

А.В. Сайчук

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени П. Василенко,
г. Харьков, Украина,
E-mail: kafedraTSRP@i.ua

**ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ
НЕОДНОРОДНОСТИ В ОТЛИВКАХ
КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СЕРОГО
ЧУГУНА**

УДК 620.1

В работе установлено, что локальная деформация наиболее интенсивно проявляется вокруг грубых скоплений пластинчатого графита и в меньшей мере в области пластин цемента, а дефекты декорируются благодаря диффузии углерода. Выявлено, что грубые включения графита в сером чугуна, повышают уровень локальных напряжений, вокруг которых положительные значения диссипации мощности возрастают за счет увеличения плотности дислокаций. Выявлены зоны локальных напряжений, оценена величина дисперсности фаз, изменение функций мощности диссипации и плотности дислокаций.

Ключевые слова: *серый чугун, локальные напряжения, дисперсность фаз, функции мощности диссипации, плотность дислокаций*

Актуальность проблемы. Серый чугун, благодаря своим эксплуатационным свойствам и относительной дешевизной находит широкое применение в сельхозмашиностроении. Ранее выполненными работами было показано, что эксплуатационные свойства отливок из такого чугуна эффективно использовать при определенных свойствах и структуре металла. Особого внимания требуют отливки со сложным и переменным сечением, поскольку в зонах их изменений возникают напряжения, сопровождающиеся трещинообразованием и деградацией фаз.

Это было выявлено неразрушающим магнитным методом контроля по коэрцитивной силе. Вместе с тем, чтобы оптимизировать технологический процесс производства и прогнозировать возможность развития дефектов следует оценить роль каждой структурной составляющей в развитии локальных напряжений и их влияние на развитие дефектов.

Анализ последних исследований и публикаций. Детальные исследования по моделированию процесса развития локальных напряжений приведены в работе [1, 2], где показано, что в процессе нагружений и циклически изменяющихся температур повышение плотности дислокаций начинается от грубых графитовых включений и особенно их концов. Этот процесс сопровождается диффузией углерода при деградации фаз, который декорирует такую дефектную структуру.

Цель и задачи исследования. Целью работы явилось выявление роли структурных составляющих и процессов, происходящих при кристаллизации металла отливок из серого чугуна в зонах локальных деформаций, их дефектности с использованием новых подходов к оценке.

Результаты исследования. Наиболее целесообразным изучение процессов деградации металла с развитием его дефектности следует проводить на основе изменчивости и повышения плотности дислокаций. Для этого совмещали метод выявления дислокаций с технологическими условиями при кристаллизации и деформации.

Дислокационную структуру выявляли методом вакуумного травления шлифов при 3×10^{-3} мм.рт.ст. в установке системы Лозинского. Анализировали образцы $3 \times 4 \times 80$ мм и шлиф полировали на одной из граней.

Образец жестко закрепляли в специальных захватах. В вакууме производили нагрев средней части образца и с помощью микроскопа наблюдали за началом структурных изменений по появлению дислокаций, их локализации и движению в процессе

формирования напряжений. Сопоставительно анализировали аналогичные структурные изменения в корпусных отливках с дефектами, выявленными по повышенным показателям коэрцитивной силы (с 8,0 до 14,5 А/см.).

Для определения неоднородности, характеризующейся изменением плотности дислокаций, как указывалось выше, для анализа вырезали образцы с повышенным уровнем локальных напряжений, оценку производили по металлографическим фотографиям.

В качестве критерия, описывающего изменение дислокационной структуры, использовали энергетические параметры (функцию мощности диссипации энергии и напряжений), согласно ячеек 3×3 пикселя с последовательным сканированием каждого из них, задавая среднюю точку.

Исследуемые фотографии оценивали с использованием метода оптико-математической обработки [2].

При этом весь диапазон изображений, выявленных фаз, при условных тонах цвета от 0 до 255, был разбит на 16 интервалов, включающих три группы фаз: 1 – это 1, 2 относятся к графиту; 2 – феррита – 3-10, которые отличаются типом совершенства кристаллической структуры и долей в ней углерода; 3 – карбидные типа FeC, Fe_xC_y и Fe₃C (табл. 1).

Оценку неоднородности распределения деформаций выявляли по локальному содержанию углерода в зонах с повышенной плотностью дислокаций, декорированных углеродом и, формируемой в результате кристаллизации, пластической деформации. Анализ учитывал и результаты, ранее проведенных исследований [4], которые показали, что пластичность перлита зависит от ориентации его пластин относительно направления действующей деформации. Известно, что совпадения направления скольжения в дислокаций в феррите и цементите пластин встречаются редко, поэтому в твердой фазе увеличение их плотности не наблюдали. В этом случае при малой склонности к дефектообразованию наиболее твердой структурной составляющей (цементит) способствует тому, что уже при малых деформациях в мягкой фазе (феррите) существенно возрастает неоднородность и увеличивается плотность дислокаций.

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	<i>a</i>
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	<i>б</i>
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	<i>в</i>

При этом важную роль играет граница их раздела, являющаяся не только источником развития напряжений, но и препятствием для скольжения дислокаций. Локальные напряжения у включений графита также существенно увеличивают плотность дислокаций.

На рис. 1 приведены результаты сопоставительных исследований, выявленные при локальной деформации в условиях вакуумного травления (см. рис. 1, *a-в*) на пробах, отобранных от корпусных деталей в зонах с повышенной коэрцитивной силой.

Из приведенных данных видно, что локальная деформация наиболее интенсивно проявляется вокруг грубых скоплений пластинчатого графита и в меньшей мере в области пластин цемента, а дефекты декорируются благодаря диффузии углерода.

Дисперсність фаз, їх взаємозв'язок і частку оцінювали порівняльно по горизонтальній і вертикальній спрямованості в локальних областях і їх ілюструють (табл. 2 і табл. 3).

Таблиця 2

Величина горизонтальної дисперсності фаз (відносне число пікселів) в локальних областях зображення розміром клітинки 3×3 пікселя

Виявленні фази							Середнє значення горизонтальної дисперсності	№ фото 1
Феррит	Графіт	Карбиди	Феррит + графіт	Феррит + карбиди	Карбиди + графіт	Феррит + графіт + карбиди		
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	<i>a</i>
05.959	03.304	10.878	02.257	04.531	02.730	02.752	05.456	<i>б</i>
20.277	02.442	14.213	02.174	04.563	02.423	02.670	08.537	<i>в</i>

Таблиця 3

Величина вертикальної дисперсності фаз (відносне число пікселів) в локальних областях зображення розміром клітинки 3×3 пікселя

Виявленні фази							Середнє значення вертикальної дисперсності	№ фото 1
Феррит	Графіт	Карбиди	Феррит + графіт	Феррит + карбиди	Карбиди + графіт	Феррит + графіт + карбиди		
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	<i>a</i>
05.931	02.850	10.722	02.181	04.657	02.659	02.702	05.402	<i>б</i>
17.078	02.287	12.229	01.952	03.969	02.161	02.379	07.370	<i>в</i>

Аналіз отриманих значень виявив суттєві фазові неоднорідності стану структур по різних, оцінюваних напрямках, що визначається дислокаційною структурою різної густоти локальних мікрзон і це добре узгоджується з значеннями функції потужності дисипації, перевищуючими заданий поріг значень (табл. 4 і рис.1, 2-е).

Таблиця 4

Величина змінливості 2 в локальних областях зображення розміром клітинки 3×3 пікселя

Виявленні фази									№ фото
Феррит + графіт		Графіт + карбиди		Феррит + карбиди		Феррит + графіт + карбиди			
графіт	феррит	графіт	карбиди	феррит	карбиди	графіт	феррит	карбиди	
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	<i>z</i>
1.27	1.66	1.65	2.51	2.42	2.78	1.65	2.07	2.48	<i>д</i>
1.24	1.67	1.55	2.44	2.36	2.77	1.56	2.02	2.45	<i>e</i>

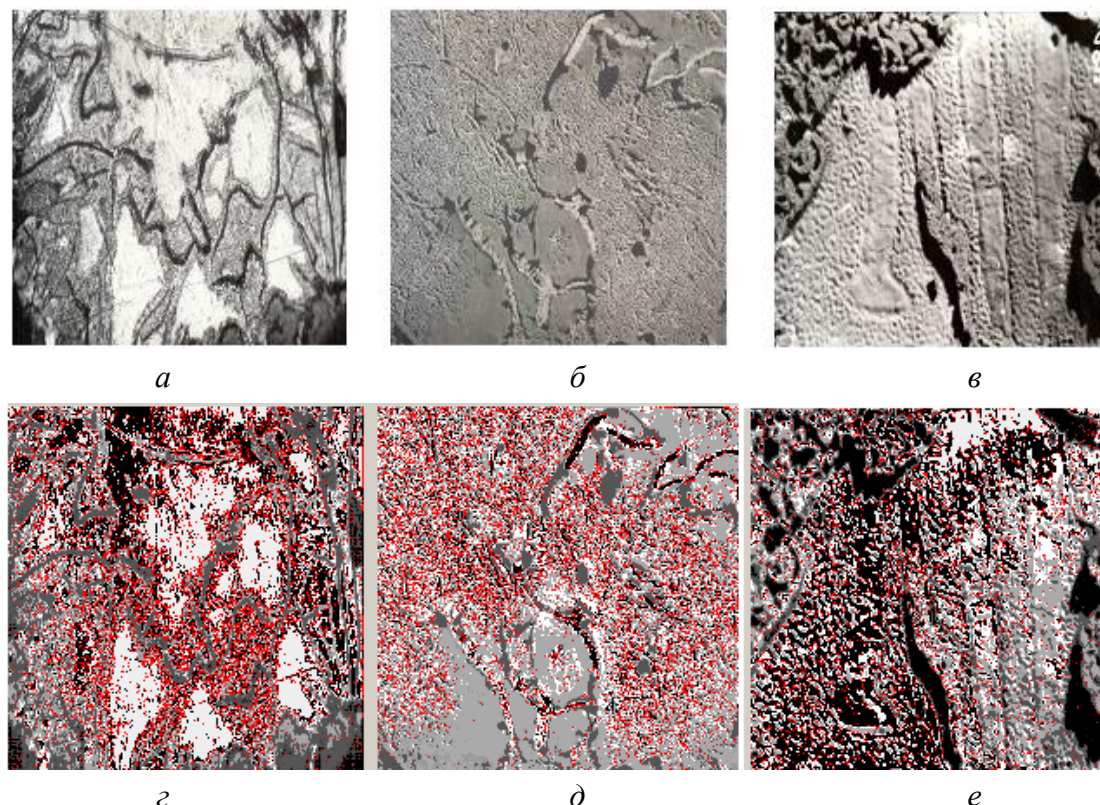


Рис. 1 – Микроструктура отливок корпусных деталей из серого феррито-перлитного чугуна: а, г – в литом состоянии, $\times 500$, в зоне пластической деформации с повышенной коэрцитивной силой; б, д – в зоне скопления грубых включений графита, $\times 200$; г, е – в области цементитных пластин, $\times 1000$. Фотографии а-в отражают исходное состояние, а г-е – картину после оптико-математической обработки

Сопоставительные исследования локальной неоднородности в выявленных фазах выполняли в соответствии с критерием изменчивости 2 (табл. 5), согласно методике, предложенной в работах [2, 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	г
14636.30	49301.50	1579.10	1302.10	48134.10	79950.50	д
8381.70	36017.30	1290.20	1111.40	44084.70	72525.30	е

Для области изображений размером ячейки 3×3 пикселя структура является 100% однородной при условии совпадения всех 9 цветов внутри этой области. Вместе с тем, анализом установлено, выявлена локальная неоднородность, которая проявляется при оценках, отличающимися методами. Это разброс значений для структур 1 и 7 и до 20% для – 2 и 3 (см. табл. 2 и 3 столбец 8 и табл. 4, столбцы 7-9). Полученные результаты выявили изображения, оцениваемые при больших увеличениях (более $\times 1000$) и это позволило выявить локальную неоднородность с большей точностью.

Оценивая степень локальной неоднородности, определили изменения плотности дислокаций, на основе чего выполнили расчет средних значений функции мощности диссипации энергии на всем изображении каждой фотографии. При этом фиксировали выявленные отклонения.

Поскольку деформация энергетического состояния металла является процессом неравновесным, то оценку этого параметра принимали с противоположными значениями (отрицательными, характеризующие зоны сброса напряжений), а к положительным относили зоны увеличения плотности дислокаций (соответствующие сжатию). Оценивали и абсолютные значения мощности диссипации, которые характеризовали протекающий процесс в целом. Анализом установили, что закон распределения функции мощности диссипации энергии, происходящий при деформации, является близким к экспоненциальному распределению. На рис. 1, г-е представлены, обработанные оптико-математическим методом фотографии распределения абсолютных значений мощности диссипации энергии исследуемых изображений.

При этом, фиксировали те значения параметров, которые отличались от нуля. Черный цвет характеризует отсутствие диссипации энергии, т.е. равновесное состояние. Превышение величины 11500 характеризует наиболее неустойчивое энергетическое состояние и такая точка соответствует красному цвету. Выбранные параметры граничных значений явились порогом чувствительности используемого метода.

Выявлено, что грубые включения графита в сером чугуна, повышают уровень локальных напряжений, вокруг которых положительные значения диссипации мощности возрастают с 44000 до 56000 (см. табл. 5) за счет увеличения плотности дислокаций. В этих зонах активизируется диффузия углерода, который их декорирует. В отдельных зонах во включениях графита просматриваются изменения цвета и появления в нем светлых зон.

Напряжения оценивали и плотностью дислокаций по средней дисперсии этой функции (табл. 6). Аналогично функциям мощности диссипации напряжений также имеют положительное, отрицательное и нулевое значение, определяющее процессы, протекающие в структурных составляющих. Аналогично рис. 1 был задан предел граничных значений лапласиана, соответствующий 10000, при превышении которого пиксели окрашивались в красный цвет. Картину распределения неоднородного напряженного состояния по изменению цветов иллюстрирует рис. 2.

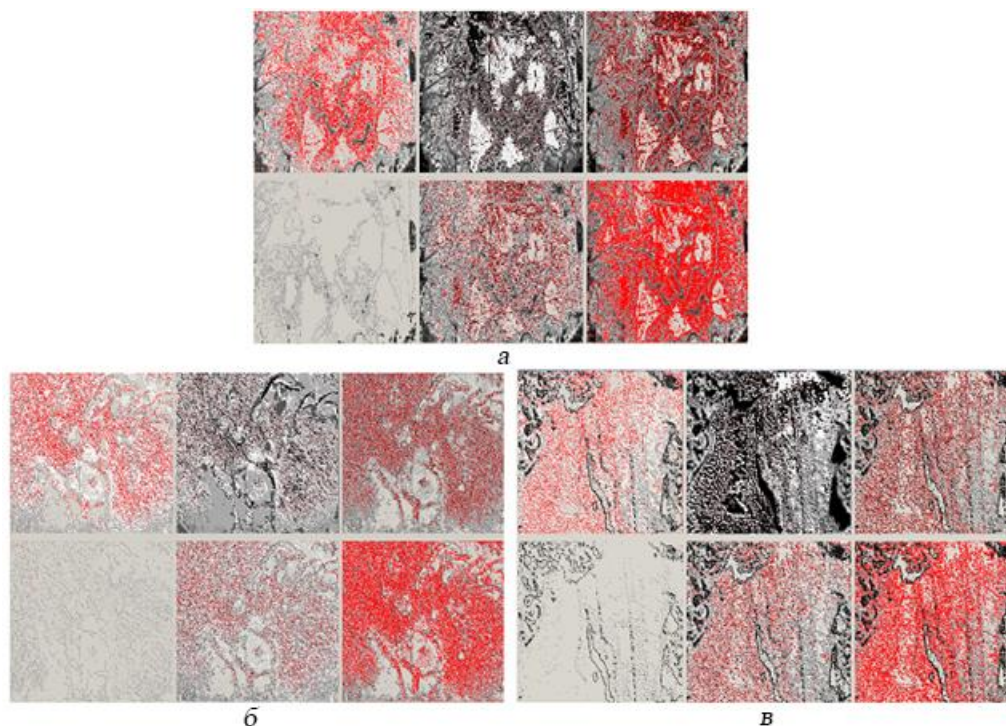


Рис. 2 – Распределение дисперсности функции напряжения. Для каждой структуры: верхний ряд – горизонтальная дисперсность; нижний – вертикальная. Слева – с отрицательным знаком; в центре – нулевая; справа – с положительным знаком

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	z
02.943	01.099	05.124	01.069	02.914	01.093	05.052	01.071	δ
04.886	01.094	08.945	01.090	04.410	01.090	07.990	01.085	e

Показано, что грубые включения графита при кристаллизации повышают уровень локальных напряжений и это определяет склонность серого чугуна к дефектообразованию.

Выводы. Проведенные исследования на основе новых подходов к структурообразованию серых чугунов при их кристаллизации позволили выявить зоны локальных напряжений, оценить величину дисперсности фаз, изменения функций мощности диссипации и плотности дислокаций, а также энергетическое состояние системы, характерное для такого материала и выявить возможные причины его повреждаемости.

Новый подход в оценке свойств рекомендуется для использования оценки изменчивости структуры при различных условиях кристаллизации серого чугуна, упрочнении и восстановлении изделий при эксплуатации, прогнозировании надежности в обеспечении потребительских свойств отливок.

Литература

1. Скобло Т.С. Особенности структурной деградации в отливках из серых чугунов, работающих в условиях нагружения / Т.С. Скобло, О.Ю. Ключко, А.И. Сидашенко, А.В. Сайчук и др. // Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе» - апрель. - 2016. - №4 |41|. - С. 55-57.
2. Скобло Т.С. Разработка новых подходов к оценке структурообразования в высокохромистых чугунах / Т.С. Скобло, О.Ю. Ключко, Е.Л. Белкин, А.И. Сидашенко // заводская лаборатория – 2017, №4 (83) – С. 27-38.
3. Ключко О.Ю. Оценка оптико-математическим методом локальной неоднородности высокоуглеродистых сплавов, образованной в результате РТО / О.Ю. Ключко // Вісник ХНТУСГ ім. П Василенка «Ресурсозберігаючі матеріали та обладнання в ремонтному виробництві» Випуск 183. - Х.: ХНТУСГ, 2017. - С. 20-30.
4. Бабич В.К. Деформационное старение стали / В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков – М.: «Металлургия», 1972, 320 с.

Summary

A. Saychuk Evaluation of structural heterogeneity in castings of hull components from gray cast iron

It is established in the work that local deformation is most intensively developed around coarse aggregates of lamellar graphite and to a lesser extent in the region of cement plates, and defects are decorated due to diffusion of carbon. It was revealed that rough inclusions of graphite in gray cast iron raise the level of local stresses around which positive values of power dissipation increase due to an increase in the dislocation density. The zones of local stresses are revealed, the magnitude of the phase dispersion, the change in the power functions of the dissipation, and the dislocation density are estimated.

Keywords: gray cast iron, local stresses, phase dispersity, dissipation power functions, dislocation density

References

1. Skoblo T.S. Osobennosti strukturnoy degradatsii v otlivkah iz seryih chugunov, rabotayuschih v usloviyah nagruzheniya / T.S. Skoblo, O.Yu. Klochko, A.I. Sidashenko, A.V. Saychuk i dr. // Informatsionno-analiticheskiy mezhdunarodnyiy tehnicheskiy zhurnal «Promyshlennost v fokuse» - aprel. - 2016. - #4 [41]. - S. 55-57.
2. Skoblo T.S. Razrabotka novyih podhodov k otsenke strukturoobrazovaniya v vyisokohromistyyih chugunah / T.S. Skoblo, O.Yu. Klochko, E.L. Belkin, A.I. Sidashenko // zavodskaya laboratoriya – 2017, #4 (83) – S. 27-38.
3. Klochko O.Yu. Otsenka optiko-matematicheskim metodom lokalnoy neodnorodnosti vyisokouglerodistyyih splavov, obrazovannoy v rezultate RTO / O.Yu. Klochko // Visnik HNTUSG Im. P Vasilenka «ResursozberIgayuchi materiali ta obladnannya v remontnomu virobnitstvi» Vipusk 183. - H.: HNTUSG, 2017. - S. 20-30.
4. Babich V.K. Deformatsionnoe starenie stali / V.K. Babich, Yu.P. Gul, I.E. Dolzhenkov – M.: «Metallurgiya», 1972, 320 s.