

УДК 621.74

## ВПЛИВ НАПРУЖЕНЬ НА СТРУКТУРНІ ЗМІНИ В СІРОМУ ЧАВУНІ

Т. С. СКОБЛО, О. І. СІДАШЕНКО, О. В. САЙЧУК,  
О. Ю. КЛОЧКО, Д. А. ЛЕВКІН

*Харківський національний технічний університет сільського господарства  
ім. Петра Василенка*

За результатами моделювання напруженого стану виявлено, що грубі включення графіту, які формуються у перехідних за товщиною стінок корпусних деталях, є осередками зародження дефектів, що розвиваються внаслідок зміни дислокаційної структури та дифузії вуглецю з графіту. Порожнини, які утворюються в графіті, також сприяють розвитку окиснення.

**Ключові слова:** *напруження, структуроутворення, дифузія вуглецю, дислокаційна структура, формування дефектів, енергетичні параметри.*

**Вступ.** Під час експлуатації деталі з високовуглецевих сплавів у машинобудуванні та металургії зазнають впливу різних навантажень, у тому числі циклічних, розтягом, стиском, температурних, що призводять до розвитку структурної неоднорідності та пошкоджуваності. Відомо, що особливу роль у деградації сталей та сплавів відіграють графітові, карбідні та неметалеві включення, які під час виробництва та експлуатації можуть створювати локальні напруження, що супроводжується розвитком дефектів кристалічної будови та дифузійних процесів [1, 2]. Сьогодні для визначення напружень використовують оптико-математичні методи оброблення експериментальних даних [3, 4].

Тому нижче особливу увагу зосередили на вивченні впливу графітової фази на локальні деформації у сірому чавуні, з якого виготовляють виливки корпусних деталей у машинобудуванні. Статистичним аналізом їх якості в умовах спеціалізованого підприємства (приватне акціонерне товариство “Харківський тракторний завод”) виявили, що найбільше пошкоджені перехідні за товщиною зони, які фіксували за результатами вимірювань коерцитивної сили  $H_c$ . Досліджували вплив морфології графітових включень на локальні напруження і зародження тріщин під час кристалізації та експлуатації виливків з сірого чавуну зі змінною товщиною стінки корпусних деталей.

**Методи випробувань.** Деталі для випробувань вибирали за результатами неруйнівного магнетного контролю – суттєвими відхиленнями показників коерцитивної сили  $H_c$  у перехідних зонах з різною товщиною стінки. Для вимірів використовували прилад КРМЦ-К2М.

Щоб визначити структурні зміни у чавуні під впливом локальних напружень, методом травлення виявляли дислокаційну структуру за різних навантажень у вакуумі 0,39 Па, застосовуючи спеціальний мікроскоп. Випробовували зразки 3×4×80 mm (полірували один бік шліфа розміром 4 mm). Зразок жорстко закріплювали в спеціальних пристроях. Після досягнення розрядження у камері нагрівали середню його частину і за допомогою мікроскопа спостерігали та фіксували структурні зміни під час стиску. Далі аналізували одержані фотографії мікроструктур, застосовуючи розроблену методіку оптико-математичного ком-

п'ютерного опису фазових складників та їх зміни [5–8]. При цьому виявляли дефекти структури (дислокації). Вивчали фотографії мікроструктур, отримані на оптичному “MIM-8M”, а також електронних “YEOL JSM-6390LV” та “YSM-820” Link “YEOL” мікроскопах зі збільшеннями від 100 до 11600 разів.

Для виявлення максимального зв'язку відтінків кольорів (згідно з різними відсотками сірого та чорного) між різними фазами аналізували комірки  $C(x, y)$  з різними пікселями (2×2, 3×3, 10×10). Комірка з 3×3 пікселями

$$C(x, y) = \begin{pmatrix} C_{i-1, j-1} & C_{i-1, j} & C_{i-1, j+1} \\ C_{i, j-1} & C_{i, j} & C_{i, j+1} \\ C_{i+1, j-1} & C_{i+1, j} & C_{i+1, j+1} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Аналогічно формували і інші комірки.

Густина дислокацій оцінювали за значеннями, які одержували скануванням пікселів на металографічних зображеннях, які оцифровували у формат *bmp*. Методика комп'ютерного аналізу ґрунтується на гідродинамічних аналогіях з використанням рівнянь Нав'є–Стокса [9].

Зміну дислокаційної структури навколо зон грубих графітових включень, які є концентраторами напружень після відливання та під час експлуатації деталей з сірого чавуну, вивчали в умовах зародження дефектів через локальні деформації та окиснення. Наклеп, викликаний цими чинниками, сприяє підвищенню вільної енергії внаслідок зростання пластичної деформації та подальшому її зменшенню під час розвитку дефектів (дислокацій) та їх упорядкування (формування стінок, комірок). Тому як критерій, що описує зміни дислокаційної структури – її щільність, використовували потужність дисипації енергії [5]

$$M = D(x, y) \cdot L(x, y), \quad (2)$$

яку подавали у вигляді зв'язку дивергенції  $D(x, y)$  та лапласіану  $L(x, y)$  функції  $C(x, y)$ , де  $x, y$  – координати точок металографічного зображення.

При цьому дивергенція

$$D(x, y) = \operatorname{div} C(x, y) = \frac{dC(x, y)}{dx} + \frac{dC(x, y)}{dy} \quad (3)$$

описує щільність фрагмента зображення (зон ущільнення та розрядження), а лапласіан

$$L(x, y) = \Delta C(x, y) = \frac{d^2 C(x, y)}{dx^2} + \frac{d^2 C(x, y)}{dy^2} \quad (4)$$

згідно з (1) – дифузію хімічних компонентів. Таку матрицю обробляли, послідовно скануючи комірки (кожен піксель), та піксель  $C_{ij}$  розглядали як середній центрального зображення.

Скінченно-різницеві подання  $D(x, y)$  та  $L(x, y)$  матимуть вигляд [9]

$$D_{ij} = C_{i, j-1} - 2C_{ij}, \quad (5)$$

$$L_{ij} = C_{i, j-1} + C_{i-1, j} + C_{i, j+1} + C_{i+1, j} - 4C_{ij}. \quad (6)$$

Подамо залежність (2) так:

$$M_{ij} = (C_{i, j-1} + C_{i-1, j} + 2C_{ij}) \cdot (C_{i, j-1} + C_{i-1, j} + C_{i, j+1} + C_{i+1, j} - 4C_{ij}).$$

Під час виявлення деформаційних зон оцінювали середні значення потужності дисипації енергії (розсіяння) на всьому металографічному відображенні, де без додаткового травлення проявлялись тільки графіт та дефекти (дислокації). Оскільки під час деформації енергетичний стан металу нерівноважний, то згідно з розрахунками, такому параметру відповідають значення, що відрізнятимуться

знаками. Стан зони з підвищеною густиною дислокацій, що відповідав стиску, оцінювали зі знаком “плюс”, а з малою – зі знаком “мінус” (зони скидання напружень). Одночасно виявляли зони з абсолютними значеннями потужності дисипації, що характеризують процес загалом. Густиною дислокацій та їх упорядкування оцінювали за фігурами травлення з найбільшими значеннями лапласіанів.

**Результати досліджень.** Зміни структурного стану під час кристалізації та експлуатації оцінювали за фотографіями мікроструктур, одержаних за різних збільшень (рис. 1). Верхній ряд рис. 2 відповідає напруженням (негативним, нульовим і позитивним), а нижній – густині дислокацій у зонах локальних деформацій.



Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Вихідна мікроструктура;  $\times 100$ .

Fig. 1. Original microstructure;  $\times 100$ .

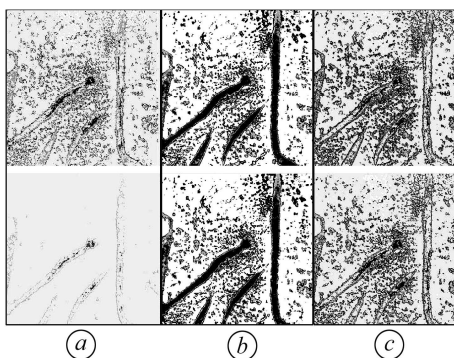


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Порівняльний аналіз структур, оброблених оптико-математичним методом (див. табл. 1 і 2).

Fig. 2. Comparative analysis of structures processed through the optical mathematical method (see Table 1 and 2).

Грубі пластинчасті включення графіту (їх скупчення) під час кристалізації підвищують локальні напруження та навколо них збільшується густина дислокацій, відбувається дифузія вуглецю, яка декорує кристалічні дефекти. При цьому в графіті спостерігаються зміни і з'являються чіткі темні зони (зневуглецювання). На межі включень на дислокаціях з підвищеною густиною формуються крапкові виділення вуглецю. Також дислокації скупчуються поблизу кінців графітових пластинчастих включень, які є осередками зародження тріщин. Їхню появу можна пояснити порушеннями технології виробництва виливків, а також умовами неоднорідної швидкості кристалізації. В першу чергу – різнотовщинністю стінок виливка. У цьому випадку доцільно забезпечити рівномірну швидкість кристалізації, додатково модифікувати метал, щоб сформувати дрібні однорідно розподілені включення графіту, тобто мінімізувати схильність до утворення локальних напружень.

Моделюючи процес створення напружень, зразки нагрівали до різних температур (200; 400 і 600°C) та фіксували зміни структури у деформаційній зоні за жорсткого їх закріплення. Оцінка таких змін методом оптико-математичної обробки фотографій підтвердила, що осередками зародження пор, тріщин, надривів є зони з підвищеною густиною дислокацій. Також виявили, що включення графіту “втрачають частину вуглецю” внаслідок дифузії під напруженням (див. рис. 2). Після експлуатації в умовах зростання температур нагрівання навколо включень графіту дислокаційна структура змінюється з часом і упорядковується

з формуванням сіток (рис. 3). Зі збільшенням частки графіту до 9...11% включення стає грубшим, зростає вміст фериту, зменшується частка перліту і коерцитивна сила знижується в 1,2–1,3 рази [7]. В таких зонах з порожнинами на включеннях графіту зароджуються тріщини (рис. 4).

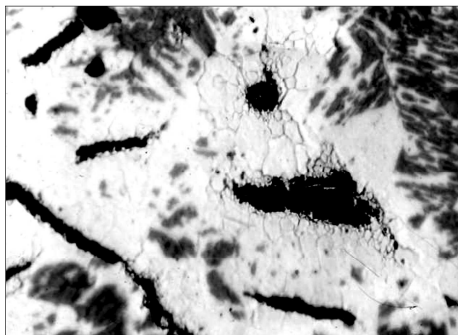


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Формування дислокаційних сіток навколо графіту;  $\times 100$ .

Fig. 3. Formation of dislocation nets around graphite;  $\times 100$ .

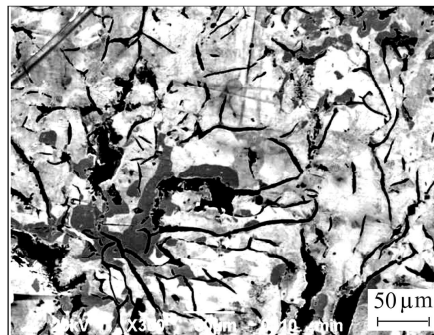


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Тріщини від графіту, що формуються в корпусних деталях з сірого чавуну під час експлуатації.

Fig. 4. Cracks from the graphite that are formed in the case-type parts of grey cast-iron in operation.

Дефекти у перехідних зонах по товщині корпусних деталей спричинені формуванням у них грубших включень графіту, локальними деформаціями, а також посиленням дифузії вуглецю та кисню (неякісна підготовка форми і умови експлуатації). Локальні деформації сприяють підвищенню густини дефектів кристалічного стану та їх зародженню. Поліпшити якість таких деталей можна додатковим модифікуванням та корегуванням швидкості їх кристалізації. Електронно-мікроскопічними дослідженнями виявили дислокації, які формують упорядковану структуру (рис. 5 і 6).



Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Дислокації, розташовані в сітці. Вакуумне травлення;  $\times 11600$ .

Fig. 5. Dislocations in the grid. Vacuum etching;  $\times 11600$ .

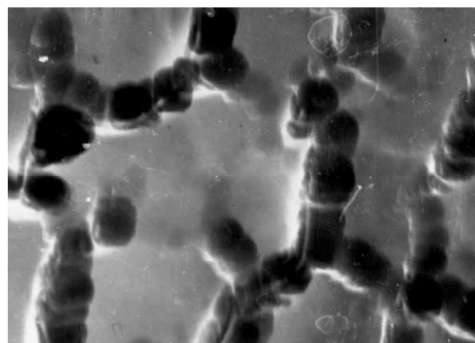
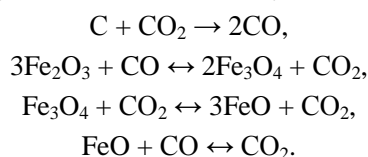


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Дислокаційні сітки навколо графіту, що складаються з ямок травлення. Вакуумне травлення;  $\times 4800$ .

Fig. 6. Dislocation grids around graphite, consisting of etching pits. Vacuum etching;  $\times 4800$ .

За використання неякісних форм для виливання та під час експлуатації навколо графіту формуються кисневі включення. В умовах додаткового розвитку напружень вуглець дифундує, внаслідок чого відбуваються такі реакції:



Така структура характерна для зон з підвищеними напруженнями не тільки біля пластинчастих, але й компактних включень графіту (див. рис. 3), що супроводжується зміною цілісності та зародженням руйнування. Для визначення ступеня структурної неоднорідності промислових виливок зі змінною густиною дислокацій використовували зразки з підвищеними локальними напруженнями. Оцінювали за зміною коерцитивної сили  $H_c$  [10], а потім – металографічно. Встановили, що з підвищенням значення  $H_c$  деформації локалізуються, а з її зниженням виникають деградаційні процеси.

Як критерій, що описує зміну дислокаційної структури, використовували енергетичні параметри (функцію потужності дисипації енергії і напружень) згідно з комірками 3×3 пікселя з послідовним їх скануванням, задаючи середню крапку [6]. При цьому весь діапазон зображень виявлених структур за умовними відтінками кольору від 0 до 255 розбивали на 16 інтервалів, що охоплювали три групи фаз: 1) – фази 1, 2, що відносяться до графіту; 2) 3–10 – які відповідають фериту і відрізняються типом досконалості кристалічної структури та часткою у ній вуглецю; 3) – карбідні фази типу FeC, Fe<sub>x</sub>C<sub>y</sub> і Fe<sub>3</sub>C (табл. 1). Умовні відтінки позначали сірими кольорами, що відрізнялися в інтервалі від білого до чорного.

**Таблиця 1. Кількісне співвідношення виявлених умовних кольорів (характеризує фазовий склад, %) у зонах аналізованого зображення**

Умовні кольори груп фаз															Рис. 2	
графіту		фериту								карбідів						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
26,6	0,5	0	0	2,3	16,6	0	0	0	6,3	15,2	0	0	0	19,2	13,3	<i>a</i>
12,9	0	0	0	0	10,6	0	0	0	6,7	43,7	0	0	0	0	26,1	<i>b</i>
39,0	1,7	0	0	2,1	10,9	0	0	0	3,3	19,3	0	0	0	5,5	18,1	<i>c</i>

Неоднорідність розподілу деформацій оцінювали за локальним вмістом вуглецю в зонах з підвищеною густиною дислокацій, декорованих цим компонентом (сформованої структури) під час кристалізації в умовах локальних пластичних напружень. Враховували результати виконаних раніше досліджень, які свідчили про залежність пластичності перліту від орієнтації пластин цементиту до напрямку діючої деформації. Відомо, що напрям ковзання дислокацій у фериті та цементиті пластин перліту збігається рідко, тому у твердій фазі збільшується їх густина. У цьому випадку через незначну схильність до дефектоутворення найтвердшого структурного складника (цементиту) за малих деформацій у м'якій фазі (фериті) суттєво зростає неоднорідність і збільшується густина дислокацій. Тут важливу роль відіграє межа їх розподілу, що є не тільки джерелом розвитку напружень, але й перешкодою для ковзання дислокацій.

На рис. 7 подано металографічні зображення під час локальної деформації (див. рис. 3а–с) експлуатованих зразків, відібраних з зон корпусних деталей зі сірого чавуну зі змінною товщиною відливка та підвищеною коерцитивною силою (див. рис. 3д, ф).

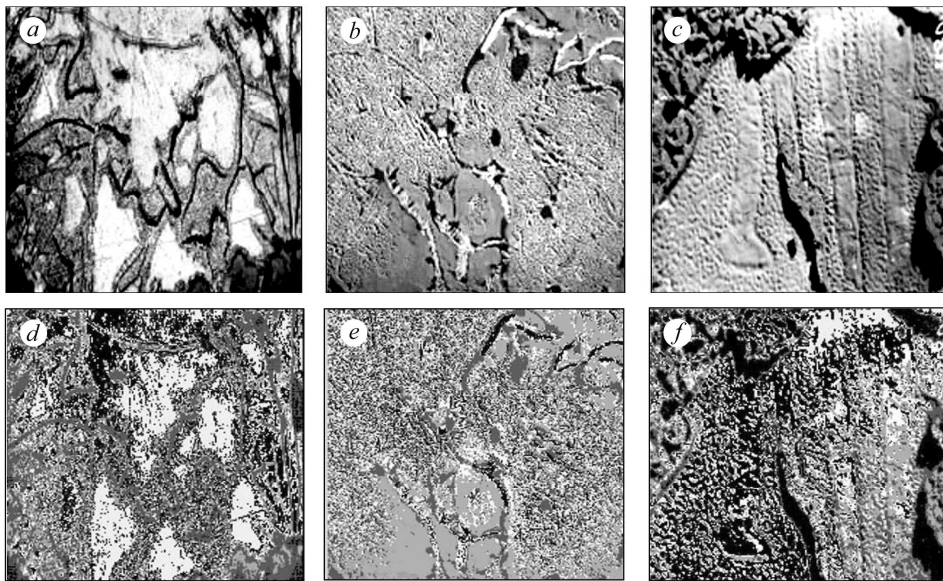


Рис. 7. Мікроструктура виливків корпусних деталей зі сірого феритно-перлітного чавуну: *a, d* – у литому стані,  $\times 500$ , у зоні пластичної деформації з підвищеною коерцитивною силою; *b, e* – у зоні скупчення грубих включень графіту,  $\times 200$ ; *c, f* – у зоні цементитних пластин,  $\times 1000$ ; *a-c* – вихідний стан, *d-f* – після оптико-математичної обробки.

Fig. 7. Microstructure of castings of the case-type parts of grey ferritic-pearlitic cast-iron: *a, d* – in cast state  $\times 500$ , in the area of plastic deformation with high coercive field strength; *b, e* – in the zone of accumulation of coarse particles of graphite,  $\times 200$ ; *c, f* – in the area of cementite plates,  $\times 1000$ ; *a-c* – original state, *d-f* – after optical mathematic processing.

Виявили, що локальна деформація інтенсивніше проявляється навколо грубих скупчень пластинчастого графіту і менше – в зоні пластин цементу, а дефекти декоруються внаслідок дифузії вуглецю. Дисперсність фаз, їх взаємозв'язок і частку оцінювали зіставно за горизонтальною та вертикальною спрямованістю (анізотропією структури) в локальних зонах (табл. 2).

**Таблиця 2. Дисперсність фаз (відносна кількість пікселів) у локальних зонах зображення комірок розміром  $3 \times 3$  пікселя**

Фази							Середнє значення дисперсності	Рис. 2
ферит	графіт	карбіди	ферит + + графіт	ферит + + карбіди	карбіди + + графіт	ферит + + графіт + + карбіди		
Горизонтальна дисперсність								
10,032	2,665	9,082	2,691	5,015	2,805	2,582	5,794	<i>a</i>
5,959	3,304	10,878	2,257	4,531	2,730	2,752	5,456	<i>b</i>
20,277	2,442	14,213	2,174	4,563	2,423	2,670	8,537	<i>c</i>
Вертикальна								
10,092	2,587	9,071	2,733	5,020	2,813	2,592	5,804	<i>a</i>
5,931	2,850	10,722	2,181	4,657	2,659	2,702	5,402	<i>b</i>
17,078	2,287	12,229	1,952	3,969	2,161	2,379	7,370	<i>c</i>

Аналіз отриманих значень виявив суттєві фазові неоднорідності (мінливості) стану структур за різними напрямками вимірювань (згідно з анізотропією), що залежать від дислокації структури – її густини у локальних мікронах, і добре узгоджується зі значеннями функції потужності дисипації енергії, яка перевищує заданий поріг (табл. 3, рис. 7*d–f*).

**Таблиця 3. Розподіл середніх значень функції потужності дисипації енергії**

Абсолютне		Негативне		Позитивне		Рис. 7
середнє	середньо-квадратичне відхилення	середнє	середньо-квадратичне відхилення	середнє	середньо-квадратичне відхилення	
15273,8	48129,2	1437,8	1437,9	55222,0	78603,3	<i>d</i>
14636,3	49301,5	1579,1	1302,1	48134,1	79950,5	<i>e</i>
8381,7	36017,3	1290,2	1111,4	44084,7	72525,3	<i>f</i>

Зіставні дослідження локальної неоднорідності у виявлених фазах виконували згідно з критерієм, висвітленим раніше [8] (табл. 4). Встановили розкид значень для різних структур (див. табл. 2). Зображення аналізували за збільшень до 1000 разів, що дало можливість оцінити локальну неоднорідність з достатньою точністю.

**Таблиця 4. Мінливості у локальних зонах зображення розміром комірок 3×3 пікселя**

Виявлені фази									Рис. 7
ферит + графіт		графіт + карбіди		ферит + карбіди		ферит + графіт + карбіди			
графіт	ферит	графіт	карбіди	ферит	карбіди	графіт	ферит	карбіди	
1,26	1,66	1,57	2,42	2,37	2,76	1,63	2,03	2,44	<i>d</i>
1,27	1,66	1,65	2,51	2,42	2,78	1,65	2,07	2,48	<i>e</i>
1,24	1,67	1,55	2,44	2,36	2,77	1,56	2,02	2,45	<i>f</i>

За ступенем локальної неоднорідності визначили зміну густини дислокації і розраховували середні значення функції потужності дисипації енергії на кожному зображенні та фіксували виявлені відхилення. Оскільки деформація енергетичного стану металу нерівноважна, то її оцінювали у зонах збільшення густини дислокацій (за стиску). Визначили також абсолютні значення потужності дисипації, які характеризували процес загалом. Встановили, що закон розподілу функції потужності дисипації енергії під дією деформації є близьким до експонентного (рис. 7*d–f*). При цьому фіксували ті значення параметрів, які відрізнялися від нуля. Чорний колір свідчить про відсутність дисипації енергії, тобто про рівноважний стан. Перевищення величини 11500 характеризувало найбільш нестійкий енергетичний стан і такий піксель відповідав сірому кольору. Обрані параметри вважали границею чутливості цього методу досліджень.

Встановили, що грубі включення графіту в чавуні підвищують локальні напруження. Навколо них позитивні значення дисипації потужності зростають на 25% – з 44000 до 56000 внаслідок збільшення густини дислокацій. У цих зонах активізується дифузія вуглецю, який їх декорує та змінює колір. Напруження оцінювали згідно з густиною дислокацій за середньою дисперсією цієї функції (табл. 5). Як і функції потужності, дисипації напруження також мають позитивне, негативне і нульове значення, що визначає процеси у структурних складниках

чавуну. Задавали межу граничних значень лапласіана, який відповідає 10000. За його перевищення пікселі забарвлювалися в сірий колір (рис. 8).

**Таблиця 5. Середня дисперсність функцій напружень (відносна кількість пікселів)**

Горизонтальна дисперсність	Горизонтальна дисперсність функцій напруги			Вертикальна дисперсність	Вертикальна дисперсність функцій напруги			Рис. 7
	негативних	нульових	позитивних		негативних	нульових	позитивних	
3,129	1,000	5,253	1,000	3,122	1,099	5,734	1,097	<i>d</i>
2,943	1,099	5,124	1,069	2,914	1,093	5,052	1,071	<i>e</i>
4,886	1,094	8,945	1,090	4,410	1,090	7,990	1,085	<i>f</i>



Рис. 8. Розподіл дисперсності функцій напружень для кожної структури: верхній ряд – горизонтальна дисперсність; нижній – вертикальна. Ліворуч – з негативним знаком; у центрі – з нульовим; праворуч – з позитивним. Сірий колір – щільність дислокаційної структури. Лапласіани перевищують 10000 (*a* – відповідає рис. 7*a*, *b* – рис. 7*b*, *c* – рис. 7*c*).

Fig. 8. Distribution of stress functions for each structure: top row shows horizontal dispersity; bottom row – vertical dispersity. The left-hand part indicates negative dispersity; the central part – zero dispersity; the right-hand part – positive. Dislocation structure density is given in grey. The value of Laplacian operators exceeds 10000 (*a* – corresponds to Fig. 7*a*, *b* – Fig. 7*b*, *c* – Fig. 7*c*).

## ВИСНОВКИ

На основі нових підходів до виявлення змін структуроутворення сірих чавунів під час їх кристалізації та експлуатації зафіксовано зони локальних напружень, оцінено зміни функцій потужності дисипації та густини дислокацій (енергетичний стан системи), які є характерними для такого матеріалу, і спрогнозовано можливі чинники розвитку пошкод. Оптико-математичний метод оцінки морфологічних змін рекомендовано для визначення впливу різних умов виробництва корпусних деталей з сірого чавуну під час експлуатації на їх якісні показники, а



також для прогнозування надійності, щоб забезпечити споживчі потреби. Одержану інформацію можна ефективно використати для обґрунтування нових технологічних параметрів виробництва.

**РЕЗЮМЕ.** По результатам моделирования напряженного состояния выявлено, что грубые включения графита, которые формируются в переходных по толщине стенок корпусных деталях, являются очагами зарождения дефектов, которые развиваются вследствие изменения дислокационной структуры и диффузии углерода из графита. Полости, образующиеся в графите, способствуют также окислению.

**Ключевые слова:** *напряжение, структурообразование, диффузия углерода, дислокационная структура, формирование дефектов, энергетические параметры.*

**SUMMARY.** According to the results of the stress state modeling, it was found that coarse graphite inclusions that are formed in the case-type parts that are transitional in the wall thickness, are the sites of defects nucleation that propagate due to changes in the dislocation structure and carbon diffusion from graphite. Cavities, formed in graphite, contribute to the development of oxidation.

**Keywords:** *stress, structure formation, carbon diffusion, dislocation structure, defect formation, energy parameters.*

1. *Shape and count of free graphite particles in thin wall ductile iron casting / J. M. Borrajo, R. A. Martinez, R. E. Boeri, J. A. Sikora // ISIJ International. – 2002. – 42, № 3. – P. 257–263.*
2. *Study of the tribological behavior in a nodule cast iron using techniques of image morphological processing / A. M. Herrera Navarro, H. Peregrina Barreto, F. Manriquez Guerrero, I. R. Terol Villalobos, L. A. Morales Hernández // Superfrise y Vasio. – 2012. – 25, № 1. – P. 14–20. (in Spanish)*
3. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П. Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – 40, № 5. – С. 67–72.*  
(*Panasyuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P. Analysis of the elastoplastic deformation of the material in the process zone // Materials Science. – 2004. – 40, № 5. – P. 648–655.*)
4. *Вибір бази вимірювання переміщень для визначення деформації методом оптико-цифрової кореляції зображень / Л. Я. Іваницький, П. С. Кунь, Т. М. Ленковський, Ю. В. Мольков, С. Т. Штаюра // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 6. – С. 94–98.*  
(*The choice of spacing in measuring displacements for the evaluation of strains by the method of optical-digital image correlation / Ya. L. Ivanyts'kyi, P. S. Kun', T. M. Lenkovs'kyi, Yu. V. Mol'kov, S. T. Shtayura // Materials Science. – 2018. – 53, № 6. – P. 849–854.*)
5. *Исследование структуры высокохромистых чугунов / Т. С. Скобло, О. Ю. Клочко, Е. Л. Белкин, А. И. Сидашенко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – 83, № 5. – С. 27–38.*
6. *Скобло Т. С., Клочко О. Ю., Белкин Е. Л. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – 78, № 6. – С. 35–42.*
7. *Effective technological process of crystallization of turning rollers' massive castings: development and analysis / T. Skoblo, O. Klochko, E. Belkin, A. Sidashenko // Int. J. of Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – 2017. – № 2 (3). – P. 34–39.*
8. *Новые подходы в исследовании неоднородности гетерогенных структур / Т. С. Скобло, О. Ю. Клочко, Е. Л. Белкин, А. И. Сидашенко // Металлофізика та новітні технології. – 2018 – 40, № 2. – С. 255–280.*
9. *Скобло Т. С., Белкин Е. Л., Клочко О. Ю. Обоснование применения понятий уравнений гидродинамики Навье–Стокса для анализа металлографических изображений // Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji “Europejska nauka XXI wieku – 2011”. Vol. 21. Techniczne nauki. – Przemyśl: Nauka i studia, 2011. – S. 94–96.*
10. *Эффективная технология восстановления корпусных деталей из серого чугуна методом заварки дефектов / Т. С. Скобло, А. И. Сидашенко, А. В. Сайчук, Е. Л. Белкин // Сварочное производство. – 2017. – № 12. – С. 33–39.*

*Одержано 05.06.2018*