2	0,70	0,40	16,50	0,90	79,20	1,20	0,80	0,10	6,980 – 7,790
3	0,90	0,10	8,50	0,60	86,90	1,70	0,50	0,60	1,620 – 1,800
4	1,20	0,20	6,80	1,00	87,80	1,60	0,90	0,50	2,330 – 2,640
5	0,00	1,30	47,80	1,10	48,00	0,00	1,30	0,00	10,220 – 12,500
Макс.	1,20	1,30	47,80	1,10	87,80	1,70	1,30	0,60	
Мин.	0,00	0,00	6,80	0,60	79,20	0,00	0,50	0,00	

процессов, происходящих при его кристаллизации и термообработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скобло Т. С., Белкин Е. Л., Ключко О. Ю. Обоснование применения понятий уравнений гидродинамики Навье – Стокса для анализа металлографических изображений: сборник / VII Международная научно-практическая конференция. Сб. материалов. Т. 21. — Przemysl, 2011. С. 94 – 96.
2. Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Белкин Е. Л. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 6. С. 35 – 42.
3. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L. Structure of High-Chromium Cast Iron / Steel in Translation. 2012. Vol. 42. N 3. P. 261 – 268.
4. Тришевский О. И., Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Белкин Е. Л. Исследования микроструктур гетерогенных сплавов методом математического анализа при помощи сочетаний условных цветов и абсолютных значений лапласианов / Промышленность в фокусе. 2015. № 7(31). С. 52 – 56.
5. Скобло Т. С., Сидашенко А. И., Рыбалко И. Н. и др. Методика математической оценки структурообразования при наплавке восстановленного слоя изделия / Вісник ХНТУСГ. 2013. Вип. 133. С. 58 – 68.
6. Скобло Т. С., Сидашенко А. И., Рыбалко И. Н. и др. Розробка способу комбінованого зміцнення поршневих кілець / Вісник ХНТУСГ. 2014. Вип. 146. С. 62 – 68.
7. Скобло Т. С., Сидашенко А. И., Александрова Н. М., Ключко О. Ю. и др. Производство и применение прокатных валков. Справочник. — Харьков: ЦД № 1, 2013. — 572 с.
8. Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Белкин Е. Л. Математическая оценка особенностей структурообразования высоколегированных чугунов / Материаловедение. 2014. № 8. С. 6 – 11.
9. Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Белкин Е. Л. и др. Особенности износа ножей для переработки сахарной свеклы / Международная научно-практическая конференция. Сб. тр. — Шымкент (Казахстан), 2013. С. 185 – 197.
10. Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Белкин Е. Л. Математическая модель зависимости микротвердости структурных составляющих термообработанных гетерогенных сплавов / Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК». Сб. материалов. — Минск: БГАТУ. С. 320 – 326.
11. Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Белкин Е. Л. и др. Разработка методов оценки структуры рельсов, закаленных ТВЧ / Сталь. 2014. № 3. С. 74 – 82.
12. Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Белкин Е. Л. и др. Исследование особенностей структурообразования в гетерогенных сплавах / Промышленность в фокусе. 2016. № 3(40). С. 53 – 58.
13. Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Белкин Е. Л. и др. Оценка степени неоднородности карбидов гетерогенных сплавов методом оптико-математического анализа при помощи изменчивости условных цветов / Вісник ХНТУСГ. 2016. Вип. 168. С. 174 – 186.
14. Зыкова А. П., Попова Н. А., Курзина И. А. Особенности формирования структурно-фазового состояния, дислокационная структура и внутренние напряжения высокохромистого чугуна, модифицированного ультрадисперсными частицами / Современное материаловедение: материалы и технологии новых поколений. Сб. тр. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. С. 14 – 18.
15. Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Grebeneva A. V. Structure, phases and alloying elements distribution of Nikorim (high-temperature strength Ni-Cr alloy) in its cast form / New Technol. Achiev. Metallurgy Mater. Eng. Prod. Eng. 2013. N 31(2). P. 99 – 105.
16. Ключко О. Ю. Влияние низкотемпературной циклической термообработки на структурную неоднородность в массивных отливках

из высокохромистого комплекснолегированного чугуна / Вісник ХНТУСГ. 2010. Вип. 101. С. 73 – 77.

REFERENCES

1. Skoblo T. S., Belkin E. L., Klochko O. Yu. Application justification of the concepts of fluid dynamics Navier – Stokes equations for the analysis of metallographic images / VII Int. Sci. and Pract. Conf. Coll. of materials. Vol. 21. — Przemysl, 2011. P. 94 – 96 [in Russian].
2. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L. The use of computer analysis of metallographic images in the study of high-chromium cast iron structure / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 6. P. 35 – 42 [in Russian].
3. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L. Structure of high-chromium cast iron / Steel in Translation. 2012. Vol. 42. N 3. P. 261 – 268.
4. Trishevskii O. I., Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L. Studies of the heterogeneous alloys microstructures by means of mathematical analysis using the conventional combinations of colors and absolute values of Laplacians / Promyshl. v Fokuse. 2015. N 7(31). P. 52 – 56 [in Russian].
5. Skoblo T. S., Sidashenko A. I., Rybalko I. N., et al. Methods of mathematical evaluation of structure formation at deposition of the reconstructive product surface / Visnik KhNTUSG. 2013. Issue 133. P. 58 – 68 [in Russian].
6. Skoblo T. S., Sidashenko A. I., Rybalko I. N., et al. Development of piston rings combined strengthening method / Visnik KhNTUSG. 2014. Issue 146. P. 62 – 68 [in Ukrainian].
7. Skoblo T. S., Sidashenko A. I., Aleksandrova N. M., Klochko O. Yu., et al. Production and use of casting rollers. — Kharkov: TsD N 1, 2013. — 572 p. [in Russian].
8. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L. Mathematical evaluation of the features of heavily alloyed irons structure / Materialovedenie. 2014. N 8. P. 6 – 11 [in Russian].
9. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L., et al. Features of sugar beet knives wearing / Int. Sci. and Pract. Conf. Coll. of materials. — Shymkent (Kazakhstan), 2013. P. 185 – 197 [in Russian].
10. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L. Mathematical model of structural components microhardness of heat-treated heterogeneous alloys compounds / International scientific-practical conference “Modern problems of development of new equipment, technologies, organization of technical service in the agro-industrial complex.” Collection of materials. — Minsk: BGATU. P. 320 – 326 [in Russian].
11. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L., et al. Development of methods for evaluation the structure of rails hardened with HFC / Stal'. 2014. N 3. P. 74 – 82 [in Russian].
12. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L., et al. Study of the structure formation features in heterogeneous alloys / Promyshl. v Fokuse. 2016. N 3(40). P. 53 – 58 [in Russian].
13. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L., et al. Assessment of the degree of heterogeneity in heterogeneous carbide alloys using optical mathematical analysis with conventional color variation / Visnik KhNTUSG. 2016. Issue 168. P. 174 – 186 [in Russian].
14. Zykova V. Z., Popova N. A., Kurzina I. A. Peculiarities of the formation of structure-phase state, the dislocation structure and internal stresses in high-chromium cast iron modified with ultradisperse particle / Modern materials science: materials and technologies of new generations. Collection of works. — Tomsk: Izd. Tomsk. Politekh. Univ., 2014. P. 14 – 18 [in Russian].
15. Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Grebeneva A. V. Structure, phases and alloying elements distribution of Nikorim (high-temperature strength Ni-Cr alloy) in its cast form / New Technol. Achiev. Metallurgy Mater. Eng. Prod. Eng. 2013. N 31(2). P. 99 – 105.
16. Klochko O. Yu. Effect of low-temperature thermal cycling on structural heterogeneity within massive castings from high-chromium complex-iron / Visnik KhNTUSG. 2010. Issue 101. P. 73 – 77 [in Russian].