

УДК 669.017.3

DOI:10.30977/BUL.2219-5548.2018.80.0.80

## НОВАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУР, МОДЕЛИРОВАНИЕМ ИХ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Клочко О.Ю., Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

**Аннотация.** Представленная работа посвящена разработке и усовершенствованию новых методов исследования структур, позволяющих проводить моделирование изменения локальной неоднородности структурных составляющих в результате задаваемых различных внешних воздействий, а также значительно ускорить производимые компьютерные расчеты, без потери качества проводимой оценки.

**Ключевые слова:** металлографическое изображение, оптико-математический анализ, железоуглеродистый гетерогенный сплав, структурная неоднородность, инвариант.

### Введение

Обеспечение надежной работы и повышение эксплуатационной стойкости изделий и деталей из железоуглеродистых сплавов, применяемых в машиностроении, работающих в условиях износа, больших ударных и термоциклических нагрузок, определяется степенью деградации металла с развитием неоднородности фаз, их повреждаемостью. Такие процессы связаны с изменением дислокационной структуры, накоплением деформаций и развитием диффузионных процессов при эксплуатации. При этом деградация структуры сопровождается изменением плотности дислокационной структуры и неоднородностью не только рядом расположенных зерен, но и в пределах одного зерна. Исследование структурной неоднородности, возникающей в результате этих явлений, разработка новых и повышение точности используемых методик анализа является одной из важнейших задач при поиске путей повышения эксплуатационной стойкости таких изделий и прогнозирования их надежности.

### Анализ публикаций

В опубликованных ранее работах [1–4] были проведены исследования изменения дислокационной структуры и ее плотности, в условиях воздействия напряжений, оценена возникающая в результате этого структурная неоднородность в высокоуглеродистых гетерогенных сплавах, путем оптико-математического анализа металлографических изображений. Методика применяемого компьютерного исследования основана на гидродинамических аналогиях с применением

уравнений Навье-Стокса, происходящих при формировании фаз (за счет диссипации энергии в результате диффузионного процесса, изменения плотности) [5, 6]. Оценку производили согласно расположению вычисляемых значений на изображении металлографической структуры, оцифрованном в формат *.bmp*. Изображение разбивалось на ячейки размером 3×3 пикселя. При этом проводили оценку неоднородности, определяющей интенсивность изменения дислокационной структуры с определением плотности распределения.

В качестве критериев, описывающих изменения дислокационной структуры и ее плотности, впервые были использованы энергетические параметры, такие как функции мощности диссипации энергии ( $M$ ) и напряжений ( $S$ ):

$$M = D(x, y) \cdot L(x, y), \quad (1)$$

$$S = D(x, y) - L(x, y), \quad (2)$$

представленные в виде произведения и разности дивергенции и лапласиана функции  $C(x, y)$ , где  $x$  и  $y$  – координаты рассматриваемой точки металлографического изображения. Здесь

$$D(x, y) \equiv \operatorname{div} C(x, y) = \frac{\partial C(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial C(x, y)}{\partial y}, \quad (3)$$

$$L(x, y) \equiv \Delta C(x, y) = \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial y^2}. \quad (4)$$

$C(x,y)$  в конечно-разностном представлении имеет вид матрицы  $3 \times 3$

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} c_{i-1,j-1} & c_{i-1,j} & c_{i-1,j+1} \\ c_{i,j-1} & c_{i,j} & c_{i,j+1} \\ c_{i+1,j-1} & c_{i+1,j} & c_{i+1,j+1} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Обработку такой матрицы выполняли путем последовательного сканирования каждого ее пиксель, задавая его как среднюю точку, находящуюся внутри ячейки заданного размера ( $3 \times 3$ ). В качестве координаты приняли пиксел изображения (относительно центрального элемента  $c_{ij}$ :  $i$  – номер строки,  $j$  – номер столбца). Где  $c_{ij}$  – код условного цвета при оцифровке фотографии. При этом весь диапазон условных цветов от 0 до 255 разбивали на 15 интервалов, кратных 17 ( $255/17$ ). Конечно-разностные представления  $D(x,y)$  и  $L(x,y)$  имеют вид:

$$D_{ij} = c_{i,j-1} + c_{i-1,j} - 2c_{i,j}, \quad (6)$$

$$L_{ij} = c_{i,j-1} + c_{i-1,j} + c_{i,j+1} + c_{i+1,j} - 4c_{i,j}. \quad (7)$$

Первый множитель в выражении (1) описывает меру несжимаемости (плотности фрагмента изображения, зоны уплотнения и разряжения), второй множитель описывает диффузию химических элементов.

Для оценивания степени локальной неоднородности, определяемой изменением дислокационной структуры, рассчитывали средние значения абсолютной величины мощности диссипации энергии на всем изображении каждой исследуемой фотографии. В этом случае, поскольку при деформации энергетическое состояние металла является неравновесным, при оценке значения данного параметра принимали значения с противоположными знаками, где положительному соответствовали состояния увеличения плотности дислокаций (сжатия), отрицательному – разрежения (зоны сброса напряжений). Также были найдены абсолютные значения мощности диссипации, характеризующие протекающий процесс в целом.

#### Цель и постановка задачи

Целью работы являлись разработка и усовершенствование новых методов исследования структур, позволяющих проводить моделирование изменения локальной неоднородности структурных составляющих в резуль-

тате задаваемых различных внешних воздействий, а также значительно сократить количество факторов в корреляционных зависимостях для упрощения производимых расчетов, без потери качества проводимой оценки.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: оценить локальную неоднородность различных фаз, изучить степень изменения дислокационной структуры высокоуглеродистых сплавов и оценить ее плотность распределения, в условиях воздействия напряжений, формируемых в результате термической обработки.

#### Материалы и методики исследований

Для анализа использовали металлографические изображения микроструктур сварного шва хромистой стали 09ХМФ и 15Х1М1Ф после отжига (рис. 1, структуры 1, 2, 3, 4) и высокохромистого чугуна (16–18 % Cr, 2,7–2,9 % C) в литом состоянии и после низкотемпературного циклического отжига [7] (рис.1, структуры 5, 6, 7, 8). Фотографии микроструктур были изучены с использованием разработанных нами [8] методик оптико-математического компьютерного анализа.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Представим исследуемые энергетические параметры в виде:

$$M_{ij} = (c_{i,j-1} + c_{i-1,j} - 2c_{i,j}) \cdot (c_{i,j-1} + c_{i-1,j} + c_{i,j+1} + c_{i+1,j} - 4c_{i,j}), \quad (8)$$

$$S_{ij} = (c_{i,j-1} + c_{i-1,j} - 2c_{i,j}) - (c_{i,j-1} + c_{i-1,j} + c_{i,j+1} + c_{i+1,j} - 4c_{i,j}), \quad (9)$$

Обозначим

$$a_{ij} = c_{ij-1} + c_{i-1j}, \quad (10)$$

$$b_{ij} = c_{ij-1} + c_{i-1j} + c_{ij+1} + c_{i+1j}. \quad (11)$$

Тогда, согласно (7), выразим функцию мощности диссипации энергии как

$$M_{ij} = (a_{ij} - 2c_{ij}) \cdot (b_{ij} - 4c_{ij}). \quad (12)$$

Из (12) следует, что функция мощности диссипации энергии зависит от трех величин. Кроме того, если в правой части целые числа, то и функция мощности является целым числом. Будем считать, что  $M_{ij}, a_{ij}, b_{ij}$  известны, а  $c_{ij}$  – неизвестно.

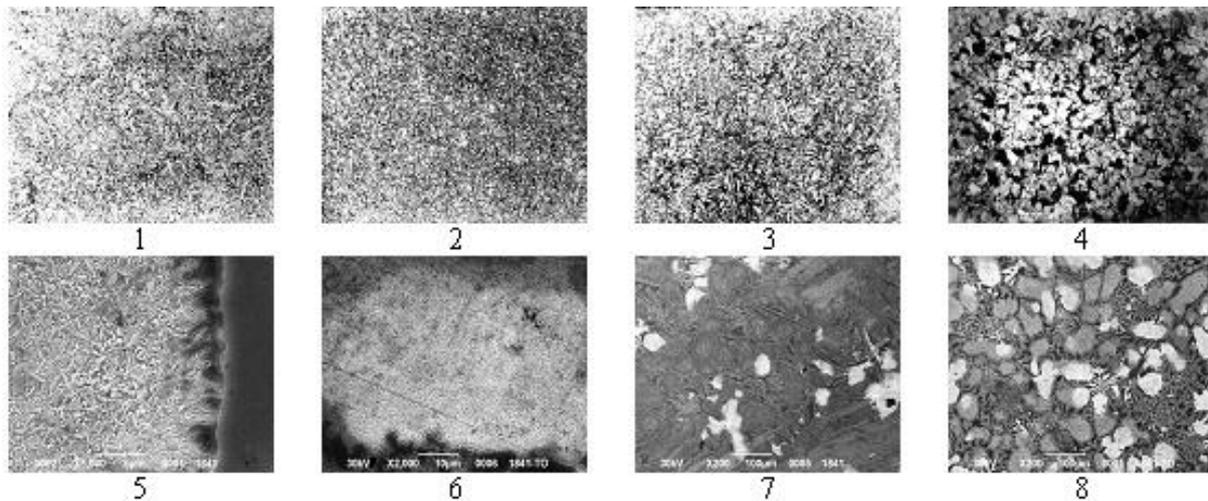


Рис. 1. Микроструктуры сплавов: 09ХМФ: 1 – металл сварного шва, x100; 2 – зона термического влияния ЗТВ (перекристаллизация, зернистый бейнит), x100; 15Х1М1Ф: 3 – ЗТВ (неполная перекристаллизация), x300; 4 – металл сварной после длительной эксплуатации в условиях ползучести (феррито-карбидная смесь, поры), x300; высокохромистый валковый чугуи: 5 – граница зерна с карбидной фазой, литое состояние, x5000; 6 – граница зерна с карбидной фазой, после ТО, x2000; 7 – общий вид, литое состояние, x200; 8 – общий вид, после ТО, x200

Приведем (12) к виду

$$8c_{ij}^2 - 2c_{ij}(2a_{ij} + b_{ij}) + a_{ij}b_{ij} - M_{ij} = 0. \quad (13)$$

Решением данного квадратного уравнения будет

$$c_{ij(1)} = \frac{2a_{ij} + b_{ij} - \sqrt{(2a_{ij} - b_{ij})^2 + 8M_{ij}}}{8}, \quad (14)$$

$$c_{ij(2)} = \frac{2a_{ij} + b_{ij} + \sqrt{(2a_{ij} - b_{ij})^2 + 8M_{ij}}}{8}. \quad (15)$$

Согласно [9], с целью определения максимального значения по абсолютной величине отрицательной мощности, представим при  $M = 0$ :  $c_{ij(1)} = \frac{b}{4}$  или  $c_{ij(2)} = \frac{a}{2}$ . Тогда, исходя из (11), (12)

$$M_{ij} \geq -\frac{(2a_{ij} - b_{ij})^2}{8}. \quad (16)$$

Следует отметить, что в силу целочисленности  $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}$  величина  $M_{ij}$  не может принимать произвольные значения, а только те, для которых, как следует из (13), (14), корень является целым числом. Формулы (14), (15) показывают, что  $8M_{ij}$ , не всегда является квадратом целого числа. Однако само

подкоренное выражение является квадратом целого числа.

$$M_{ij} = (a_{ij} - 2c_{ij})(b_{ij} - 4c_{ij}). \quad (17)$$

Проведем следующие преобразования, записав подкоренное выражение в виде

$$(2a_{ij} - b_{ij})^2 + 8(a_{ij} - 2c_{ij})(b_{ij} - 4c_{ij}) = (8c_{ij} - 2a_{ij} - b_{ij})^2. \quad (18)$$

Введем следующие обозначения

$$S_{ij} = (2a_{ij} - b_{ij}) = 2D_{ij} - L_{ij}, \quad (19)$$

$$M_{ij} = 8(a_{ij} - 2c_{ij})(b_{ij} - 4c_{ij}) = 8D_{ij}L_{ij}, \quad (20)$$

$$t_{ij} = (8c_{ij} - 2a_{ij} - b_{ij}) = -(2D_{ij} + L_{ij}). \quad (21)$$

По аналогии с таким понятием, как пифагоровы числа [10], рассмотрим упорядоченный набор, состоящий из трех действительных целых чисел, вычисляемых по формулам (19)–(21). Введем понятие тройки таких чисел. Поскольку величины, образующие такую тройку, вычисляются при помощи параметров  $D_{ij}$  и  $L_{ij}$ , через которые была выражена мощность диссипации энергии (8), назовем ее М-тройкой. Для дальнейшего упрощения приведем матрицу исследуемых пара-

метров, задаваемых на выделенной области исследуемого металлографического изображения, к квадратичному виду. Согласно [11] для этих М-троек имеет место тождество

$$(2D_{ij} - L_{ij})^2 + 8D_{ij}L_{ij} = (2D_{ij} + L_{ij})^2, \quad (22)$$

где величина  $t_{ij}^2$  является собственным значением определителя квадратной матрицы, образованной энергетическими параметрами

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} 4(a_{ij} - 2c_{ij}) & (2a_{ij} - b_{ij}) \\ (b_{ij} - 2a_{ij}) & 2(b_{ij} - 4c_{ij}) \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Для перехода к более простой или удобной для анализа математической модели, перейдем к инвариантам преобразования координат рассматриваемой матрицы (23), задаваемой на выделяемой области металлографического изображения. Если бы имелась в явном виде квадратичная форма от координат, описывающая структуру, то нашлось бы такое преобразование координат, которое бы переводило эту форму к диагональному виду. Однако, в результате исследований, в большинстве случаев удалось перевести квадратную матрицу только к треугольной

форме. В результате стандартных преобразований приведем квадратную матрицу (23) к матрице преобразования координат в треугольной форме

$$A_x = \begin{pmatrix} 0 & -(2a + b - 8c) \\ (2a + b - 8c) & 2(2a + b - 8c) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & (2D + L) \\ -(2D + L) & 2(2D + L) \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Определитель такой преобразованной матрицы равен  $2D + L$ .

Ввод упорядоченного набора чисел (М-тройки) может позволить, изменяя и задавая определенные энергетические параметры (перестановкой пикселей на исследуемом изображении), путем решения матрицы, такой как (24), при помощи системы линейных уравнений проводить моделирование изменения локальной неоднородности структурной составляющей в результате задаваемых различных внешних воздействий.

Для всех возможных сочетаний значений троек  $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}$  (5), (10), (11) для исследуемых металлографических фотографий (рис. 1) были построены инварианты М-троек (19)–(21).

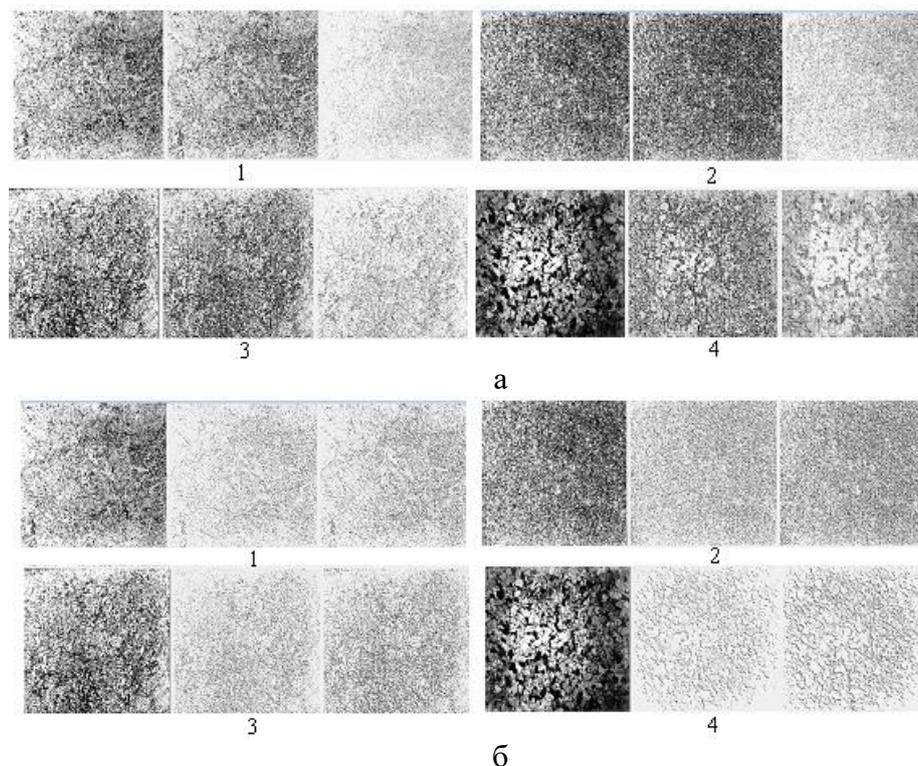


Рис. 2. Изменение инварианта функции при повороте пикселей изображений 1, 2, 3, 4 (рис. 1) на  $45^\circ \pm 5^\circ$ : а – напряжений; б – мощности. Слева – исходные фотографии; посередине – отрицательные значения инвариантов функции; справа – положительные

На рис. 2 представлены рассчитанные изображения инвариантов 2 составляющих М-тройки: функций напряжения (а) и мощности диссипации энергии (б). При этом оценивали изменения инвариантов функций при повороте пикселей изображений 1, 2, 3, 4 (рис.1) на  $45^\circ \pm 5^\circ$ .

Было установлено, что функция мощности диссипации энергии  $\sim$  в 97 % случаев неотрицательна на фотографиях различных структур. То есть она играет роль интенсивности почти на всей фотографии. Установлено, что большие абсолютные значения наблюдаются при преобразовании функции напряжений. Между тем, полученные инварианты полностью соответствуют начальным изображениям структур.

В проведенных расчетах для всех структур номер кода цвета  $c_{ij}$  изменяется от 1 до 16, параметр  $a_{ij}$  – от 2 до 32, параметр  $b_{ij}$  – от 4 до 64. При этом минимальный номер функции мощности – 112, максимальный – 1800. Это свидетельствует о точности проведенной оценки. При этом установлено, что множество функций мощностей образует спектр, где присутствуют пропуски в значениях. Можно предположить, что такие значения указывают на равновесное состояние системы в данной локальной области.

Впервые были проведены исследования по моделированию исследуемых структур при повороте оси для пикселей изображения на различные углы. Для этого были рассмотрены М-тройки (19)–(21), а также их квадра-

тичная форма для приведения матрицы преобразования координат к диагональному виду

$$F = x^2 \cdot S + xy \cdot M + y^2 \cdot t, \quad (25)$$

$$F_1 = x^2 \cdot M + xy \cdot S + y^2 \cdot t, \quad (26)$$

$$F_2 = x^2 \cdot S + xy \cdot S + y^2 \cdot M. \quad (27)$$

где (25) – квадратичная форма для функции мощности ( $M$ ); (26) – квадратичная форма функции напряжений ( $S$ ); (27) – квадратичная форма определителя матрицы ( $t$ );  $x$  и  $y$  – координаты рассматриваемой точки металлографического изображения.

В результате проведенных расчетов оказалось, что в подавляющем большинстве случаев для инварианта (25) при повороте на  $45^\circ$  произведение  $xy$  обращается в 0. То есть такая форма матрицы принимает диагональный вид. Но не точно при  $45^\circ$ , а наблюдается незначительное влияние параметров  $S$  и  $t$ . Для (26) и (27) угол поворота в подавляющем большинстве случаев близок к отрицательному. Однако в случаях, когда наблюдается отклонение от  $45^\circ$  для зависимости (25), тогда отмечается и ненулевой поворот для (26) и (27). Аналогичные исследования, проведенные для других структур, а также спектра излучения Солнца, дают похожий результат.

Таблица 1 – Число пикселей (%), соответствующих углам поворота функции мощности

| М-тройка: $s, M, t$         |      |      |      |      |      |      |      |                             |      |      |      |      |      |      | М-тройка:<br>$M, t, s$<br>(остаток) |      | $\Sigma$ -<br>ый<br>% | Структу-<br>ра                   |    |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|-------------------------------------|------|-----------------------|----------------------------------|----|
| $s \neq t$                  |      |      |      |      |      |      |      |                             |      |      |      |      |      |      | $M = t;$<br>$s = t$                 | 23   |                       |                                  | 90 |
| отрицательные углы поворота |      |      |      |      |      |      | 0    | положительные углы поворота |      |      |      |      |      |      |                                     |      |                       |                                  |    |
| 32                          | 38   | 41   | 42   | 43   | 44   | 45   | 0    | 32                          | 38   | 41   | 42   | 43   | 44   | 45   | 23                                  | 90   |                       |                                  |    |
| 01,5                        | 01,5 | 01,5 | 01,5 | 04,6 | 11,0 | 25,9 | 01,5 | 01,5                        | 01,5 | 01,5 | 01,5 | 04,6 | 11,0 | 25,9 | 03,1                                | 00,2 | 100                   | Случайно<br>сгенери-<br>рованная |    |
| 04,3                        | 04,3 | 04,2 | 04,1 | 10,5 | 13,6 | 05,3 | 03,2 | 03,2                        | 03,0 | 02,9 | 02,7 | 06,6 | 10,4 | 08,6 | 09,1                                | 03,8 | 100                   | 1                                |    |
| 02,8                        | 02,7 | 02,7 | 02,9 | 08,1 | 14,7 | 10,9 | 02,2 | 02,3                        | 02,4 | 02,4 | 02,3 | 06,7 | 13,8 | 12,4 | 07,8                                | 02,8 | 100                   | 2                                |    |
| 04,5                        | 04,2 | 04,2 | 04,1 | 09,9 | 12,3 | 03,4 | 03,3 | 03,4                        | 03,5 | 03,5 | 03,2 | 08,1 | 12,1 | 04,6 | 09,8                                | 05,7 | 100                   | 3                                |    |
| 05,2                        | 05,7 | 05,2 | 04,5 | 10,5 | 07,3 | 01,4 | 04,4 | 05,6                        | 06,5 | 05,6 | 04,8 | 09,3 | 06,4 | 01,8 | 11,5                                | 04,1 | 100                   | 4                                |    |
| 03,8                        | 02,6 | 01,0 | 00,3 | 03,5 | 04,2 | 16,5 | 00,9 | 00,5                        | 01,3 | 02,3 | 03,0 | 01,4 | 06,8 | 14,4 | 16,0                                | 21,5 | 100                   | 5                                |    |
| 02,3                        | 02,0 | 01,1 | 00,3 | 04,6 | 06,6 | 25,6 | 01,0 | 00,3                        | 01,0 | 02,0 | 02,6 | 02,0 | 09,1 | 22,3 | 12,6                                | 04,4 | 100                   | 6                                |    |
| 03,8                        | 04,4 | 03,2 | 01,0 | 06,2 | 07,4 | 07,9 | 00,5 | 00,9                        | 02,0 | 02,7 | 05,6 | 02,6 | 10,2 | 05,6 | 17,5                                | 18,6 | 100                   | 7                                |    |
| 03,3                        | 03,2 | 01,7 | 00,5 | 05,8 | 06,6 | 16,1 | 01,3 | 00,9                        | 02,0 | 03,3 | 03,8 | 02,7 | 10,2 | 12,9 | 16,3                                | 09,6 | 100                   | 8                                |    |

В табл. 1 приведены данные расчетов, согласно формулам (19)–(21), значений квадратичной формы из М-троек (25) при повороте через  $1^\circ$  для отрицательных и положительных углов поворота для случайно сгенерированной структуры, а также металлографических изображений исследуемых структур (рис. 1). Независимо от фотографий получается 16 значений (8 диапазонов). Для каждой фотографии меняется число пикселей (%) в этих диапазонах. При том, что повороты на  $23^\circ$  и  $90^\circ$  соответствуют разбиению квадратичной формы с другим составом М-троек значений параметров: не  $S, M, t$ , а  $S, t, M$ .

Угол поворота на  $90^\circ$  и  $23^\circ$ , при котором  $s = t$ , соответствовал бы тангенсу, будет равен бесконечности. Также следует заметить, что при повороте на  $0^\circ$  мы подразумевали поворот между  $0^\circ$  и  $1^\circ$ , поскольку число пикселей, соответствующих углам поворота для всех параметров, рассчитывали с точностью в  $1^\circ$ .

При анализе полученных результатов установлено, что, например, для изображений высокохромистого чугуна в литом состоянии (структура 5, табл.1) поворот на  $45^\circ$  выявляет  $\sim$  в 1,5 раз меньше % числа пикселей, чем после отжига (структура 6, табл.1).

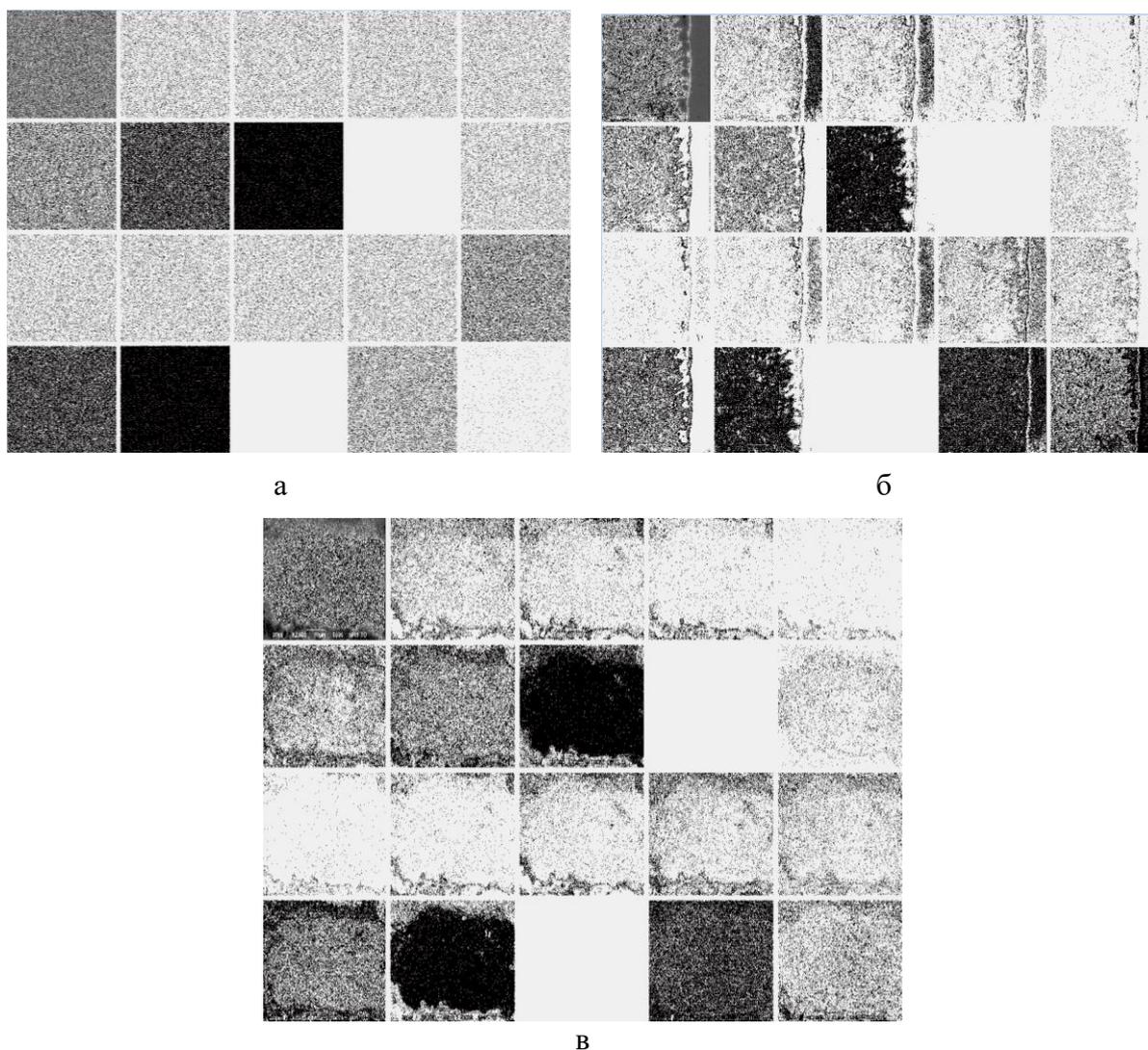


Рис. 3. Рассчитанные изображения функций мощности, полученных значений при моделировании исследуемых структур, в результате поворота оси для пикселей изображения на различные углы: а) случайно сгенерированной структуры; б) структуры 5 (рис.1); в) структуры 6 (рис. 1)

По сравнению с числом пикселей случайной структуры (первая строка табл.1), можно увидеть, что при повороте на  $45^\circ$  после ТО

порядок цифр приближается к ней. Для 7 и 8-й структур – общего вида высокохромистого чугуна, отклонение от случайности менее

заметно. Таким образом, можно судить, при каком повороте какие изображения структур имеют наибольшую неоднородность в результате термического воздействия, также, как и кристаллизация дает отклонение от случайности, что дает приближенное понятие о степени упорядоченности структуры.

Эти выводы подтверждаются изображениями, полученными при расчетах значений (рис. 3). Полученные изображения сделаны с точностью до  $1^\circ$ . Каждое представленное изображение состоит из 20 рисунков, где самый левый верхний рисунок – исходная структура. Далее сверху вниз, слева направо: 7 рисунков, соответствующих отрицательному углу поворота. Далее – отдельно во втором ряду справа – рисунок, соответствующий нулевому углу поворота. Затем, начиная с третьего, – следует 7 рисунков, соответствующих положительному углу поворота, которые по абсолютному значению точно равны величине отрицательного угла. Величины углов поворота соответствуют углам, приведенным в табл. 1. Последний и предпоследний рисунки, аналогично табл. 1, соответствуют другой тройке. Последний рисунок назовем остатком, поскольку он не поддается никакому разложению по углам поворота.

При данном моделировании интересовал вопрос: величина углов поворота, относительно которых получатся наибольшие и наименьшие функции мощности. При этом исходные структуры были представлены в натуральных серых цветах, тогда как остальные рисунки – в черных цветах. Таким образом, стало возможным оценить и сравнить между собой порядок числа, выражающего количество выводимых пикселей на каждом рисунке. Например, полученные изображения подтверждают аналитические выводы о том, что на отрицательных углах поворота выявляются в большей мере отрицательные значения лапласиана, что соответствует карбидным структурам (поскольку ранее проведенными исследованиями установлено, что у этих фаз отрицательные лапласианы дают более светлый рисунок части структуры, чем положительные).

В последующих работах представляется интересным провести моделирование на всем спектре поворотов и установить их взаимосвязь со всеми параметрами, входящими в состав М-троек, через которые можно оценить как неоднородность структурных составляющих, так и различные структурные составляющие таких гетерогенных сплавов.

## Выводы

В результате проведенных исследований по моделированию впервые была предложена новая комплексная методика оценки металлографических изображений при помощи разработанного ранее метода оптикоматематического анализа, включающая в себя использование новых оценочных параметров: М-троек, а также их инвариантов. Ввод их позволил, изменяя и задавая определенные энергетические параметры (перестановкой пикселей на исследуемом изображении), проводить моделирование изменения локальной однородности структурной составляющей в результате задаваемых различных внешних воздействий.

Это также позволило в 2 раза уменьшить число вариантов рассматриваемых значений, что значительно сократило машинное время обработки.

Предложенная методика делает возможным дальнейшее развитие исследований, которое будет включать в себя проведение моделирования на всем спектре поворотов. Это позволит установить наиболее тесную их взаимосвязь со всеми параметрами, входящими в состав М-троек, через которые можно оценить как неоднородность структурных составляющих, так и выявить различные структурные составляющие таких гетерогенных сплавов.

Установлено, что между тремя углами поворотов, соответствующих каждой тройке, существует функциональная связь.

Данный методический подход позволит также оценивать свойства материалов, в первую очередь, их твердость.

Автор выражает искреннюю признательность Белкину Е.Л. и Скобло Т.С. за помощь и участие в проведении исследований и обсуждении статьи.

## Литература

1. Исследование структуры высокохромистых чугунов / Т.С. Скобло, О.Ю. Ключко, Е.Л. Белкин, А.И. Сидашенко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – №5 (Том 83). – С. 27–38.
2. Ключко О.Ю. Оценка оптикоматематическим методом локальной неоднородности высокоуглеродистых сплавов, образованной в результате РТО / О.Ю. Ключко // Вісник ХНТУСГ. – 2017. – Вип. 183. – С. 20–30.
3. Исследование локальной структурной неоднородности в сером чугуне оптико-

- математическим методом / Т.С. Скобло, О.Ю. Клочко, Е.Л. Белкин // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2017. – №8. – С. 193–200.
4. Effective Technological Process of Crystallization of Turning Rollers' Massive Castings: Development and Analysis / Tamara Skoblo, Oksana Klochko, Efim Belkin, Aleksandr Sidashenko // International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – NY, U.S.A. – May 2017. – Vol. 2, Issue 3. – P. 34–39.
  5. Скобло Т.С. Обоснование применения понятий уравнений гидродинамики Навье-Стокса для анализа металлографических изображений / Т.С. Скобло, Е.Л. Белкин, О.Ю. Клочко // Materiały Międz. naukowi-praktycznej konferencji Vol. 21. Przemysł, 2011. – С. 94–96.
  6. Patrick J. Roache. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. Publisher: Hermosa Pub, 1998. – 648 p.
  7. Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers / T.S. Skoblo, O.Yu. Klochko, A.I. Sidashenko, R.G. Sokolov // Steel in Translation. – 2013. – Vol. 43, № 9. – P. 603–606.
  8. Скобло Т.С. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна / Т.С. Скобло, О.Ю. Клочко, Е.Л. Белкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – № 6 (78). – С. 35–42.
  9. Bachman, George; Narici, Lawrence (2012-09-26). Functional Analysis. Courier Corporation. – 141 p.
  10. Banerjee, Sudipto; Roy, Anindya (2014-06-06). Linear Algebra and Matrix Analysis for Statistics. CRC Press. p. 181
  11. Douglas W. Mitchell. An Alternative Characterisation of All Primitive Pythagorean Triples // The Mathematical Gazette. – July 2001. – T. 85, Vol. 503. –P. 273.
- References**
1. Skoblo, T.S., Klochko, O.Yu., Belkin, E.L., Sidashenko, A.I. (2017). Issledovanie struktury vysokohromistykh chugunov [Investigation of the structure of high-chromium cast irons]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov - Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 5 (83), 27-38 [in Russian].
  2. Klochko, O.Yu. (2017). Ocenka optiko-matematicheskim metodom lokalnoj neodnorodnosti vysokouglerodistykh splavov, obrazovannoj v rezultate RTT [Estimation of the local heterogeneity of high-carbon alloys formed as a result of RTT via optical-mathematical method]. *Visnyk HNTUSG im. P. Vasylenka - Newsletter HNTUSG*, 183, 20-30 [in Russian].
  3. Skoblo, T.S., Klochko, O.Yu., Belkin, E.L. (2017). Issledovanie lokalnoj strukturnoj neodnorodnosti v serom chugune optiko-matematicheskim metodom [The research of the local structural inhomogeneity within the grey cast-iron via optical-mathematical method]. *Tekhnichnyj servis agropromyslovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv - Technical service of agroindustrial, forest and transport complexes*, 8, 193-200 [in Russian].
  4. Skoblo, T., Klochko, O., Belkin, E., Sidashenko, A. (2017). Effective Technological Process of Crystallization of Turning Rollers' Massive Castings: Development and Analysis. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, NY, U.S.A., 2, 3, 34-39.
  5. Skoblo, T.S., Belkin, E.L., Klochko, O.Yu. (2011) Obosnovanie primenenij ponyatij uravnenij gidrodinamiki Navje-Stoksa dlya analiza metallograficheskikh izobrazhenij [Application justification of the concepts of fluid dynamics Navier-Stokes equations for the analysis of metallographic images]. *Materiały VII Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji. Przemysł - Materials VII of the International Scientific and Practical Conference*, 21, 94-96 [in Russian].
  6. Patrick, J. Roache. (1998). Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. Publisher: Hermosa Pub, 648.
  7. Skoblo, T.S., Klochko, O.Yu., Sidashenko, A.I., Sokolov, R.G. (2013). Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers. *Steel in Translation*, 43, 9, 603-606.
  8. Skoblo, T.S., Klochko, O.Yu., Belkin, E.L. (2012). Primenenie kompjuternogo analiza metallograficheskikh izobrazhenij pri issledovanii struktury vysokohromistogo chuguna [The use of computer analysis of metallographic images in the study of high-chromium cast iron structure]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov - Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 6 (78), 35-42 [in Russian].

9. Bachman, George; Narici, Lawrence (2012-09-26). *Functional Analysis*. Courier Corporation.
10. Banerjee, Sudipto; Roy, Anindya (2014-06-06). *Linear Algebra and Matrix Analysis for Statistics*. CRC Press. 181.
11. Mitchell, Douglas W. (2001). An Alternative Characterisation of All Primitive Pythagorean Triples. *The Mathematical Gazette*. July. 503 (85). 273.

**Клочко Оксана Юрьевна, к.т.н., докторант, кафедра технологии материалов, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Алчевских, 44, тел.+30675849545, klochko.hntysh@gmail.com**

**НОВА МЕТОДИКА ОЦІНКИ  
ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУР,  
МОДЕЛЮВАННЯМ ЇХ ЛОКАЛЬНОЇ  
НЕОДНОРІДНОСТІ**

**Клочко О.Ю., Харківський національний  
технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка**

*Анотація.* Забезпечення надійної роботи і підвищення експлуатаційної стійкості виробів та деталей із залізовуглецевих сплавів, що працюють в умовах зносу, великих ударних і термоциклічних навантажень, визначається ступенем деградації металу з розвитком неоднорідності фаз, їх пошкоджуваності. Дослідження структурної неоднорідності, що виникає в результаті цих явищ, розробка нових та підвищення точності використовуваних методик аналізу є одним із важливих завдань при пошуку шляхів підвищення експлуатаційної стійкості таких виробів і прогнозування їх надійності. Розробка і вдосконалення нових методів дослідження структур, що дозволили проводити моделювання зміни локальної неоднорідності структурних складових під впливом різних зовнішніх навантажень, а також значно зменшити кількість факторів в кореляційних залежностях для спрощення розрахунків, без втрати якості проведеної оцінки. Для оцінки локальної неоднорідності різних фаз вивчали ступінь зміни дислокаційної структури високовуглецевих сплавів, оцінювали щільність її розподілу, в умовах впливу напружень, що формуються в результаті термічної обробки. Фотографії мікроструктур було досліджено з використанням раніше розробленої методики оптико-математичного комп'ютерного аналізу. Проведені дослідження з моделювання локальної неоднорідності структурних складових у результаті дій різних зовнішніх впливів дозволили запропонувати

нову комплексну методику оцінки металографічних зображень за допомогою методу оптико-математичного аналізу, що включає в себе використання нових оціночних параметрів: *M*-триїок, а також їх інваріантів. Введення їх дозволило, змінюючи і задаючи певні енергетичні параметри (перестановкою пікселів на досліджуваному зображенні), проводити моделювання зміни локальної неоднорідності структурної складової в результаті різних зовнішніх впливів. Це дозволило в 2 рази зменшити число варіантів факторів, що значно скоротило машинний час обробки. Запропонована методика робить можливим подальший розвиток досліджень, які включають в себе проведення моделювання на всьому спектрі поворотів. Це дозволить встановити найтісніший їх взаємозв'язок з усіма параметрами, що входять до складу *M*-триїок, через які можна оцінити як неоднорідність, так і виявити різні структурні складові таких гетерогенних сплавів. Встановлено, що між трьома кутами поворотів, відповідних кожній трійці, існує функціональний зв'язок. Запропонований методичний підхід дозволить оцінювати різні властивості матеріалів, у першу чергу – їх твердість.

**Ключові слова:** металографічне зображення, оптико-математичний аналіз, залізовуглецевий гетерогенний сплав, структурна однорідність, інваріант.

**NEW METHODOLOGY OF STRUCTURAL  
ESTIMATION AND STUDY: LOCAL  
INHOMOGENEITY SIMULATION**

**Klochko O., Kharkiv Petro Vasylenko  
National Technical University of Agriculture**

**Abstract. Problem.** A support of the reliable operation and an increase of the operational durability of iron-carbon alloys products and parts operating under wear and large impact and thermocyclic loads, are determined by the degree of metal degradation with the development of phase heterogeneity and damage. Study of the structural heterogeneity happening due to these phenomena, development of new methods and improvement of the accuracy of analysis techniques of the existing ones are among the most important tasks in the search for ways of improvement the operational stability of such products and the reliability prediction. The **Goal** of our study consists in development and improvement of the new methods for material studies that allow one to both model the changes of structural components' local heterogeneity resulting from the a variety of external influences and to significantly reduce the number of factors in correlation dependencies in order to simplify the calculations without the assessment quality loss. **Methodology** involves an estimate of the local inhomogeneity of different phases, the variation degree in the dislocation structure of high-carbon alloys is studied. Its distribution density is evaluated under the conditions of stresses generated as a result

of heat treatment. Images of microstructures are studied using the methods of our optical-mathematical computer analysis developed and described in a number of our previous papers. **Results** our research dedicated to modeling of the local heterogeneity of structural components as a result of various external influences, allows us to offer a new complex method for study of metallographic images with the optical-mathematical analysis used and including the new estimation parameters: *M*-triples and their invariants. **Originality.** The proposed methodology makes possible the further development of the researches that include modeling on the whole range of rotations. This makes it possible to establish

the closest interconnections between them and all the parameters that make up the *M* triples. Further, this enables to estimate both the structural components heterogeneity and to reveal the various structural components of heterogeneous alloys. It is established that there is a functional connection between three rotational angles which corresponds to each triplet. **Practical value** the proposed methodical approach allow to evaluate the materials properties, primarily, material hardness.

**Key words:** metallographic image, optical-mathematical analysis, iron-carbon heterogeneous alloy, structural homogeneity, invariant.

---

---