

## О возможности локального измерения трещиностойкости конструкционных сталей с привязкой к структуре

© 2024

*Сергеев Максим Иванович\**, аспирант

*Погорелов Егор Васильевич<sup>1</sup>*, аспирант

*Дударев Артемий Александрович*, магистр

*Соколовская Элина Александровна<sup>2</sup>*, кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры металловедения и физики прочности

*Кудря Александр Викторович*, доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры металловедения и физики прочности

*Университет науки и технологий МИСИС, Москва (Россия)*

\*E-mail: m1600219@edu.misis.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6768-5038>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9381-9223>

Поступила в редакцию 27.06.2023

Принята к публикации 04.03.2024

**Аннотация:** Масштаб неоднородности структур сталей и сплавов может быть достаточно велик в пределах как одного образца, так и изделия. Принятая на практике процедура определения интегральных значений характеристик трещиностойкости не всегда может отразить это обстоятельство. В этой связи необходимо развитие методов оценки трещиностойкости среды с неоднородной структурой. В работе трещиностойкость крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) определяли на основе критического раскрытия трещины  $\delta_c$  и  $J$ -интеграла. Наличие критических этапов в развитии вязкой трещины при испытании оценивали по измерениям акустической эмиссии. В сочетании с полученными методами цифровой фрактографии 3D-изображениями изломов это позволило привязать форму и положение переднего фронта каждого скачка трещины к диаграмме «нагрузка – смещение». Измерение геометрии раскрытия трещины в процессе испытания показало возможность прямого определения коэффициента вращения берегов трещины при оценке  $\delta_c$ . В целом это позволило построить карту распределения значений параметра  $\delta_c$  по толщине образца и оценить масштаб разброса трещиностойкости в пределах одного образца – до 30 %. Такая локализация измерений, в первую очередь параметра  $\delta_c$ , сопоставима с масштабом неоднородности строения морфологии различных типов структур, который был оценен на основе измерения цифровых изображений дендритной структуры, серного отпечатка по Бауману, неметаллических включений на нетравленном шлифе, феррито-перлитной полосчатости в микроструктуре. Это дает возможность для привязки локальных значений трещиностойкости к различным механизмам разрушения и сопутствующим им структурным составляющим.

**Ключевые слова:** неоднородность структур; трещиностойкость; акустическая эмиссия; фрактография; прогноз качества в металлургии; критическое раскрытие трещины; интеграл Черепанова – Райса; нелинейная механика разрушения.

**Благодарности:** Статья подготовлена по материалам докладов участников XI Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2023), Тольятти, 11–15 сентября 2023 года.

**Для цитирования:** Сергеев М.И., Погорелов Е.В., Дударев А.А., Соколовская Э.А., Кудря А.В. О возможности локального измерения трещиностойкости конструкционных сталей с привязкой к структуре // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 1. С. 71–81. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-1-67-7.

### ВВЕДЕНИЕ

Для производства материалов, в частности сталей, характерна технологическая наследственность – механизм эволюции структуры и дефектов, определяемый траекторией технологического процесса [1; 2]. В рамках поля допуска штатной технологии обычно наблюдается широкий спектр траекторий технологического процесса, реализация которых приводит к формированию разнообразных структур в материале, номинально одинаковых, но отличающихся геометрией своего строения [3; 4]. Это является причиной разброса свойств, в первую очередь вязкости (сопротивления материала распространению трещины), часто значительного [3; 5].

В рамках действующих стандартов ГОСТ 25.506-85, BS 7448-Part 1, ASTM E1290 предполагается определение силового критерия  $K_{Ic}$  в условиях плоской дефор-

мации, деформационного – критического раскрытия трещины  $\delta_c$  и энергетического –  $J$ -интеграла в условиях развитой пластической деформации и подрастающей трещины. Все они дают значения трещиностойкости при испытании образца с предварительно наведенной усталостной трещиной. Очевидно, что при наличии неоднородной структуры интегральное значение трещиностойкости – результат «сложения» величин трещиностойкости отдельных структурных составляющих, уровень которых определяется в том числе размерами, формой однотипных элементов структуры, их пространственной конфигурацией. В этой связи определение трещиностойкости должно предусматривать возможность привязки к структуре, неоднородности ее строения, например, как это было реализовано в рамках локальной оценки хладноломкости на образцах, габариты которых сопоставимы с масштабом отдельных

структурных составляющих [3]. Актуализация нормативных документов, относящихся к определению трещиностойкости на массивных образцах, фактически сохранила подходы к ее оценке, предложенные несколько десятилетий тому назад. Решение этой проблемы вплоть до последнего времени осложняли трудности, связанные с корректным описанием топографии изломов, в частности, его трудоемкостью, что делает их оценку качественной [6; 7], вследствие чего, например, невозможно объективное выделение в изломе положений переднего фронта растущей трещины в момент ее последовательных скачков. Понимание же этого необходимо для выявления закономерностей кинетики распространения вязкой трещины, в частности, в связи с необходимостью определения критических стадий ее развития [7; 8]. В какой мере рекомендуемое нормативными документами использование максимального значения нагрузки в ходе испытания в качестве критического соответствует действительности, не всегда ясно в связи с многообразием морфологии однотипных структур, определяющим различия в механизмах и, соответственно, кинетике распространения трещины [3; 6]. Применение с этой целью акустической эмиссии (АЭ) не всегда сопровождается сопоставлением с прямыми результатами измерения топографии изломов, что затрудняет трактовку полученных результатов [9; 10]. Очевидно, что развитие цифровых методов измерения структур и изломов может позволить продвинуться в этом направлении, однако пока остаются нерешенными вопросы, связанные с их метрологическим обеспечением, что осложняет оценку воспроизводимости и сопоставимости получаемых результатов [3; 11]. Однако последовательное развитие и применение методов цифровизации измерений при испытаниях на трещиностойкость должно обеспечить более глубокое понимание закономерностей раскрытия и распространения трещины, что позволит выработать уточненные подходы к определению вязкости разрушения, в том числе оценить возможность привязки результатов к неоднородности строения структуры. Это важно для выработки обоснованных технологических решений, направленных на повышение однородности качества металла [3; 5; 12].

Цель работы – уточнение методик определения критериев нелинейной механики разрушения на основе измерения геометрии и раскрытия трещины, оценка возможности привязки значений трещиностойкости к неоднородности строения структуры.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали металл крупных поковок из улучшаемых сталей типа 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) и 15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V) с различной степенью сохранившейся литой структуры и листовую сталь 09Г2С (0,09%С–2%Mn–Si) (таблица 1), полученные по действующим промышленным технологиям.

Глубокое травление в 50%-м водном растворе HCl (в течение ~30 мин), 3%-м растворе HNO<sub>3</sub> (до 3–5 с) использовали для выявления дендритной структуры и микроструктуры соответственно, метод Баумана – для получения серного отпечатка.

Цифровые изображения (в 256 оттенках серого) микроструктур и неметаллических включений (НВ) на не-

травленном шлифе получены средствами световой микроскопии (класса Axio Observer D1m Carl Zeiss в диапазоне увеличений 50–1000 крат). Для перевода изображений макроструктур и серного отпечатка в цифровую форму использовались также цифровая камера AGFA 1280 с ПЗС-матрицей и сканер DUOSCAN T1200 при разрешении 500 точек/дюйм (негативы-пленки при увеличении  $\times 0,5$ , серный отпечаток в масштабе образца).

С целью проведения измерений геометрии строения структур и изломов их первичные цифровые 2D-изображения (в 256 оттенках серого) были переведены в матрицу вида «1-0» (черное – белое) на основе анализа поля яркости изображения. При неравномерности освещения в поле зрения ее устраняли вычитанием полинома оптимальной степени, шумы (неидентифицируемые однозначно мелкие объекты) удаляли фильтрацией (с учетом природы строения объекта, как правило,  $\leq 5-10$  мкм<sup>2</sup>) [11].

Оценка неоднородности размещения темных пятен серных отпечатков проводилась путем разбиения изображения на полиэдры Вороного – многоугольники, в каждом из которых все точки ближе к его центру, чем точки в соседних полиэдрах. В таком случае распределение расстояний между соседними полиэдрами будет объективно отражать размещение темных пятен серного отпечатка [3]. Различие результатов измерения оценивали на основе непараметрического критерия Смирнова [13].

Цифровые трехмерные изображения изломов были получены в масштабе образца с использованием комплекующего модуля к оптическому микроскопу «Оптофракт – 5М» (Россия), а также оптических узлов микроскопа МБС-9 (Россия) и цифровой системной фотокамеры Nikon J1, разрешение 10,1 Мпикс. Разрешающая способность метода составила 5–10 мкм по каждой из трех координат, общий анализируемый объем соответствовал площади излома в плане (с учетом измерений в третьем направлении) [15].

Создание цифровой трехмерной триангуляционной модели на основе полученных серий фотографий производилось с использованием программных пакетов OpenMVG, OpenMVS и специально разработанных служебных модулей на языках программирования C++ и Python. В результате программной реконструкции поверхности получали нетекстурированные триангуляционные модели в форматах Stanford PLY и Wavefront OBJ. Визуализация, редактирование (поверхности и облака точек) производились с использованием ПО MeshLab и CloudCompare, расчет основных характеристик 3D-рельефа – в ПО Gwyddion [1].

Испытания на вязкость разрушения проводились по схеме трехточечного изгиба в соответствии с ГОСТ 25.506-85 на испытательной машине Instron 150LX (США) с применением образцов прямоугольного сечения типа 4 (размерами 15×20×120 мм) с надрезом и предварительно выращенной усталостной трещиной при скорости нагружения не более 0,2 мм/мин, при комнатной температуре испытания.

Оценка силового ( $K_{Ic}$ ) и энергетического ( $J$ -интеграл) критериев трещиностойкости проводилась в соответствии с ГОСТ 25.506. Величина критического раскрытия трещины  $\delta_c$  также определялась исходя из концепции, предполагающей, что раскрытие трещины происходит путем вращения ее берегов вокруг некоторого центра (оси) [15, с. 86]:

$$\delta_c = V_c \frac{1}{1 + n \frac{l+z}{B-l}},$$

где  $V_c$  – смещение датчика при критической нагрузке;  
 $l$  – длина трещины;  
 $n$  – коэффициент вращения;  
 $z$  – расстояние от места установки датчика смещения до образца;  
 $B$  – высота образца.

Коэффициент  $n$  определяли экспериментально на основе нахождения положения центра вращения берегов трещины по высоте образца ( $L$ ) [14]:

$$n_{\text{эсп}} = \frac{B-l}{L-(l+z)}.$$

Кинетику скачкообразного распространения трещины изучали при помощи метода АЭ и количественного анализа изломов. При большом числе  $N \gg 1$  малых импульсов АЭ информативные сигналы эмиссии, отвечающие скачкам трещины, с привязкой к диаграмме «Изгибающая нагрузка ( $P$ ) – Смещение ( $V$ )» выделяли из кумулятивного распределения  $N(A)$  – суммарного числа импульсов  $N$  с амплитудой менее  $A$  [16].

Значения критического раскрытия трещины  $\delta_c$  и  $J$ -интеграла определяли для каждого из первых скачков трещины,  $\delta_c$  – также для отдельных точек переднего фронта трещины.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наличие разномасштабных структур в материалах, от дендритных рисунков различной геометрии до микроструктуры различной морфологии, приводит к существенному разбросу свойств из-за влияния неоднородности структур на механизмы разрушения. Неоднородность структур на всех масштабных уровнях наблюдения присутствовала и в исследуемых нами сталях. Она наблюдалась как в пределах одного образца, так и от образца к образцу. Например, попарное сравнение выборок результатов измерения площадей НВ (не менее 2000 шт. на вариант) при 100-кратном увеличении на четырех равных по площади участках (не менее чем 80 мм<sup>2</sup> каждый) поверхности нетравленного шлифа (общей площадью ~340 мм<sup>2</sup>) из стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) на основе критерия Смирнова  $D$  выявило значимое их различие с риском 0,05 (при табличном значении  $D_{0,05}=1,36^1$ ) (таблица 2).

Различие в экспериментальных значениях критерия отражает различие в статистике распределения величин площадей НВ на исследуемых участках шлифа, которая, в свою очередь, является следствием неоднородности строения дендритной структуры поковки. Такая неоднородность геометрии включений может стать одной из причин разброса значений вязкости разрушения.

О существовании неоднородности НВ иного масштаба в тех же поковках, связанной с наличием в их структуре отдельных зон дендритной ликвации (рис. 1):

столбчатых дендритов, отражающих направление теплоотвода к поверхности поковки (периферийная зона), смеси равноосных мелких дендритов в промежуточной зоне и грубых равноосных в центральной, свидетельствует морфология серного отпечатка по Бауману (рис. 2 а).

Для развития вязкого разрушения важны не только размеры сульфидов, но и их размещение на поверхности шлифа: близкое их расположение друг к другу облегчает работу зарождения вязкого излома, увеличение их разреженности способствует развитию пластической деформации. Выделение на плоскости ближайших соседней было получено на основе разбиения изображения серного отпечатка на полиэдры Вороного (рис. 2 б, 2 с). Разбиение изображения на полиэдры Вороного показало, что средние значения расстояний между центрами полиэдров для различных зон ликвации (периферийной, промежуточной и центральной) были близки и составили 3,70±0,02; 3,70±0,01; 3,39±0,02 мм соответственно. О неоднородности размещения темных пятен серного отпечатка поковки стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) свидетельствует, в частности, распределение расстояний между их центрами для областей поковки, соответствующих различным зонам ликвации (периферийной, промежуточной и центральной), отражающим различия в морфологии дендритного рисунка (таблица 3).

При схожем виде распределения расстояний между пятнами в каждой из областей поковок, на что указывают величины коэффициентов асимметрии и эксцессов (таблица 4), наблюдаются различия между выборками, относящимися к результатам измерения расстояний между темными пятнами-соседями. Это может быть одной из причин разброса свойств по сечению поковки. Причиной такой неоднородности распределения сульфидов (темных пятен серного отпечатка), скорее всего, стала ликвация. Сопоставление выборок – результатов измерения шага дендритов, например, в центральной и промежуточной областях поковки по критерию Смирнова выявило их значимое различие ( $D_{\text{эсп}}=1,121 > D_{0,118}=1,19^2$ ). Шаг дендритов варьировался в пределах от 60 до 3820 мкм.

Дальние последствия ликвации нашли свое отражение и в микроструктуре стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) (смесь феррита и бейнита), в которой наблюдались крупные области феррита. Их поперечник варьировался в пределах от 95 до 386 мкм.

Наличие дендритной структуры в поковках из стали 15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V) также способствовало формированию неравномерного размещения темных пятен серного отпечатка и появлению разноразмерности в структуре. Травление образцов, выбранных случайным образом, выявило в структуре зёрна аустенита, отличающиеся диапазоном размаха максимальных значений диаметров  $D$  ( $\Delta = D_{\text{max}} - D_{\text{min}}$ ): 250 и 90 мкм соответственно.

Неоднородность микроструктур характерна не только для сталей с сохранившейся литой структурой – дальнейшие ее последствия могут наблюдаться, например, в прокате. Результатом этого могут быть различия в масштабах полостчатости в микроструктуре по сечению ударного образца из листовой стали 09Г2С (0,09%С–2%Mn–Si) (рис. 3). Сравнение выборок результатов измерения шага

<sup>1</sup> Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.

<sup>2</sup> См. 1.

Таблица 1. Химические составы исследуемых сталей  
Table 1. Chemical compositions of steels under study

Сталь	Массовая доля элементов, %									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
38ХН3МФА (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V)	0,41	0,22	0,22	0,02	0,02	0,87	3,32	0,58	0,14	0,03
09Г2С (0,09%С–2%Mn–Si)	0,12	1,3	0,5	0,04	0,04	0,3	0,3	–	–	0,3
15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V)	0,13	0,3	0,17	0,02	0,02	1,8	1,0	0,5	0,01	0,03

Таблица 2. Экспериментальные значения критерия Смирнова при сравнении результатов измерения площадей неметаллических включений на четырех равных по площади участках шлифа из стали 38ХН3МФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V)

Table 2. Experimental values of the Smirnov criterion when comparing the results of measuring non-metallic inclusions areas on four equal-area sections of 38KhN3MFA-Sh (0.38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) steel

Участок панорамы	1	2	3	4
1	–	5,57	2,52	1,85
2	5,57	–	7,18	4,39
3	2,52	7,18	–	3,28
4	1,85	4,39	3,28	–

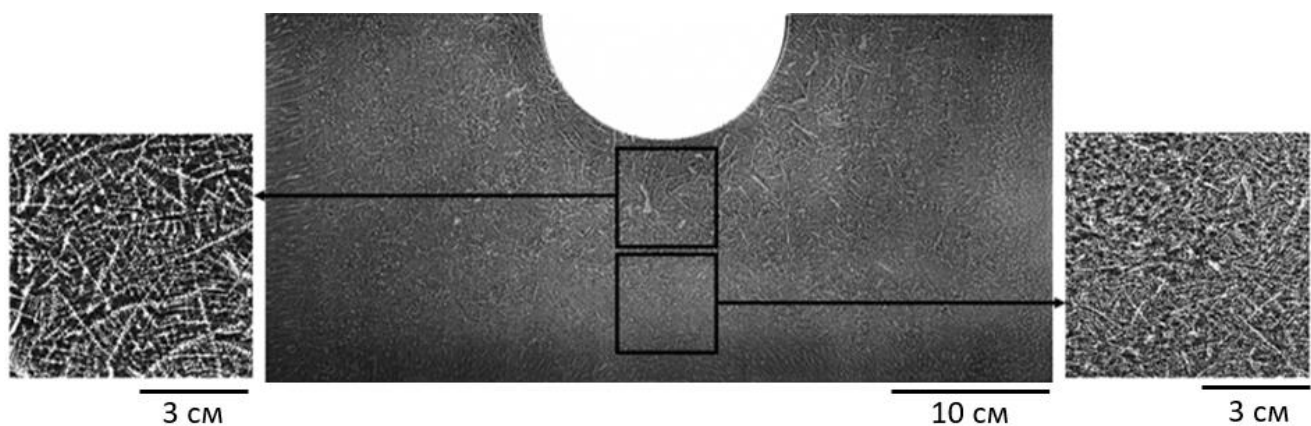
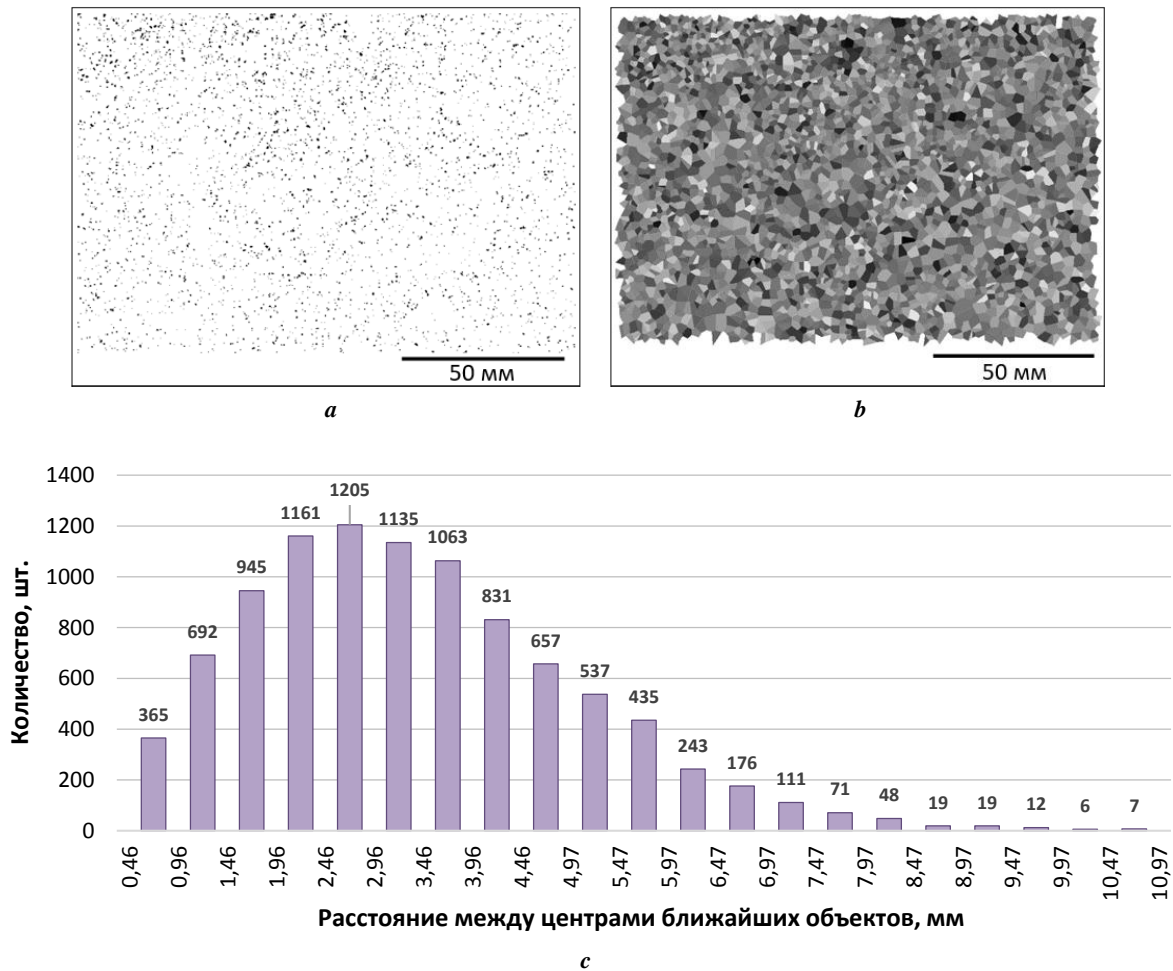


Рис. 1. Морфология дендритного рисунка поковки из стали 38ХН3МФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) и его строение в центральной и промежуточной областях поковки

Fig. 1. Morphology of the dendritic pattern of forging made of 38KhN3MFA-Sh (0.38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) steel and its structure in the central and intermediate regions of the forging



**Рис. 2.** Разбиение изображения серного отпечатка (а) на полиэдры Вороного (б) на примере центральной области поковки из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) и распределение расстояний между центрами тяжести ближайших темных пятен (с)  
**Fig. 2.** Sulfur print image decomposition (a) into Voronoi polyhedra (b) using the example of the central region of a forging made of tempered 38KhN3MFA-Sh steel (0.38% C–Cr–3% Ni–Mo–V) and the distribution of distances between the centers of gravity of the nearest dark spots (c)

**Таблица 3.** Экспериментальные значения критерия Смирнова, полученные при сравнении распределений числа ближайших темных пятен-соседей и расстояний между их центрами, для различных фрагментов изображения серного отпечатка поковки из стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V)

**Table 3.** Experimental values of the Smirnov criterion obtained when comparing the distribution of the number of the nearest dark neighbor spots and the distances between their centers for different fragments of the sulfur print image of the forging made of 38KhN3MFA-Sh (0.38% C–Cr–3% Ni–Mo–V) steel

Исследуемая область поковки	Периферийная	Центральная	Промежуточная
Периферийная	–	$\frac{0,724}{7,361}$ (0,6) (0,05)	$\frac{0,629}{2,307}$ (0,8) (0,05)
Центральная	$\frac{0,724}{7,361}$ (0,6) (0,05)	–	$\frac{0,588}{9,356}$ (0,9) (0,05)
Промежуточная	$\frac{0,629}{2,307}$ (0,8) (0,05)	$\frac{0,588}{9,356}$ (0,9) (0,05)	–

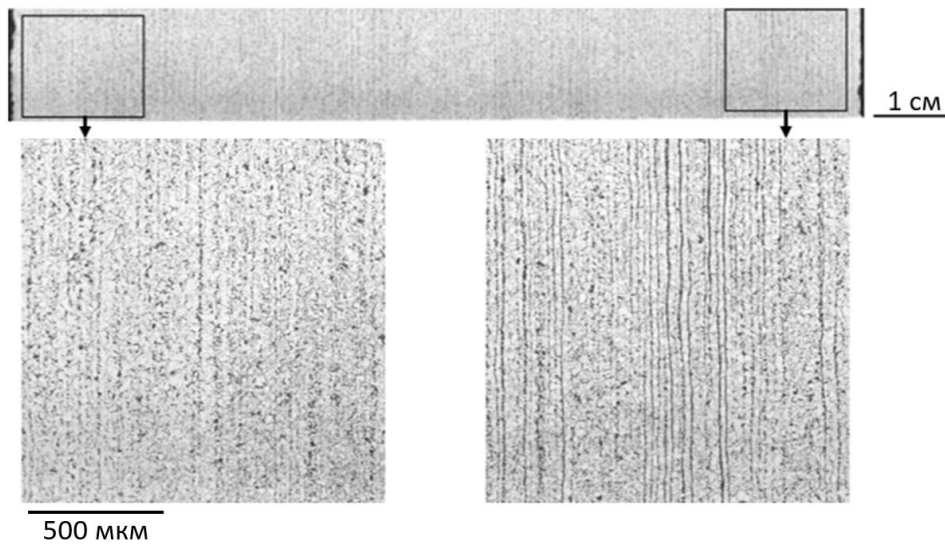
*Примечание.* В числителе и знаменателе указаны экспериментальные значения критерия Смирнова для распределения числа ближайших темных пятен серного отпечатка и расстояния между их центрами соответственно. В скобках указаны риски гипотезы об их отличии.

*Note.* The numerator and denominator indicate the experimental values of the Smirnov criterion for the distribution of the number of the nearest dark spots of the sulfur print and the distance between their centers, respectively. The risks of the hypothesis about their differences are indicated in parentheses.

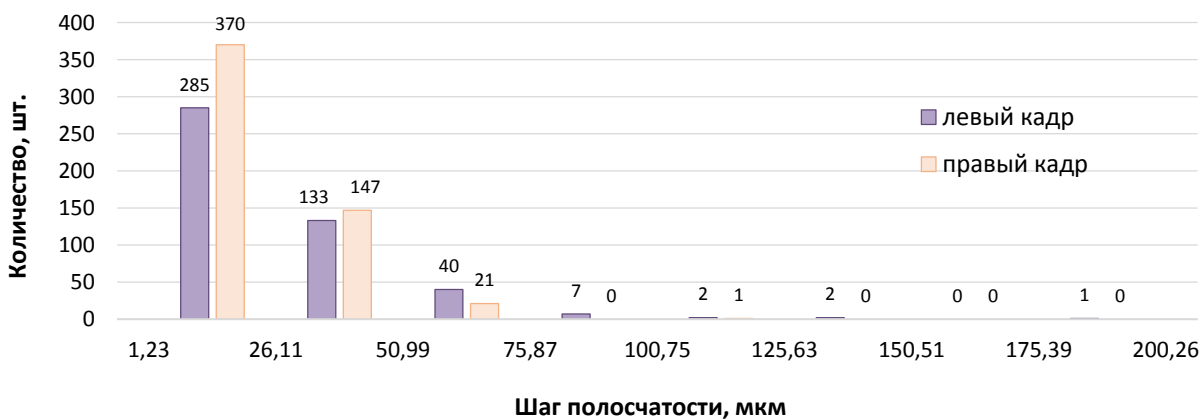
**Таблица 4.** Значения коэффициентов асимметрии и эксцесса распределений числа соседей ближайших темных пятен серного отпечатка и расстояний между ними в различных областях по сечению поковки из стали 38ХН3МФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V)

**Table 4.** Values of the coefficients of skewness and kurtosis of the distributions of the number of neighbors of the nearest sulfur print dark spots and the distances between them in different areas along the cross-section of a forging made of 38KhN3MFA-Sh (0.38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) steel

Параметр	Коэффициент	Периферийная область	Центральная область	Промежуточная область
Число соседей	асимметрии	0,456	0,329	0,410
	эксцесса	0,167	-0,045	0,183
Расстояние между центрами ближайших темных пятен серного отпечатка	асимметрии	0,719	0,737	0,674
	эксцесса	0,421	0,518	0,379



**a**



**b**

**Рис. 3.** Наблюдаемое различие в масштабах полосчатости в микроструктуре по сечению ударного образца из листовой стали 09Г2С (0,09%С–2%Mn–Si) на панораме в целом и на отдельных ее участках (левом и правом) (a) и соответствующее им распределение значений шага полос перлита (b)

**Fig. 3.** The observed difference in the scale of banding in the microstructure along the cross-section of an impact sample made of sheet 09G2S (0.09%С–2%Mn–Si) steel in the panorama as a whole and in its different sections (left and right) (a) and the corresponding distribution of values of a pitch of perlite strips (b)

полос перлита на двух полях, вырезанных из панорамного изображения (по сечению ударного образца), по критерию Смирнова показало, что они отличаются с риском 0,05 ( $D_{\text{эсп}}=1,37 > D_{0,05}=1,36$ ).

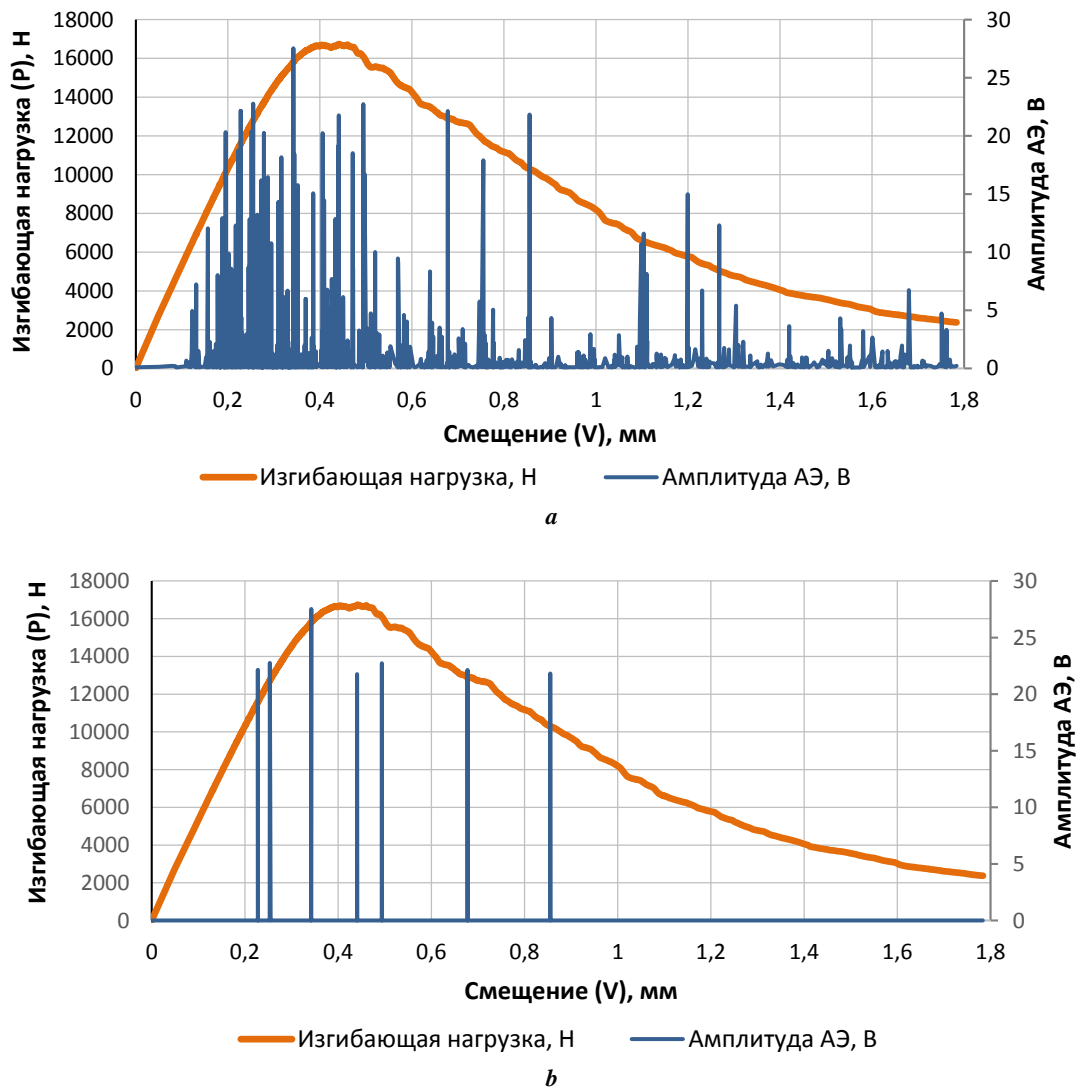
Таким образом, очевидно, что масштаб неоднородности разномасштабных структур может быть очень велик, это характерно для производства материалов, в первую очередь самых массовых – сталей. В этой связи становится актуальной оценка вязкости среды с неоднородной структурой, позволяющая определить влияние неоднородности на сопротивление разрушению.

При определении вязкости разрушения на основе  $J$ -интеграла и  $\delta_c$  оценивали кинетику распространения трещины с помощью АЭ, что позволило зафиксировать импульсы в процессе разрушения (рис. 4 а). Большая часть фиксируемых импульсов имела шумовую природу. Фильтрация сигналов АЭ позволила выделить сиг-

налы, отвечающие скачкам трещины (с привязкой к диаграмме “ $P - V$ ”, рис. 4 б).

Полученные результаты позволили выявить масштаб различий значений трещиностойкости (критического раскрытия трещины) как в пределах каждого образца, так и от поковки к поковке, в том числе с результатом расчета трещиностойкости по ГОСТ:  $\Delta^{\delta_c} = \delta_c^{\text{max}} - \delta_c^{\text{min}}$ ;  $\Delta_1^{\delta_c} = |\delta_c^{\text{ГОСТ}} - \delta_{c1}|$ ;  $\Delta_{\text{max}}^{\delta_c} = |\delta_c^{\text{ГОСТ}} - \delta_c^{\text{max}}|$ ;  $\Delta_{\text{min}}^{\delta_c} = |\delta_c^{\text{ГОСТ}} - \delta_c^{\text{min}}|$  (таблица 5).

Отличие значений  $\delta_c$ , рассчитанных в соответствии с ГОСТ в пределах одного образца по сравнению с величиной КРТ, определенной экспериментально ( $\delta_c^{\text{max}}$ ), варьировалось в пределах от 3 до 40 % для стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V), от 15 до 17 % для 15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V); по сравнению с минимальным значением раскрытия  $\delta_c^{\text{min}}$  оно достигало 22 и 43 % соответственно.



**Рис. 4.** Диаграмма «нагрузка – смещение» и сигналы АЭ при разрушении образца из стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) до (а) и после (б) фильтрации  
**Fig. 4.** Loading – displacement diagram and AE signals during the destruction of a sample made of 38KhN3MFA-Sh (0.38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) steel before (a) and after (b) filtration

**Таблица 5.** Масштаб неоднородности значений  $\delta_c$  (мм) металла поковок с неоднородной структурой из стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) и 15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V)  
**Table 5.** Scale of heterogeneity of  $\delta_c$  values (mm) of metal forgings with a heterogeneous structure made of 38KhN3MFA-Sh (0.38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) and 15Kh2NMFA (0.15%С–2%Cr–Ni–Mo–V) steels

Сталь	Номер образца	$\Delta_1^{\delta_c}$	$\delta_{c\max}$	$\delta_{c\min}$	$\Delta^{\delta_c}$	$\Delta_{\max}^{\delta_c}$	$\Delta_{\min}^{\delta_c}$
38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V)	1	0,005	0,108	0,079	0,029	0,031	0,002
	2	0,016	0,098	0,077	0,021	0,016	0,005
	3	0,031	0,121	0,091	0,030	0,031	0,001
	4	0,002	0,065	0,052	0,013	0,002	0,015
	5	0,007	0,093	0,068	0,025	0,007	0,018
15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V)	6	0,023	0,347	0,298	0,049	0,051	0,002
	7	0,089	0,228	0,152	0,076	0,040	0,116

**Таблица 6.** Масштаб неоднородности значений  $J$ -интеграла (МДж/м<sup>2</sup>) сталей 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) и 15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V)  
**Table 6.** Scale of heterogeneity of  $J$ -интеграла values (MJ/m<sup>2</sup>) of 38KhN3MFA-Sh (0.38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) and 15Kh2NMFA (0.15%С–2%Cr–Ni–Mo–V) steels

Сталь	Номер образца	$J_{ГОСТ}$	$J_{\max}$	$J_{\min}$	$\Delta^J$	$\Delta_1^J$	$\Delta_{\max}^J$	$\Delta_{\min}^J$
38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V)	1	0,057	0,097	0,066	0,031	0,009	0,040	0,009
	2	0,099	0,081	0,047	0,034	0,044	0,018	0,052
	3	0,070	0,135	0,083	0,052	0,025	0,065	0,013
	4	0,062	0,102	0,079	0,023	0,026	0,040	0,017
	5	0,067	0,064	0,039	0,025	0,028	0,003	0,028
15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V)	6	0,298	0,587	0,336	0,251	0,038	0,289	0,038
	7	0,274	0,189	0,122	0,067	0,106	0,085	0,152

Были также определены значения  $J$ -интеграла для каждого из первых пяти скачков трещины с учетом ее подроста. Полученные результаты позволили выявить масштаб различий значений  $J$ -интеграла как в пределах каждого образца, так и от образца к образцу, в том числе с ГОСТ:  $\Delta^J = J^{\max} - J^{\min}$ ;  $\Delta_1^J = |J^{\text{ГОСТ}} - J_1|$ ;  $\Delta_{\max}^J = |J^{\text{ГОСТ}} - J^{\max}|$ ;  $\Delta_{\min}^J = |J^{\text{ГОСТ}} - J^{\min}|$  (таблица 6).

Для оценки неоднородности трещиностойкости по сечению образца была составлена карта распределения значений критического раскрытия трещины для второго – четвертого ее скачков (рис. 5) по контурам переднего фронта трещины. Первый скачок от усталостной трещины не учитывался, поскольку измерение рельефа излома проводилось только на стадии статического подроста трещины.

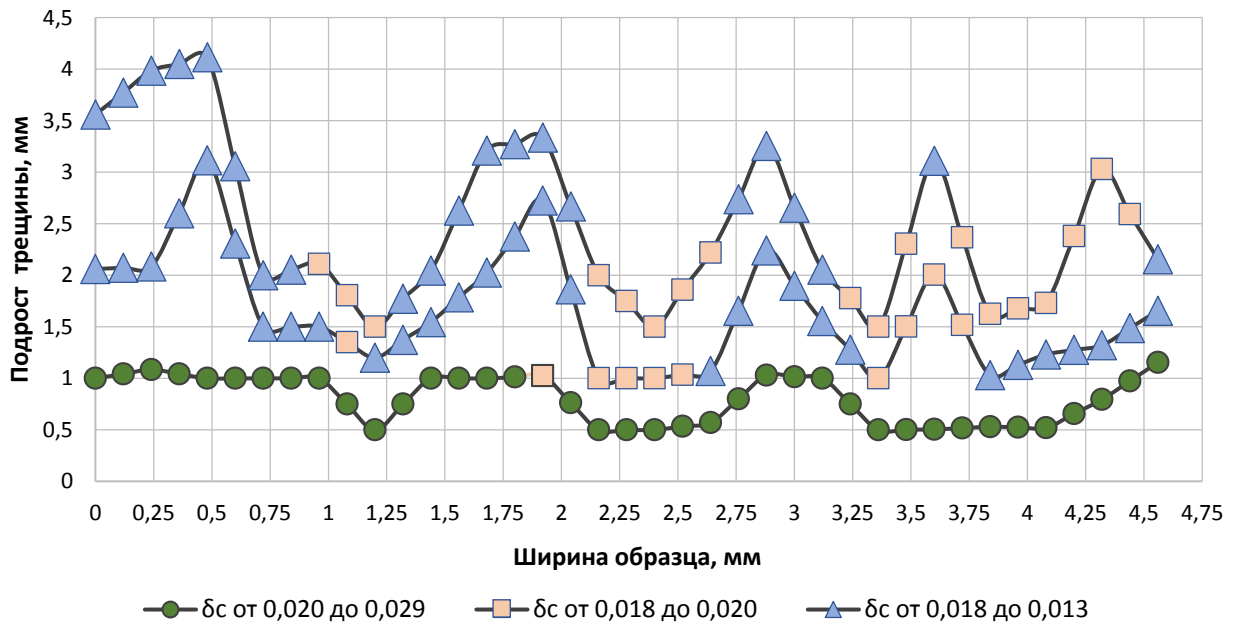
Таким образом, применение уточненной методики локальной оценки критического раскрытия трещины

позволило определить значения трещиностойкости  $\delta_c$  по сечению образца.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдаемое различие значений трещиностойкости в пределах одного образца и между образцами показало, что учет подроста трещины, включая восстановление формы ее переднего фронта (по измерениям АЭ и топографии изломов), обеспечивает получение более широкого спектра значений трещиностойкости, как критического раскрытия трещины  $\delta_c$ , так и интеграла Черепанова – Райса (по сравнению с ГОСТ 25.506). Это существенно, поскольку для крупных поковок из улучшаемых сталей 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) и 15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V) было показано, что значения  $\delta_c$  в пределах одного образца





**Рис. 5.** Карта неоднородности распределения трещиностойкости (значений  $\delta_c$ ) по измерениям на дне макрохрупкого квадрата для второго – четвертого скачков вязкой трещины (первый скачок от усталостной трещины не учитывался), сталь 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V)  
**Fig. 5.** Map of the heterogeneity of crack resistance distribution ( $\delta_c$  values) based on measurements at the bottom of a macrobrittle square for the second – fourth jumps of a ductile crack (the first jump from a fatigue crack was not taken into account), 38KhN3MFA-Sh (0.38%С–Cr–3%Ni–Mo–V)

различались от 25 до 37 % и от 16 до 50 % соответственно. При этом значения, определенные в соответствии с ГОСТ 25.506, различались от 3 до 34 % для стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V) и от 8 до 33 % для стали 15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V) по сравнению с величинами  $\delta_c$ , характерными для первого скачка статической трещины (по измерениям АЭ).

Величина  $J$ -интеграла дает интегральное значение работы разрушения для каждого скачка трещины. Показано, что значения  $J$ -интеграла в пределах одного образца различались от 29 до 72 % и от 55 до 75 % соответственно. Выявлено существенное отличие значений интеграла Черепанова – Райса, определенных в соответствии с ГОСТ 25.506, от величин  $J$ -интеграла, характерных для первого скачка статической трещины (по измерениям АЭ). Оно составило 16–44 % для стали 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V), 13–39 % для стали 15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V). Это означает, что использование максимальных значений нагрузки в качестве критических при определении вязкости разрушения не всегда правомерно.

Важно отметить, что у критического раскрытия трещины есть преимущество – возможность фактически точечного определения раскрытия трещины в пределах каждого из передних фронтов растущей трещины (с учетом их кривизны и изрезанной формы). Отсюда и возможность привязки значений  $\delta_c$  к тому или иному механизму разрушения, которое определяется типом структуры или особенностями ее локального строения. Это важно при установлении причин разброса вязкости, определении ее структурных и металлур-

гических факторов и позволит повысить объективность прогноза разрушения металла в целом. Выявление критических элементов структур необходимо также для управления качеством металлопродукции, в том числе в режиме реального времени, перехода от подбора структур под заданные свойства к конструированию структур оптимальной конфигурации [17; 18].

## ВЫВОДЫ

Прямыми измерениями изображений разнородных структур в крупных поковках из сталей 38ХНЗМФА-Ш (0,38%С–Cr–3%Ni–Mo–V), 15Х2НМФА (0,15%С–2%Cr–Ni–Mo–V) и листе из стали 09Г2С (0,09%С–2%Mn–Si) оценена степень неоднородности их строения, масштаб которой однозначно должен учитываться при определении их трещиностойкости. Сопоставлены границы эффективного применения критериев нелинейной механики разрушения: деформационного – критического раскрытия трещины  $\delta_c$  и энергетического –  $J$ -интеграла. Показано, что при условии измерения геометрии и кинетики развития вязкой трещины при испытании на вязкость разрушения возможно расширение спектра значений характеристик трещиностойкости (для каждого скачка трещины на одном образце), что существенно для более полного описания запаса вязкости среды с неоднородной структурой. Установлено преимущество критического раскрытия трещины  $\delta_c$  при оценке конструкционных сталей с разномасштабной структурной неоднородностью – возможность привязки значений трещиностойкости к структуре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штремель М.А. Разрушение. В 2 кн. Кн. 1: Разрушение материала. М.: МИСиС, 2015. 975 с.
2. Штремель М.А. Разрушение. В 2 кн. Кн. 2: Разрушение структур. М.: МИСиС, 2015. 975 с.
3. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Танг В.Ф. Возможность прогноза разрушения металлических материалов с неоднородной структурой // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 6. С. 2–19. EDN: [BSVQQW](#).
4. Казаков А.А., Киселев Д.В., Казакова Е.И. Количественные методы оценки микроструктуры стали и сплавов для пересмотра устаревших ГОСТ // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 42–48. DOI: [10.21122/1683-6065-2021-2-42-48](#).
5. Кудря А.В., Никулин С.А., Николаев Ю.А., Арсенкин А.М., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Чернобаева А.А., Кузько Е.И., Хорева Е.Г. Факторы неоднородности вязкости низколегированной стали 15X2HMФА // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2009. № 9. С. 23–28. EDN: [QCKREZ](#).
6. Tan Long, Li Songyang, Zhao Liangyin, Wang Lulu, Zhao Xiuxiu. The effect of mechanical inhomogeneity in microzones of welded joints on CTOD fracture toughness of nuclear thick-walled steel // Nuclear Engineering and Technology. 2023. Vol. 55. № 11. P. 4112–4119. DOI: [10.1016/j.net.2023.07.031](#).
7. Li Ai, Soltangharaei V., Greer B., Bayat M., Ziehl P. Structural health monitoring of stainless-steel nuclear fuel storage canister using acoustic emission // Developments in the Built Environment. 2024. Vol. 17. Article number 100294. DOI: [10.1016/j.dibe.2023.100294](#).
8. Xu Jie, Sun Tong, Xu Yantao, Han Qinghua. Fracture toughness research of G20Mn5QT cast steel based on the acoustic emission technique // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 230. Article number 116904. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.116904](#).
9. Vorontsov V.B., Pershin V.K. Correlation between Acoustic Emission and the Local Structural Restructuring in the Nonequilibrium Aluminum Melt // Russian Metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020. № 2. P. 92–101. DOI: [10.1134/S0036029520020160](#).
10. Ботвина Л.Р., Тютин М.Р., Болотников А.И., Петерсен Т.Б. Влияние предварительного циклирования на характеристики акустической эмиссии конструкционной стали 15X2ГМФ // Металлы. 2021. № 1. С. 32–41. EDN: [KYXDHW](#).
11. Соколовская Э.А., Кудря А.В., Кодиров Д.Ф., Сергеев М.И., Буданова Е.С., Самошина М.Е. О достоверности результатов цифровых измерений изображений структур в металлведении // Металлург. 2024. № 1. С. 36–39. EDN: [DGYMXQ](#).
12. Махутов Н.А. Развитие лабораторных исследований и диагностики материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1-1. С. 5–13. DOI: [10.26896/1028-6861-2022-88-1-1-5-13](#).
13. Nikitin Y. Asymptotic efficiency of nonparametric tests. New York: Cambridge University Press, 1995. 274 p.
14. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Нго Х.Н., Кузько Е.И., Котишевский Г.В. Прогноз разрушения крупных поковок с неоднородной структурой // Электрометаллургия. 2019. № 6. С. 33–39. EDN: [XLIBHK](#).
15. Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению / под ред. Ю.Н. Работнова. М.: Мир, 1972. 438 с.
16. Ханжин В.Г., Штремель М.А. Количественная информация о процессах разрушения, получаемая при измерениях акустической эмиссии // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 5. С. 53–59. EDN: [JTSNZB](#).
17. Shtremel M.A., Karabasova L.V., Chizhikov V.I., Vodenikov S.I. About optimal alloying of high-vanadium high-speed steel // Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. № 4. С. 16–20. EDN: [MPCVSV](#).
18. Штремель М.Л., Беломытцев М.Ю., Медведев В.В., Мочалов Б.В., Чернуха Л.Г. Структура и свойства композиционных материалов на основе интерметаллида NiAl // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2006. № 1. С. 40–44. EDN: [HTDWRB](#).

## REFERENCES

1. Shtremel M.A. *Razrushenie. Razrushenie materiala* [Destruction. Rupture of material]. Moscow, MISiS Publ., 2015. Kn. 1, 975 p.
2. Shtremel M.A. *Razrushenie. Razrushenie struktur* [Destruction. Rupture of structures]. Moscow, MISiS Publ., 2015. Kn. 2, 975 p.
3. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Tang V.F. Possibility of predicting the destruction of metal materials with a heterogeneous structure. *Russian metallurgy (Metally)*, 2022, vol. 2022, no. 10, pp. 1318–1331. DOI: [10.1134/S0036029522100160](#).
4. Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kazakova E.I. Quantitative methods for assessing the microstructure of steel and alloys for revising outdated GOST standards. *Lite i metallurgiya*, 2021, no. 2, pp. 42–48. DOI: [10.21122/1683-6065-2021-2-42-48](#).
5. Kudrya A.V., Nikulin S.A., Nikolaev Y.A., Arsenkin A.M., Sokolovskaya E.A., Skorodumov S.V., Chernobaeva A.A., Kuzko E.I., Khoreva E.G. Nonuniformity of the ductility of 15X2HMFA low-alloy steel. *Steel in Translation*, 2009, vol. 39, no. 9, pp. 742–747. EDN: [QCKREZ](#).
6. Tan Long, Li Songyang, Zhao Liangyin, Wang Lulu, Zhao Xiuxiu. The effect of mechanical inhomogeneity in microzones of welded joints on CTOD fracture toughness of nuclear thick-walled steel. *Nuclear Engineering and Technology*, 2023, vol. 55, no. 11, pp. 4112–4119. DOI: [10.1016/j.net.2023.07.031](#).
7. Li Ai, Soltangharaei V., Greer B., Bayat M., Ziehl P. Structural health monitoring of stainless-steel nuclear fuel storage canister using acoustic emission. *Developments in the Built Environment*, 2024, vol. 17, article number 100294. DOI: [10.1016/j.dibe.2023.100294](#).
8. Xu Jie, Sun Tong, Xu Yantao, Han Qinghua. Fracture toughness research of G20Mn5QT cast steel based on the acoustic emission technique. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 230, article number 116904. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.116904](#).
9. Vorontsov V.B., Pershin V.K. Correlation between Acoustic Emission and the Local Structural Restructuring in the Nonequilibrium Aluminum Melt. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020, vol. 2020, no. 2, pp. 92–101. DOI: [10.1134/S0036029520020160](#).

10. Botvina L.R., Tyutin M.R., Bolotnikov A.I., Petersen T.B. effect of preliminary cycling on the acoustic emission characteristics of structural 15Kh2GMF steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, vol. 2021, no. 1, pp. 32–41. EDN: [INTJOA](#).
11. Sokolovskaya E.A., Kudrya A.V., Kodirov D.F., Sergeev M.I., Budanova E.S., Samoshina M.E. On the reliability of the results of digital measurements of images of structures in metal science. *Metallurg*, 2024, no. 1, pp. 36–39. EDN: [DGYMXQ](#).
12. Makhutov N.A. Evolution of laboratory researches and diagnostics of materials. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2022, vol. 88, no. 1-1, pp. 5–13. DOI: [10.26896/1028-6861-2022-88-1-I-5-13](#).
13. Nikitin Y. *Asymptotic efficiency of nonparametric tests*. New York, Cambridge University Press Publ., 1995. 274 p.
14. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Ngo Kh.N., Kuzko E.I., Kotishevskiy G.V. Fracture forecasting of large-size forged pieces with multi-scale structure. *Russian metallurgy (metally)*, 2019, vol. 12, no. 12, pp. 1304–1308. DOI: [10.1134/S0036029519120115](#).
15. Rabotnov Yu.N., ed. *Novye metody otsenki soprotivleniya metallov khrupkomu razrusheniyu* [New methods for assessing the resistance of metals to brittle fracture]. Moscow, Mir Publ., 1972. 438 p.
16. Khanzhin V.G., Shtremel M.A. Quantitative information on fracture processes obtained by measurement of acoustic emission. *Metal Science and Heat Treatment*, 2009, vol. 51, no. 5-6, pp. 250–255. DOI: [10.1007/s11041-009-9146-4](#).
17. Shtremel M.A., Karabasova L.V., Chizhikov V.I., Vodeniktov S.I. About optimal alloying of high-vanadium high-speed steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 1999, vol. 41, no. 3-4, pp. 146–150. DOI: [10.1007/bf02465798](#).
18. Shtremel M.L., Belomyttsev M.Yu., Medvedev V.V., Mochalov B.V., Chernukha L.G. The structure and features of composite materials having web structure on the base of NiAl intermetallide. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*, 2006, no. 1, pp. 40–44. EDN: [HTDWRB](#).

## On the possibility of local measurement of crack resistance of structural steels taking into account the structure

© 2024

*Maxim I. Sergeyev*<sup>\*</sup>, postgraduate student*Egor V. Pogorelov*<sup>1</sup>, postgraduate student*Artemiy A. Dudarev*, graduate student*Elina A. Sokolovskaya*<sup>2</sup>, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chair of Metal Science and Physics of Strength*Aleksandr V. Kudrya*, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair of Materials Science and Strength Physics*University of Science and Technology MISIS, Moscow (Russia)*<sup>\*</sup>E-mail: [m1600219@edu.misis.ru](mailto:m1600219@edu.misis.ru)<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6768-5038><sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9381-9223>

Received 27.06.2023

Accepted 04.03.2024

**Abstract:** The scale of heterogeneity of the structures of steels and alloys can be rather large both within one sample and within a product. The procedure adopted in practice for determining the integral values of crack resistance characteristics cannot always reflect this circumstance. In this regard, it is necessary to develop methods for assessing the crack resistance of a medium with a heterogeneous structure. In this work, the authors determined the crack resistance of large forgings made of heat-hardenable 38KhN3MFA-Sh steel (0.38% C–Cr–3% Ni–Mo–V) based on the critical crack opening  $\delta_c$  and the  $J$ -integral. The presence of critical stages in the development of a ductile crack during testing was assessed by acoustic emission measurements. In combination with the obtained methods of digital fractography of 3D images of fractures, this allowed relating the shape and position of the leading edge of each crack jump to the load-displacement diagram. Measuring the crack opening geometry during the test showed the possibility of determining directly the coefficient of crack face rotation when estimating  $\delta_c$ . In general, this allowed constructing a map of the distribution of parameter  $\delta_c$  values over the thickness of the sample and estimating the scale of the scatter in crack resistance within one sample – up to 30 %. Such a localization of measurements, primarily of the  $\delta_c$  parameter, is comparable to the scale of heterogeneity in the morphology of various types of structures, which was assessed based on the measurement of digital images of the dendritic structure, the Bauman sulfur print, non-metallic inclusions on an unetched section, and ferrite-pearlite banding in the microstructure. This makes it possible to link local crack resistance values to various fracture mechanisms and their accompanying structural components.

**Keywords:** heterogeneity of structures; crack resistance; acoustic emission; fractography; quality prediction in metallurgy; critical crack opening; Cherepanov–Rice integral; nonlinear fracture mechanics.

**Acknowledgments:** The paper was written on the reports of the participants of the XI International School of Physical Materials Science (SPM-2023), Togliatti, September 11–15, 2023.

**For citation:** Sergeyev M.I., Pogorelov E.V., Dudarev A.A., Sokolovskaya E.A., Kudrya A.V. On the possibility of local measurement of crack resistance of structural steels taking into account the structure. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 1, pp. 71–81. DOI: [10.18323/2782-4039-2024-1-67-7](#).