

Скобло Т.С.,  
Клочко О.Ю.,  
Белкин Е.Л.

Харківський національний технічний  
університет сільського господарства  
імені Петра Василенка  
E-mail: stamarasemenovna@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В СЕРОМ ЧУГУНЕ ОПТИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

УДК 669.017.3:621.78

*В работе проведена оценка степени локальной неоднородности методом оптико-математического анализа металлографических изображений различных фаз серого феррито-перлитного чугуна, формируемой в результате процесса кристаллизации, пластической деформации, путем выявления и исследования изменения дислокационной структуры, определения ее плотности с оценкой величины дисперсности фаз, а также с учетом изменения энергетических параметров: функций мощности диссипации энергии и напряжений.*

**Ключевые слова:** *серый чугун, локальная неоднородность, дислокационная структура, металлографическое изображение*

В машиностроении серые чугуны являются одними из широко применяемых материалов вследствие их высокой эксплуатационной надежности, долговечности и низкой стоимости. В частности, из серого чугуна изготавливают корпусные детали, гильзы цилиндров, металлические формы для литья, сердцевины и шейки двухслойных прокатных валков и др. Такие изделия подвергаются воздействию различных нагрузок, в том числе циклическим, растяжением, сжатием, температурным.

Серый чугун отличается резкой гетерофазностью строения, определяющей его свойства и поведение в деталях различных конструкций. Диффузия элементов, неоднородность коэффициентов линейного и объемного расширения феррита, цементита и графита в процессе кристаллизации чугуновых отливок, а также при эксплуатации, приводят к появлению дислокационной структуры и формированию высоких внутренних напряжений. Наличие дислокационной структуры, значительная структурная неоднородность, как различных фаз, так и локальная их составляющих, предопределяет анизотропию напряженного состояния, свойств, является источником зарождения и развития дефектов микроструктуры, повреждаемости рабочей поверхности и, в конечном счете, влияет на эксплуатационную их стойкость. Поэтому представляется необходимым изучение изменений дислокационной структуры высокоуглеродистых сплавов, в частности, серого чугуна, под воздействием различных внешних факторов, например, таких как, кристаллизация и пластическая деформация, приводящих к возникновению структурной неоднородности и напряженного состояния в изделиях.

Ранее в работе [1] авторами была показана возможность выявления дислокационной структуры, с использованием разработанных методик оптико-математического компьютерного анализа [2], путем оценки параметра изменчивости условных цветов, являющегося критерием в оценке неоднородности гетерогенной структуры высокоуглеродистых сплавов. Дальнейшим развитием исследований явилась разработка уточненных методик определения дисперсности структурных составляющих различных фаз, имеющих локальную неоднородность по концентрации компонентов [3]. При этом, дисперсность структуры гетерогенного сплава выражали при помощи функций, представляющих собой энергетические параметры [4]. В связи с вышеизложенным, представляется полезным исследовать возможность выявления дислокационной структуры, определения ее плотности в сером чугуне через функции, представляющие собой энергетические параметры.

**Целью** данной работы являлась оценка степени локальной неоднородности различных фаз серого чугуна, формируемой в результате процесса кристаллизации и пластической деформации, путем выявления и исследования изменения дислокационной структуры, оценки ее плотности при помощи величины дисперсности фаз, а также выражаемой через энергетические параметры, методом оптико-математического анализа металлографического изображения.

### Методика исследований

Для выявления и изучения изменений дислокационной структуры различных фаз, происходящих в высокоуглеродистых сплавах, в условиях воздействия напряжений, формируемых в результате процесса кристаллизации и пластической деформации, анализу подвергали фотографии микроструктур серого феррито-перлитного чугуна, с использованием ранее разработанных методик оптико-математического компьютерного анализа [2]. При этом, проводили оценку неоднородности, определяющей интенсивность изменения дислокационной структуры в связи с изменением ее плотности.

В качестве критерия, описывающего изменения дислокационной структуры и ее плотности соответственно, были использованы энергетические параметры, такие как функции мощности диссипации энергии и напряжений. Эти критерии рассчитывали по методике, описанной в работе [5]. Степень неоднородности данных функций выражали через их дисперсность, согласно методике, приведенной в работе [3].

Оценку производили с учетом вычисляемых значений на изображении металлографической структуры, разбиваемой на ячейки размером  $3 \times 3$  пикселя. Обработку такой матрицы выполняли путем последовательного сканирования каждого ее пикселя, задавая его как среднюю точку, находящуюся внутри ячейки заданного размера. Условный цвет в каждой точке изображения рассчитывали при помощи методики [2]. Функции мощности диссипации энергии и напряжений, выражали согласно формулам, приведенным в работе [5]. Для оценки неоднородности, полученной в результате изменения дислокационной структуры и ее плотности, были исследованы фотографии структур серого феррито-перлитного чугуна в зоне деформации, выполненных после кристаллизации и пластической деформации (рис.1, структуры 1, 2, 3 соответственно).



Рис. 1. Оптическая микроструктура серого феррито-перлитного чугуна: литое состояние – фото 1,  $\times 500$ ; после пластической деформации – 2,  $\times 200$ ; 3,  $\times 1000$ .

Проведена оценка фазового состава, исследуемых структур, и степени его неоднородности путем вычисления горизонтальных и вертикальных дисперсностей выявленных фаз (относительного числа пикселей) в локальных областях размером  $3 \times 3$  пикселя (табл.1, 2, 3 соответственно) согласно методике [3].

Таблица 1

Количественное соотношение выявленных условных цветов (фазовый состав), %  
 в области анализируемого изображения

Выявленные условные цвета, % групп фаз																Фото
графита		феррита								карбидных						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
26.6	0.5	0.0	0.0	02.3	16.6	0.0	0.0	0.0	06.3	15.2	0.0	0.0	0.0	19.2	13.3	1
12.9	0.0	0.0	0.0	00.0	10.6	0.0	0.0	0.0	06.7	43.7	0.0	0.0	0.0	00.0	26.1	2
39.0	01.7	0.0	0.0	02.1	10.9	0.0	0.0	00.0	03.3	19.3	0.0	0.0	0.0	05.5	18.1	3

Таблица 2

Величина горизонтальной дисперсности фаз (относительное число пикселей)  
 в локальных областях изображения размером 3×3 пикселя

Выявленные фазы							Среднее значение горизонтальной дисперсности	№ фото
Феррит	Графит	Карбиды	Феррит + графит	Феррит + карбиды	Карбиды + графит	Феррит + графит + карбиды		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10.032	02.665	09.082	02.691	05.015	02.805	02.582	05.794	1
05.959	03.304	10.878	02.257	04.531	02.730	02.752	05.456	2
20.277	02.442	14.213	02.174	04.563	02.423	02.670	08.537	3

Таблица 3

Величина вертикальной дисперсности фаз (относительное число пикселей)  
 в локальных областях изображения размером 3×3 пикселя

Выявленные фазы							Среднее значение вертикальной дисперсности	№ фото
Феррит	Графит	Карбиды	Феррит + графит	Феррит + карбиды	Карбиды + графит	Феррит + графит + карбиды		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10.092	02.587	09.071	02.733	05.020	02.813	02.592	05.804	1
05.931	02.850	10.722	02.181	04.657	02.659	02.702	05.402	2
17.078	02.287	12.229	01.952	03.969	02.161	02.379	07.370	3

При цифровой обработке изображений исследуемых структур, весь диапазон, получаемых в результате математического анализа условных цветов (от 0 до 255), был разбит на 16 дискретных интервалов, включивших три группы фаз: 0-2 – 1-я группа фаз графита; 3-10 – 2-я группа фаз феррита:  $\alpha$  – фаза с различным типом совершенства кристаллической решетки (в этот интервал включены и игольчатые структуры) и различающиеся химическим составом; 11-16 – 3-я группа фаз карбидов различных типов ( $FeC$ ,  $Fe_xC_y$  и  $Fe_3C$ ).

При рассмотрении развития неоднородности по содержанию углерода в сером чугуна, формируемой в результате кристаллизации, пластической деформации, а также термоциклических воздействий, учли результаты исследований работы [6], в которой было показано, что пластичность перлита при деформации зависит от ориентационной направленности между ферритом и цементитом. Поскольку совпадение систем скольжения феррита и цементита встречается не часто, то и деформация вдоль пластин твердой фазы наблюдается сравнительно редко.

Ограниченность деформации зерен феррита приводит к тому, что уже после малых деформаций плотность дислокаций около пластин цементита резко возрастает в результате того, что границы раздела феррит — цементит являются не только источником развития напряжений, но и препятствием для их продвижения. Последнее вызывает облегчение поперечного скольжения и возникновение ячеистой структуры в феррите перлита с формированием дислокационных стенок вдоль цементитных пластин. Наблюдается повышение уровня локальных напряжений, увеличение плотности дислокаций. На изображениях 1-3 (см.рис.2), выявлено декорирование таких областей в результате диффузии атомов углерода.

Анализ полученных значений выявил существенные локальные фазовые неоднородности в исследуемых структурах, как по вертикальной, так и по горизонтальной дисперсности, что указывает на наличие дислокационной структуры различной плотности в отличающихся зонах и согласуется со значениями функции мощности диссипации, превышающими заданный порог значений (табл.5).

Для сопоставления была исследована локальная неоднородность в выявленных фазах, используя критерий изменчивости 2 (табл.4), согласно методике, предложенной в работе [1]. Очевидно, что для области изображения размером 3×3 структура является 100% однородной при условии совпадения цветов для всех 9 пикселей внутри этой области. При сопоставительном анализе выявления локальной неоднородности различными методами, установлено, что разброс ее значений соответствует от 3% для структуры 1 до 7 и 20% для структур 2 и 3 соответственно (см.табл.2 и 3, столбец 8 и табл.4, столбцы 7-9). Данные результаты показывают, что при исследовании изображений при больших (более 1000 крат) увеличениях, методика, предложенная в данной работе, выявляет локальную неоднородность с более высокой точностью.

Таблица 4

**Величина изменчивости 2 в локальных областях изображения размером 3×3 пикселя**

Выявленные фазы									№ фото
Феррит + графит		Графит+ карбиды		Феррит + карбиды		Феррит + графит + карбиды			
графит	феррит	графит	карбиды	феррит	карбиды	графит	феррит	карбиды	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.26	1.66	1.57	2.42	2.37	2.76	1.63	2.03	2.44	1
1.27	1.66	1.65	2.51	2.42	2.78	1.65	2.07	2.48	2
1.24	1.67	1.55	2.44	2.36	2.77	1.56	2.02	2.45	3

Таблица 5

**Величины распределения средних значений функции мощности диссипации энергии**

Величина функции мощности диссипации энергии						№ фото
Абсолютное значение		Отрицательное значение		Положительное значение		
среднее	среднеквадратическое отклонение	среднее	среднеквадратическое отклонение	среднее	среднеквадратическое отклонение	
15273.80	48129.20	1437.80	1437.90	55222.00	78603.30	1
14636.30	49301.50	1579.10	1302.10	48134.10	79950.50	2
8381.70	36017.30	1290.20	1111.40	44084.70	72525.30	3

Для выявления степени локальной неоднородности, определяемой изменением дислокационной структуры, были рассчитаны средние значения функции мощности дис-

сипации энергии на всем изображении каждой фотографии, а также выявленные отклонения (табл.5). При этом, поскольку при деформации энергетическое состояние металла является неравновесным, при оценке значения данного параметра принимали его 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.

В результате анализа полученных значений, установлено, что закон распределения функции мощности диссипации энергии, происходящей в результате деформационных воздействий, является близким к экспоненциальному распределению.

На рис.2 представлены фотографии, характеризующие распределения абсолютных значений функции мощности диссипации энергии для каждого изображения. На экран выводили те значения, в которых параметр отличен от нуля. Черный цвет показывал, отсутствие диссипации энергии, т.е. равновесное состояние. При превышении величины абсолютного значения 11500, характеризующей наиболее энергетически неустойчивое состояние, точку на экране для наглядности выводили в красном цвете. Выбранные граничные значения являлись порогом чувствительности при оптико-математическом анализе.

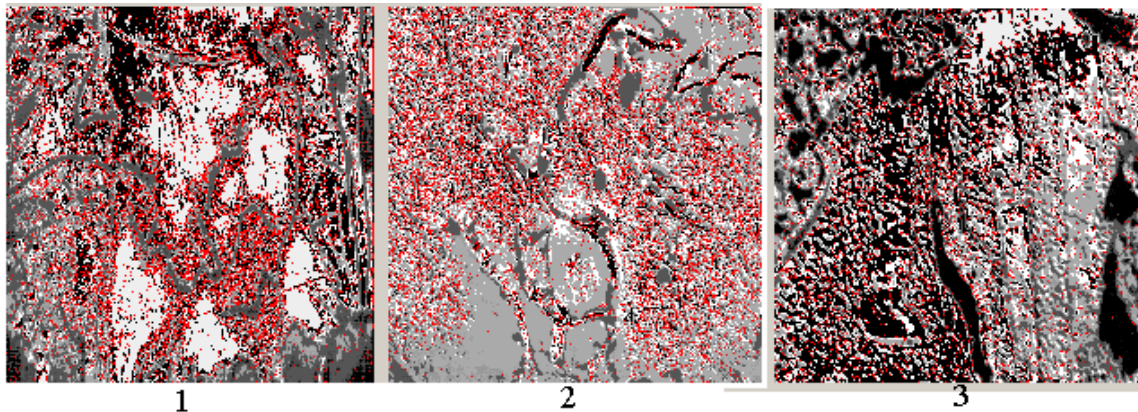


Рис.2. Распределение абсолютных значений функции мощности диссипации энергии, красным цветом указана дислокационная структура

Установлено, что грубые пластинчатые включения графита в сером чугуна, повышают уровень локальных напряжений (положительные значения диссипации мощности энергии составляют от 44000 до 56000, см. табл.5), повышая плотность дислокаций. В этих зонах возрастает диффузия углерода, который их декорирует. При этом, в отдельных зонах графита просматриваются изменения цвета и появление в нем четко выраженных светлых зон. Границы включений графита имеют красный цвет (точечные выделения углерода происходят на дислокациях). Также выявлено скопление дислокаций у концов графитовых пластинчатых включений (см.рис.2, структуры 1,2), что характеризует локальную концентрацию напряжений. Такие зоны с повышенной плотностью дислокаций являются очагами зарождения трещин. Их появления могут быть связаны и с отклонениями в технологическом процессе производства отливок, условиями их кристаллизации, а также в результате пластической деформации.

Расчетана функция напряжений, определяющая плотность дислокаций (табл.6). Аналогично функциям мощности диссипации, они также имеют положительное, отрицательное и нулевое значение, определяющие процессы, протекающие в структуре. По результатам расчетов были построены зависимости распределения функции напряжений, где аналогично рис.2, был задан предел граничных значений лапласиана (10000), при превышении которого пиксели окрашивались в красный цвет.



Величина средней дисперсности функции напряжения (относительное число пикселей)

Горизонтальная дисперсность	Горизонтальная дисперсность функций напряжения			Вертикальная дисперсность	Вертикальная дисперсность функций напряжения			№ фото
	отрицательных	нулевых	положительных		отрицательных	нулевых	положительных	
03.129	01.000	05.253	01.000	03.122	01.099	05.734	01.097	1
02.943	01.099	05.124	01.069	02.914	01.093	05.052	01.071	2
04.886	01.094	08.945	01.090	04.410	01.090	07.990	01.085	3

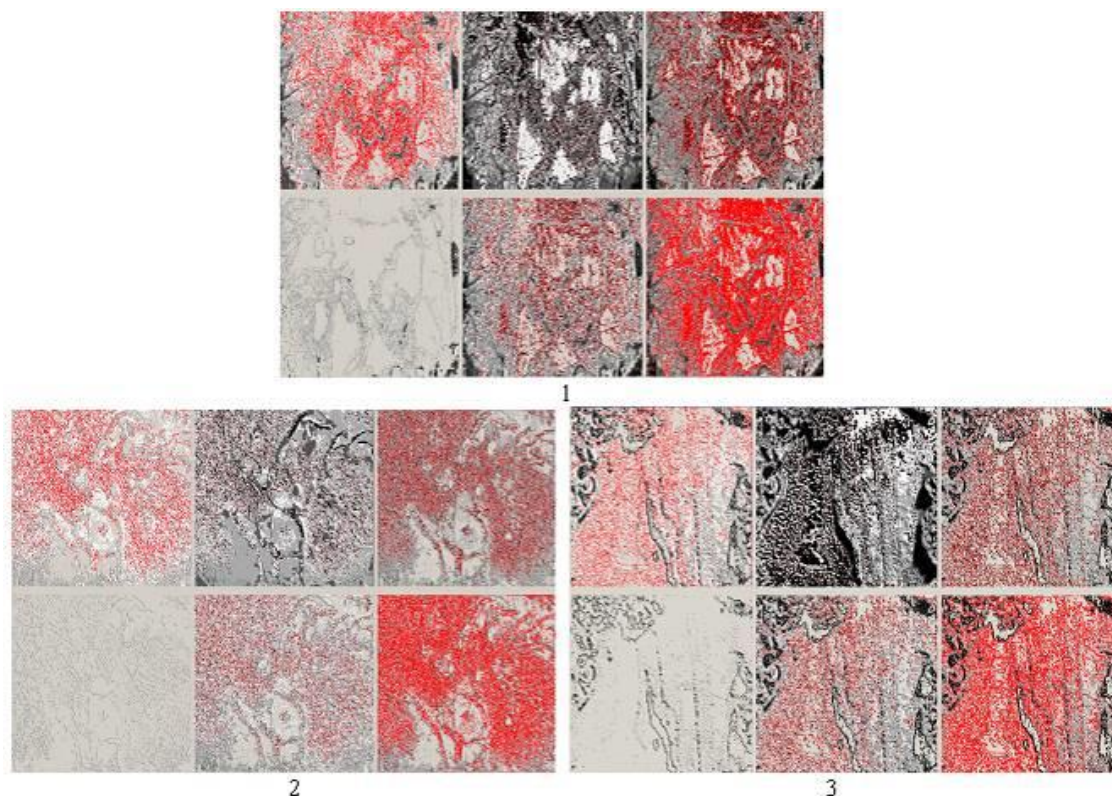


Рис.3. Распределение дисперсности функции напряжения. Для каждой структуры: верхний ряд – горизонтальная дисперсность; нижний – вертикальная. Слева – с отрицательным знаком; в центре – нулевая; справа – с положительным знаком. Красным цветом указаны значения плотности дислокационной структуры, величина лапласианов которых превышает 10000.

Грубые включения графита при кристаллизации массивных отливок в результате медленного охлаждения повышают уровень локальных напряжений, увеличивая плотность дислокаций. При этом, имеет место диффузия углерода, а также примесных атомов, которые декорируют дефекты (например, рис.3, структуры 1 – кислородом).

### Выводы

В проведенной работе предложен принципиально новый подход и были впервые оценены неоднородность структуры, при помощи величин дисперсности фаз, а также функций мощности диссипации энергии и дисперсности мощности напряжений, отражающие изменения энергетического состояния системы, в результате процессов, происходящих при кристаллизации и пластической деформации высокоуглеродистых сплавов на примере серого феррито-перлитного чугуна. При помощи таких параметров возможно с достаточно высокой точностью выявлять дислокации, исследовать изменения такой структуры и оценивать ее плотность в зависимости от условий эксплуатации. Такой под-

ход лишен основных недостатков существующих методов исследования дислокационной структуры. И может быть предложен для ее выявления и оценки изменчивости.

### Литература

1. Разработка новых подходов к оценке структурообразования в высокохромистых чугунах /Т.С.Скобло, О.Ю.Клочко, Е.Л.Белкин, А.И.Сидашенко //Заводская лаборатория – 2017. - №4 (83).
2. 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.
3. Математический анализ оценки дисперсности структуры легированных чугунов / Т.С.Скобло, О.Ю.Клочко, Е.Л.Белкин, А.И. Сидашенко // Сталь. – 2017. - № 2. – С.51-54.
4. Клочко О.Ю. Применение методов оптико-математического анализа оценки дисперсности структуры высокоуглеродистых сплавов /О.Ю.Клочко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів [Наук. журнал].- №6. – Х.: 2016.- С. 112-117.
5. Клочко О.Ю. Оценка оптико-математическим методом локальной неоднородности высокоуглеродистых сплавов, образованной в результате РТО /О.Ю.Клочко // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. - Випуск 183, 2017.
6. Бабич В.К. Деформационное старение стали /В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. - Москва: Металлургия, 1972. - 320 с.

### Summary

**Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L.** The research of the local structural inhomogeneity within the grey cast-iron via optical-mathematical method

*The estimation of local inhomogeneity degree in different phases of the grey ferritic-pearlitic cast-iron formed in the result of crystallization and plastic deformation is evaluated using the optical-mathematical method for analysis of metallographic images. The research has been carried out via revealing and analyzing of the changes of dislocational structure, determining its density with evaluation of phase dispersity value. The change of the energy parameters such as energy dissipation function and stress have been taken into account.*

*Usage of these parameters lets one to reveal dislocations, to study changes of such structure and to estimate its density with a good enough precision. Our approach lacks the main drawbacks of the existing methods for studying the dislocation structures and can be suggested for revealing and estimation of its variability.*

**Key words:** grey cast-iron, local inhomogeneity, dislocational structure, metallographic image

### References

1. Razrabotka novyx podxodov k ocenke strukturoobrazovaniya v vysokoxromistyx chugunax /T.S.Skoblo, O.Yu.Klochko, E.L.Belkin, A.I.Sidashenko //Zavodskaya laboratoriya – 2017. - №4 (83). [in Russian]
2. Skoblo T.S., Klochko O.Yu, Belkin E.L. 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.2012.№ 6 (78). P.35-42. [in Russian]

3. Matematicheskij analiz ocenki dispersnosti struktury legirovannyx chugunov /T.S.Skoblo, O.Yu.Klochko, E.L.Belkin, A.I.Sidashenko // Stal. – 2017. - № 2 . – P.51-54.. [in Russian]
4. Klochko O.Yu. Primenenie metodov optiko-matematicheskogo analiza ocenki dispersnosti struktury vysokouglerodistyx splavov /O.Yu.Klochko // Texnichnij servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv [nauk. zhurnal].- №6. – Kh.: 2016.- P. 112-117. [in Russian]
5. Klochko O.Yu. Ocenka optiko-matematicheskim metodom lokalnoj neodnorodnosti vysokouglerodistyx splavov, obrazovannoj v rezultate rto / O.Yu.Klochko // Visnik XNTUSG im. P.Vasilenka. - Vipusk 183, 2017.. [in Russian]
6. Babich V.K. Deformacionnoe starenie stali /v.k. Babich, Yu.P. Gul, i.e. Dolzhenkov. - Moskva: Metallurgiya, 1972. - 320 p. [in Russian]