

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Материаловедение

УДК 621.791:620.172

DOI 10.31242/2618-9712-2018-24-2-58-66

Влияние формы включений графита в чугунах на искажения кристаллической решетки и трещиностойкость при моделировании эксплуатационных нагрузок на рабочие органы горных машин, работающих в условиях естественных низких температур

В.П. Гуляев*, М.М. Сибиряков**, П.П. Петров***, К.В. Степанова***

**Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Якутск, Россия*

***Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия*

****Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия*

Аннотация. Исследована качественная связь структурных составляющих чугунов с феррито-перлитной металлической основой и трещиностойкостью на лабораторных образцах, подвергнутых ударно-циклическому нагружению, моделирующему эксплуатационные нагрузки рабочих органов горных машин. Определение величины пластических деформаций, развивающихся при разрушении лабораторных образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной, производилось методом рентгеновской дифрактометрии отдельных областей фронтальной плоскости образцов по определенной схеме с известными расстояниями центра области съемки от вершины иницирующего надреза. Установлено, что по характеристикам дифракционных профилей гетерофазных сплавов (конструкционных материалов типа чугунов и сталей) возможно не только выделение деформированных областей элементов конструкций, но и определение относительного уровня искажений кристаллов. Отмечено, что основные характеристики дифракционных профилей отражают течение процессов микродеформации ансамбля металлической основы с разными составляющими микроструктуры гетерофазных сплавов.

Ключевые слова: сплавы, включения графита, феррит, перлит, дифракционные профили, интенсивность отражения, трещиностойкость.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность профессору Н.С. Козуту за помощь при проведении цикла механических испытаний, ценные замечания и предложения при работе над данной статьей.

DOI 10.31242/2618-9712-2018-24-2-58-66

Effect of form of graphite inclusions in cast irons on distortions of crystal lattice and crack resistance at modeling of operational loads of working elements of mining machines functioning in natural low temperature conditions

V.P. Gulyaev*, M.M. Sibiryakov**, P.P. Petrov***, K.V. Stepanova***

**Yakut State Agricultural Academy, Yakutsk, Russia*

***M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

****V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia*

Abstract. A high-quality relation of structural components of cast irons with a ferrite-pearlitic metal base and crack resistance of laboratory specimens subjected to impact cyclic loading modeling operational loads of working elements of mining machines is investigated. Determination of a value of plastic strains developing at destruction of the laboratory specimens with a previously grown fatigue crack was made by a X-ray diffractometry method of certain areas of a frontal plane of the specimens according to a particular scheme with known distances of a center of a shooting field from an initiating notch base. It is possible to select the deformed areas of construction elements and determine a relative level of distortions of crystals according to characteristics of diffraction profiles of heterophase alloys (constructional materials like the cast irons and steels). It is established that the main characteristics of the diffraction profiles indicate a course of microstrain processes of a metal base complex with the different components of a microstructure of the heterophase alloys.

Key words: alloys, graphite inclusions, ferrite, pearlite, diffraction profiles, intensity of reflection, crack resistance.

Acknowledgments. The authors express their deep gratitude to prof. N.S. Kogut for his help at the mechanic tests cycle implementation and valuable remarks and proposals regarding the article.

Введение

Опыт эксплуатации горных машин и оборудования, магистральных газо- и нефтепроводов, других технических систем показывает, что совокупность технических требований, предъявляемых к металлам машин и конструкций, не в полной мере обеспечивает их надежную эксплуатацию в течение длительного периода [1–3]. Наблюдаются отказы и аварийные разрушения машин, магистральных газо- и нефтепроводов. Достигнутая в настоящее время степень контроля параметров технологических переделов не обеспечивает требуемый уровень сопротивления конструкционных материалов возникновению и распространению трещин. В частности, не изучена связь гетерофазной структуры и субструктуры конструкционных материалов (сталей, чугунов) с характером их разрушения, возникновения и распространения трещин при статических и динамических нагрузках [4–7].

Целью данной работы является определение качественной связи между структурными составляющими чугунов с одной феррито-перлитной металлической основой и трещиностойкостью при ударно-циклическом нагружении лабораторных образцов. Поставленная цель исследования была достигнута путем применения метода рентгеновской дифрактометрии ос-

новных параметров микроструктуры, отражающих связь микроструктуры и микропластических деформаций в области перед вершиной усталостной трещины, выращенной при ударно-циклическом нагружении образцов консольным изгибом.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленных задач в качестве исследуемых материалов были выбраны серый чугун марки СЧ 20 и чугун с вермикулярным графитом ЧВГ 40. Выбор данных гетерофазных (феррито-перлитных) сплавов обусловлен тем, что чугун – хрупкий материал с минимальным уровнем пластических деформаций при росте магистральной трещины. Металлическая основа чугунов подобна металлической основе сталей. Принципиальное отличие заключается в наличии у чугунов графитных включений различной формы, способствующих или препятствующих возникновению и распространению пластических деформаций. Такие свойства чугунов обеспечивают необходимые исходные предпосылки для выделения роли отдельных структурных составляющих в протекании процессов пластической деформации. Химический состав исследуемых чугунов приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Химический состав чугунов
Chemical composition of cast alloys

Марка чугуна	Содержание химических элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
СЧ 20	3,0	2,15	0,30	0,05	0,03	0,03	0,05	0,06
ЧВГ 40	3,2	2,13	0,41	0,07	0,02	0,3	0,06	0,02

Режимы термической обработки и твердость по Бринеллю заготовок чугунов СЧ 20 и ЧВГ 40

Heat treatment conditions and Brinell hardness of samples of cast iron GI 20 and CGI 40

Марка чугуна	Режимы термической обработки	σ_b , МПа	Твердость, НВ
СЧ 20	Отжиг: нагрев до 770 К, выдержка 6 ч, охлаждение с печью до 520 К, последующее охлаждение на воздухе	200	210 НВ
ЧВГ 40	Закалка: нагрев до 1173 К, охлаждение в масле Отжиг: нагрев до 773 К, выдержка 6 ч, охлаждение с печью до 473 К, последующее охлаждение на воздухе	390	220 НВ

Лабораторные образцы чугуна марки СЧ 20 для испытаний на растяжение, определения характеристик трещиностойкости и исследования распространения пластических деформаций при ударно-циклическом выращивании магистральной усталостной трещины с последующим статическим изгибом до разрушения были изготовлены из заводских отливок, предназначенных для изготовления молотков дробильного оборудования.

Режимы термической обработки указанных марок чугунов, которым были подвергнуты заготовки лабораторных образцов, представлены в табл. 2.

Анализ микроструктуры проведен в соответствии с требованиями и по эталонным шкалам ГОСТ 3443–87 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения микроструктуры». Структура исследуемого серого чугуна СЧ 20 имеет равномерно распределенные включения пластинчатого графита в феррито-перлитной металлической основе, размеры которых 500–1000 мкм. Площадь, занятая графитом в исследуемом образце серого чугуна СЧ 20, составляет 8–12 %, площадь перлита, определенная по 3 полям зрения – 30–60 %.

Чугун ЧВГ 40 обладает равномерно распределенной утолщенной формой вермикулярного графита, с шаровидным графитом не более 5% от всей площади поля зрения. Металлическая основа чугуна ЧВГ 40 так же феррито-перлитная, 30–60 % площади занято перлитом. На рис. 1 показана микроструктура исследованных образцов чугунов при значительных увеличениях, выявляющих характерные особенности структурных составляющих (оптический микроскоп МЕТАМ РВ 21 с мультимедийной приставкой).

Характеристики механических свойств исследуемых марок чугунов СЧ 20 и ВЧ 50 – 2 после термической обработки заготовок получены при испытании на растяжение стандартных пропорциональных образцов типа III диаметром 6 мм по ГОСТ 1497–84. Определение

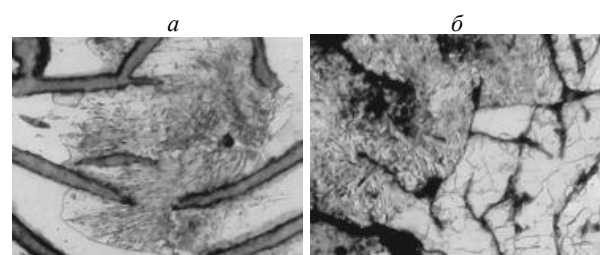


Рис. 1. Микроструктура серого чугуна СЧ 20 с пластинчатым графитом (x 1440, а) и чугуна марки ЧВГ 40 с вермикулярным графитом (x 900, б)

Fig. 1. Microstructure of gray iron GI 20 with lamellar pearlite (x 1440, a) and compacted graphite iron (vermicular graphite iron) CGI 40 (x 900, b)

твердости проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 9012 – 59 (ИСО 410 – 82, ИСО 6506 – 81) «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю» (табл. 3). Характеристики трещиностойкости исследуемых марок чугунов были определены по ГОСТ 25506 – 85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» на плоских прямоугольных образцах с краевой трещиной типа 4 при испытаниях на трехточечный изгиб (рис. 2).

Из плоских прямоугольных заготовок серого чугуна СЧ 20 и чугуна ЧВГ 40, подвергнутых

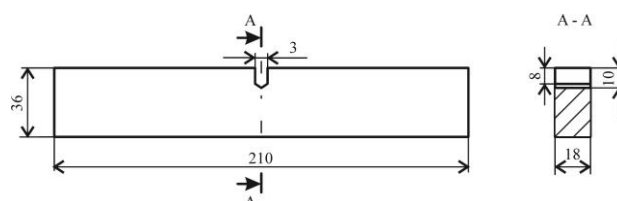


Рис. 2. Вид и геометрические размеры образцов для испытаний на трещиностойкость и исследования распространения микропластических деформаций при росте усталостной трещины

Fig. 2. Type and geometric dimensions of samples for crack resistance testing and investigation of propagation of microplastic strains with fatigue crack growth

термической обработке (табл. 2), были изготовлены 2 партии лабораторных образцов типа 4 по ГОСТ 25506–85 (рис. 2). Иницирующие усталостные трещины краевые надрезы были нанесены в соответствии с требованиями ГОСТ 25506–85. Завершающие операции выполнены финишным шлифованием дна краевого надреза шлифовальным кругом с V-образным углом заточки $\alpha = 60^\circ$ и радиусом $\rho \leq 0,1$ мм.

По лабораторным образцам первой партии были определены характеристики трещиностойкости серого чугуна СЧ 20 и чугуна ЧВГ 40 при нормальных условиях испытания. Полученные при испытаниях характеристики механических свойств и значения критического коэффициента напряжений по ГОСТ 25506–85 исследуемых марок чугунов K_{Ic} приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

**Характеристики механических свойств
и трещиностойкость чугунов СЧ 20 и ЧВГ 40**
**Characteristics of mechanical properties
and crack resistance of GI 20
(gray iron) and CGI 40 (compacted graphite iron)**

Марка чугуна	σ_s , МПа	НВ	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}
СЧ 20	200	210	9,8
ЧВГ 40	390	220	13,9

Рентгенодифракционный спектр от плоскости 220 указанных областей регистрировался на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV при горизонтально устанавливаемых объектах съемок. Съемка проводилась по схеме $\theta - 2\theta$ сканирования с фокусировкой по Брэггу - Брентано в интервале углов $123-125^\circ$ с использованием Co – анода рентгеновской трубки. Характеристики сканирования: скорость – $0,1^\circ/\text{мин}$, шаг – $0,01^\circ$, ось сканирования – $2\theta/\theta$.

Геометрия съемки: ширина щели Соллера, ограничивающей падающий пучок, по горизонтали – 10 мм, по вертикали – $0,5^\circ$. Щели на падающем и дифрагированном пучке – 5° . Ширина щели, ограничивающей дифрагированный пучок по вертикали перед приемной щелью – $0,5^\circ$. Установленная геометрия обеспечивала получение профиля рентгеновской линии от области съемки размером $3 \times 1,0$ мм.

Рабочий режим рентгеновской трубки дифрактометра: напряжение $U = 40$ кВ; ток $I = 40$ мА.

Инструментальное уширение регистрировалось экспериментально съемкой при тех же условиях эталонных образцов чугунов СЧ 20 и ЧВГ 40, в которых физическое уширение близко к нулю ($D > 0,15$ мкм, $\rho < 10^8$ см⁻²). Исходная микроструктура эталонных образцов чугунов СЧ 20 и ЧВГ 40 была получена путем их рекри-

сталлизационного отжига по режиму: нагрев в вакууме до 973 К, выдержка в течение 3 часов, последующее остывание с печью.

С целью получения профиля рентгеновской линии, отвечающей плоскостям с задними углами отражения, выбрана плоскость $hkl = (220)$. При анализе определялась полная ширина дифракционного пика на половине высоты $FWHM$ (с учетом эталона). Расшифровка дифрактограммы осуществлялась пакетом программ *PDXL* – 2 с международной базой дифракционных данных.

Результаты и обсуждение

Исследование пластических деформаций методом рентгеновской деформометрии было проведено на второй партии плоских прямоугольных образцах серого чугуна СЧ 20 и чугуна ЧВГ 40 с краевой усталостной трещиной разрушенных трехточечным изгибом. Усталостная трещина на образцах была выращена под воздействием ударно-циклической нагрузки, моделирующей нагружение рабочих элементов дробильных устройств горных машин и последующего. Нагружение лабораторных образцов осуществлялось консольным ударно-циклическим поперечным изгибом, моделирующим эксплуатационный режим нагружения молотков дробильных машин.

Конструкция установки обеспечивает приложение ударной нагрузки на образец различной амплитуды, длительности и частоты. Толкатель нагружающего устройства перемещает свободный конец консольно закрепленного лабораторного образца типа 4 по ГОСТ 25506–85 на величину прогиба f , устанавливаемую в зависимости от требуемого уровня напряжений в вершине надреза (рис. 3). Величина прогиба f или амплитуды прилагаемой ударной нагрузки задается механической системой установки путем перемещения нагружающего устройства на необходимое расстояние с учетом профиля кулачка.

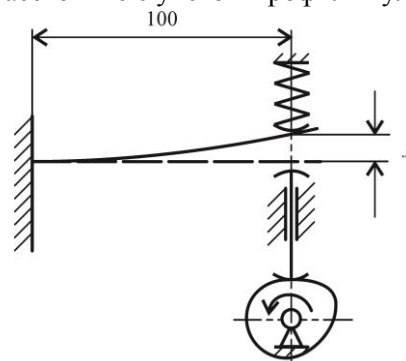


Рис. 3. Схема нагружения при ударно-циклическом нагружении

Fig. 3. Loading scheme for impact cyclic loading

При ударно-циклическом нагружении образцов серого чугуна СЧ 20 и чугуна ЧВГ 40 с заданным прогибом свободного конца образцов $f = 0,3$ мм и частотой $\nu = 1,167$ Гц длительность ударного воздействия составляла $t = 0,14$ с. В ходе ударно-циклического нагружения исследуемых образцов осуществлялся контроль за ростом усталостной трещины и количеством циклов нагружения. По мере роста числа циклов нагружения уровень напряжений и деформаций в области перед вершиной трещины снижается, рост трещины прекращается. Длина усталостной трещины и количество циклов ударно-циклического нагружения приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Количество циклов ударно-циклического нагружения
и длина усталостной трещины
Total number of impact cyclic loading cycle
and fatigue crack length

Марка чугуна	Количество циклов, $N_{\text{цикл}}$	Глубина трещины l , мм
СЧ 20	335	10,8
ЧВГ 40	449	10,7

Напряженно-деформированное состояние при указанных видах нагружения (заданной величине прогиба $f = 0,3$ мм) оценивалось расчетом методом конечных элементов на трехмерной модели исследуемого лабораторного образца в системе APM WinMachine. В соответствии с поставленной целью исследования предварительная оценка напряженно-деформированного состояния необходима для последующего сопоставления с результатами рентгеновской съемки отдельных областей фронтальной плоскости образцов, подвергнутых ударно-циклическому нагружению и последующему долому монотонно возрастающей нагрузкой при известных характеристиках трещиностойкости.

Для установления величины пластических деформаций, развивающихся при разрушении лабораторных образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной, производилась рентгеновская съемка отдельных областей плоскости образцов по определенной схеме с известными расстояниями центра области съемки от вершины иницирующего надреза (рис. 4).

Выбор точек рентгеновской съемки обосновывается следующим. Область фронтальной плоскости образца с центром 1 прилегает к поверхности распространения усталостной трещины. Остаточные деформации кристаллической структуры образца, выявленные рентгеновской съемкой этой области, характеризуют напряженно-деформированное состояние, при котором усталостная трещина продолжала свое распространение.

В области рентгеновской съемки с центром 2 остаточные деформации кристаллической структуры обусловлены напряженно-деформированным состоянием, вызванным приложением нагрузки при доломе образца трехточечным изгибом. Для сравнения проводилась рентгеновская съемка области фронтальной плоскости образца с центром 3, в которой должны наблюдаться остаточные пластические деформации, достигнутые при максимальном уровне напряженно-деформированного состояния образца с известными условиями нагружения и геометрии.

Дифракционные профили кристаллографических плоскостей (220) исследуемых областей фронтальной плоскости лабораторных образцов чугунов СЧ 20 и ЧВГ 40 с центрами 1, 2 и 3 показаны на рис. 5. В табл. 5 указаны числовые значения основных характеристик дифракционных профилей, полученных путем автоматической обработки спектров пакетом программ PDXL-2.

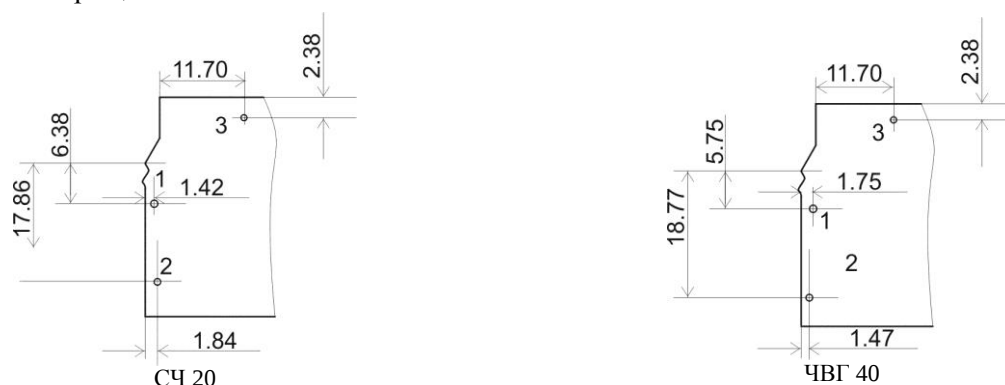


Рис. 4. Схематическое представление центров областей рентгеновской съемки фронтальной плоскости образцов с указанными расстояниями центров областей от вершины иницирующего надреза

Fig. 4. Schematic representation of centers of X-ray photography areas of frontal plane of samples with indicated distances of centers of areas from initiating notch base

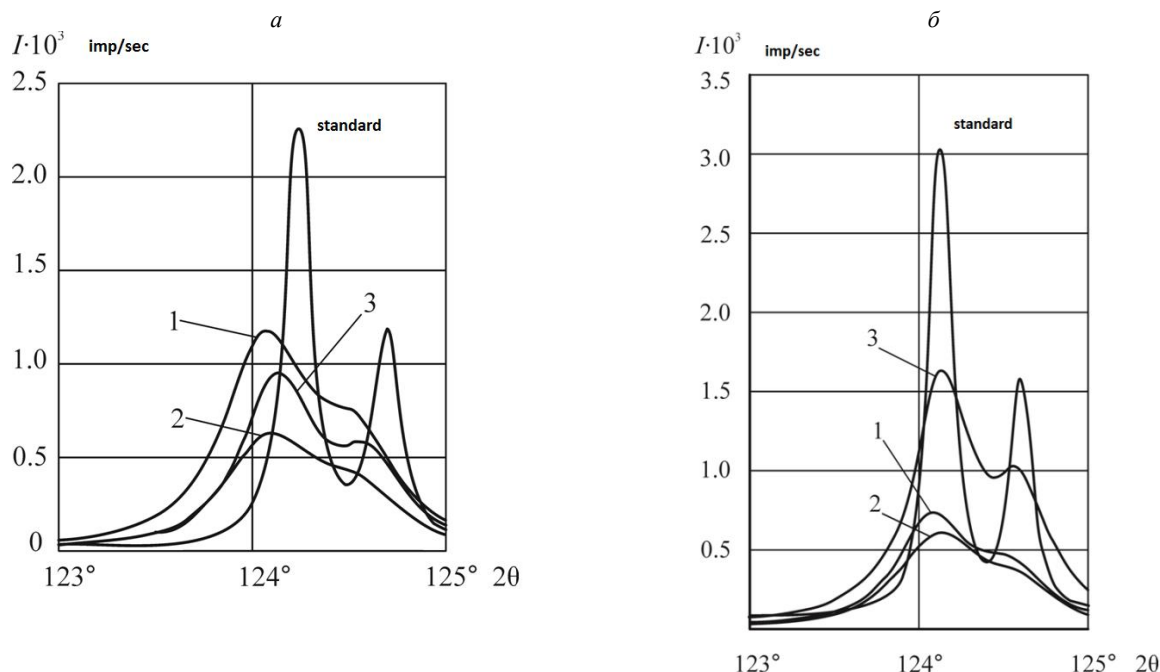


Рис. 5. Дифракционные профили от плоскостей 220 деформированных областей образцов чугунов СЧ 20 (а), ЧВГ 40 (б), подвергнутых ударно-циклическому нагружению и последующему статическому разрушению: 1 – область, примыкающая к плоскости распространения фронта усталостной трещины; 2 – область, примыкающая к поверхности излома; 3 – область с остаточными пластическими деформациями

Fig. 5. Diffraction profiles from planes (220) of strained areas of samples of GI 20 (gray iron) (a) and CGI 40 (compacted graphite iron) (b) subjected to impact cyclic loading and subsequent static destruction:

1 – area adjacent to plane of propagation of fatigue crack front; 2 – area adjacent to fracture surface; 3 – area with residual plastic strains

Сопоставление общего вида дифракционных профилей исследованных образцов чугунов СЧ 20 и ЧВГ 40 (рис. 5) выявляет значительное различие по интенсивности пиков. Вермикулярный чугун обладает большей интенсивностью отражения от кристаллографической плоскости (220) как в отожженном состоянии (эталон), так и в области с центром 3 без явных следов пластической деформации. При этом интенсивность профиля области с центром 3 чугуна ЧВГ 40 значительно выше, чем у дифракционного профиля такой же области образца серого чугуна СЧ 20.

Необходимо отметить, что дифракционные профили, снятые от плоскостей (220) в области 2, имеют совпадение по своему виду и характеристикам для чугунов с пластинчатым и вермикулярным графитом (кривые 2 на рис. 5, табл. 5). Возможно, это обусловлено общей феррито-перлитной металлической основой исследуемых чугунов, в которой равное соотношение площадей феррита и перлита.

Напротив, профили кристаллографических плоскостей (220) области 1, удаленной от поверхности усталостной трещины на расстоянии 1–2 мм, значительно уширены по сравнению со значениями *FWHM* эталонов (образцы в отожженном

Т а б л и ц а 5

Основные характеристики дифракционных профилей плоскостей 220 исследуемых областей с центрами 1, 2 и 3 образцов СЧ 20 и ЧВГ 40

Main characteristics of diffraction profiles of planes (220) of studied areas with centers in points 1, 2 and 3 of cast iron samples GI 20 and CGI 40

Марка чугуна	Номер области	$2\theta^\circ$	d , нм	<i>FWHM</i>
СЧ 20	1	124,053	0,101281	0,515
	2	124,079	0,101269	0,558
	3	124,121	0,101249	0,431
	Эталон	124,234	0,101197	0,181
ЧВГ 40	1	124,066	0,101275	0,491
	2	124,097	0,101261	0,559
	3	124,119	0,101250	0,423
	Эталон	124,127	0,101247	0,159

состоянии) и области 3. Это отличие, выявляемое дифрактометрией, объясняется высокими градиентами напряжений и деформаций, при которых усиливается влияние формы включений графита в общей феррито-перлитной основе чугунов.

Заметно, что интенсивность дифракционного профиля кристаллографических плоскостей (220) в ансамбле с вермикулярной формой включений графита значительно ниже, чем для ансамбля феррито-перлитной основы с пластинчатой формой включений графита. Это существенное различие обусловлено, вероятно, меньшими затратами энергии на распространение трещины при одном уровне напряженно-деформированного состояния (табл. 3 и 4, рис. 4). Высокие значения трещиностойкости вермикулярного чугуна ЧВГ 40 по сравнению с трещиностойкостью СЧ 20 объясняются меньшими затратами энергии на рост и распространение усталостной трещины при вышеуказанных условиях нагружения (табл. 3, 4). Полученные результаты не только соответствуют предположению о роли пластинчатого графита в чугунах, но и дают основания для возможной количественной оценки энергетических затрат на движение трещины в подобных структурах.

Уширение профилей, отраженных от кристаллографических плоскостей (220) в области 3, обусловлено, вероятно, пластическими деформациями, вызванными значительно меньшими напряжениями, чем в областях 1 непосредственно перед концентратором напряжений, возбуждаемыми ударно-циклическими нагрузками. Полученные результаты совпадают с результатами работ [8–10], в которых уширения профилей дифракционных линий $FWHM$ характеризуют наличие или отсутствие пластических деформаций.

Известно [11], что однородное сжатие или растяжение кристаллической решетки приводят к однородному изменению межплоскостных расстояний на величину Δd_{220} , которые регистрируются смещением положения максимума профиля рентгеновской дифракционной линии на величину угла, равной $\Delta\theta_{220}$. Дифракционные профили, полученные от кристаллографических плоскостей (220) в областях 1, 2 и 3 фронтальной плоскости образцов чугунов СЧ 20 и ЧВГ 40, имеют четко выраженные смещения углов $2\theta_{max}$ в сторону уменьшения угла относительно эталонного образца (рис. 4 и 5, табл. 4). Такое смещение углов является свидетельством растяжения кристаллической решетки, что подтверждается моделированием распределения напряжений и деформаций при расчете напряженно-деформированного состояния в системе WinMachine.

Значения межплоскостных расстояний, зарегистрированных автоматической системой анализа дифракционных спектров дифрактометра Rigaku Ultima IV, полученные при съемке областей 1, 2, 3 деформированных образцов чугунов СЧ 20 и ЧВГ 40, а также эталонных образцов, приведены в табл. 4. Как видно, наблюдается существенное изменение межплоскостных расстояний d в зависимости от расположения области съемок на фронтальной плоскости образцов и от микроструктуры чугунов. Межплоскостные расстояния d увеличиваются в соответствии с напряженно-деформированным состоянием исследуемых областей.

Малое смещение пика профиля дифракционной линии, отраженной от плоскостей 220 в области 3 фронтальной плоскости образца чугуна ЧВГ 40, объясняется, вероятно, микроструктурными особенностями, а именно вермикулярной формой включений графита, т.к. количественное соотношение пластинчатой и вермикулярной форм в исследуемых марках чугунов одинаково. Увеличение межплоскостных расстояний, обусловленное совокупностью искажений кристаллов от микронапряжений и их дисперсностью, достигает 30 % и более.

Выводы

В заключение необходимо отметить, что при анализе характеристик дифракционных профилей, полученных при рентгеновской дифрактометрии гетерофазных сплавов (конструкционных материалов типа чугунов и сталей), с высокой точностью выделяются не только деформированные области, но и относительный уровень искажений кристаллов. На примере чугунов с одной металлической основой и разными формами включений графита показано, что особенности микроструктуры гетерофазных сплавов оказывают существенное влияние на основные характеристики дифракционных профилей.

Литература

1. Арабей А.Б. Развитие технических требований к металлу труб магистральных газопроводов // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 7. С. 3–10.
2. Швейкин В.П. Научные основы и технологические способы обработки гетерофазных сплавов с высоким уровнем конструктивной прочности: Автореф. дис. ... д.т.н. Екатеринбург, 2009. 49 с.
3. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Системные аварии и катастрофы в технической сфере России // МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. 308 с.
4. Фарбер В.М., Пышминцев И.Ю., Арабей А.Б., Селиванова О.В., Полухина О.Н. Вклад

различных структурных факторов в формировании прочностных свойств сталей класса прочности к 65 // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. №9. С. 46 – 49.

5. Романов И. Д., Шацов А. А., Клейнер Л. М. Прочность и трещиностойкость горячедеформированной стали со структурой низкоуглеродистого мартенсита // Физика металлов и металловедение. 2013. Т. 114, № 10. С. 936–943.

6. Аleshin Н.П. Оценка остаточного ресурса сварных конструкций // Сварка и диагностика. 2007. № 2. С. 4–10.

7. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. № 1. С. 5–22.

8. Шмидт Г.К. О связи между неоднородной пластической деформацией металлов при усталости и распределением интенсивности рентгеновских рефлексов // Механическая усталость металлов: Материалы VI Международного коллоквиума. Киев: Наукова думка, 1983. С. 110–116.

9. Рекомендации. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение глубины зон пластической деформации под поверхностью разрушения // Р 50-54-52-88. М.: Госстандарт СССР. Всесоюзный научно-исследовательский институт по нормализации в машиностроении (ВНИИНМАШ), 1988. 47 с.

10. Балагуров А.М., Благов А.Е., Занавескина И.С., Ковальчук М.В., Писаревский Ю.В., Таргонский А.В. Изучение дефектной структуры кристаллических материалов на основе нейтронной и рентгеноакустической дифрактометрии. Разработка рентгеноакустического метода изучения динамики механической деформации кристаллов «in situ» // Вестник РФФИ. 2015. № 2 (86). С. 85–89.

11. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: Учебное пособие для вузов. М.: Московский институт стали и сплавов, 1994. 328 с.

References

1. Arabej A.B. Razvitie tekhnicheskikh trebovanij k metallu trub magistral'nykh gazoprovodov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya. 2010. № 7. P. 3–10.

2. Shvejkin V.P. Nauchnye osnovy i tekhnologicheskie sposoby obrabotki geterofaznykh splavov s

vysokim urovnem konstruktivnoj prochnosti // Avtoreferat diss. na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Ekaterinburg, 2009. 49 p.

3. Vorob'ev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. Sistemnye avarii i katastrofy v tekhnosfere Rossii // MChS Rossii. M.: FGBU VNII GOChS (FTs), 2012. 308 p.

4. Farber V.M., Pyshmintsev I.Yu., Arabej A.B., Selivanova O.V., Polukhina O.N. Vklad razlichnykh strukturnykh faktorov v formirovanie prochnostnykh svojstv stalej klassa prochnosti k 65 // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya. 2012. № 9. P. 46–49.

5. Romanov I.D., Shatsov A.A., Klejner L.M. Prochnost' i treschinostojkost' goryachedeformirovannoj stali so strukturoj nizkouglerodistogo martenzita // Fizika metallov i metallovedenie. 2013. V. 114, № 10. P. 936–943.

6. Aleshin N.P. Otsenka ostatochnogo resursa svarnykh konstruksij //Svarka i diagnostika. 2007. № 2. P. 4–10

7. Panin V.E. Osnovy fizicheskoy mezomekhaniki // Fizicheskaya mezomekhanika. 1998. № 1. P. 5–22.

8. Shmidt G.K. O svyazi mezhdunarodno plasticheskoy deformatsiej metallov pri ustalosti i raspredeleniem intensivnosti rentgenovskikh reflektsov // Mekhanicheskaya ustalost' metallov: Materialy VI mezhdunarodnogo kollokviuma. Kiev: Naukova dumka, 1983. P. 110–116.

9. Rekomendatsii. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metod rentgenostrukturnogo analiza izlomov. Opredelenie glubiny zon plasticheskoy deformatsii pod poverkhnost'yu razrusheniya // R 50-54-52-88. Moscow: Gosstandart SSSR. Vsesoyuznyj nauchno-issledovatel'skij institut po normalizatsii v mashinostroenii (VNIINMASH), 1988. 47 p.

10. Balagurov A.M., Blagov A.E., Zanaveskina I.S., Koval'chuk M.V., Pisarevskij Yu.V., Targonskij A.V. Izuchenie defektnoj struktury kristallicheskich materialov na osnove nejtronnoj i rentgenoakusticheskoy difraktometrii. Razrabotka rentgenoakusticheskogo metoda izucheniya dinamiki mekhanicheskoy deformatsii kristallov «in situ» // Vestnik RFFI. 2015. № 2 (86). P. 85–89.

11. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. Rentgenograficheskij i elektronno-opticheskij analiz // Uchebnoe posobie dlya vuzov. Moscow: Moskovskij institut stali s splavov, 1994. 328 p.

Поступила в редакцию 12.03.2018

Об авторах

ГУЛЯЕВ Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, Якутская государственная сельскохозяйственная академия, 677007, Якутск, ул. Красильникова, 15,
<http://orcid.org/0000-0001-8650-0855>, uekztdg@mail.ru;

СИБИРЯКОВ Максим Михайлович, ведущий инженер, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58,
mm.sibiriakov@s-vfu.ru;

ПЕТРОВ Петр Петрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677890, Якутск, ул. Октябрьская, 1,
<http://orcid.org/0000-0001-6019-3631>, ppp32@mail.ru;

СТЕПАНОВА Ксения Валерьевна, научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677890, Якутск, ул. Октябрьская, 1,
<http://orcid.org/0000-0002-7418-4485>, kseniastepanova@rambler.ru.

About the Authors

GULYAEV Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Yakut State Agricultural Academy, 15 Krasil'nikov St., Yakutsk, 677007, Russia,
<http://orcid.org/0000-0001-8650-0855>, uekztdg@mail.ru;

SIBIRYAKOV Maksim Mikhailovich, Chief Engineer, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinsky St., Yakutsk, 677000, Russia,
mm.sibiriakov@s-vfu.ru;

PETROV Petr Petrovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677890, Russia,
<http://orcid.org/0000-0001-6019-3631>, ppp32@mail.ru;

STEPANOVA Ksenia Valer'evna, Research Scientist, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677890, Russia,
<http://orcid.org/0000-0002-7418-4485>, kseniastepanova@rambler.ru.