

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Танг Вьет Фыонг

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ РАЗРУШЕНИЮ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ

Специальность:

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

профессор, д.т.н. А.В. Кудря

Москва, 2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Разнообразие геометрии структур, в т.ч. однотипных, ведет к различиям в механизмах деформации и разрушения, отсюда необходимость в оценке неоднородности геометрии строения структуры. Однако, традиционные методы оценки, как структур, так и изломов носят преимущественно качественный характер, основанные на визуальном сопоставлении элементов строения с эталонами или их словесным описанием. Однако возможности цифровизации, обусловленные ростом вычислительных мощностей, появлением средств цифровой регистрации информации, и современные программные продукты делают возможным переход к количественным оценкам морфологии структур и сопутствующих им изломов.

Прямое сопоставление строения структур и изломов необходимо для понимания механизмов разрушения, что обеспечивает выявление критических факторов разрушения высокопрочных сталей. Это принципиально важно для разработки на этой основе обоснованных принципов управления качеством металлопродукции. С этой целью необходимо изучение разрушения на трех масштабных уровнях, с последующим синтезом полученных результатов. Это позволит также развить методики оценки критериев нелинейной механики разрушения, ключевое звено при ранжировке критических факторов разрушения (структура и металлургическое качество). Существующие подходы к определению критериев нелинейной механики разрушения не позволяют получить в достаточной мере объективные характеристики вязкости. Одно только лишь упоминание о том, что действующий стандарт, нормирующий требования к их определению, остается неизменным с 1985 года, что подтверждает актуальность постановки настоящей работы.

Для их объективной оценки, в частности, необходим учет закономерностей распространения трещины, уточнение геометрической модели её раскрытия. Для решения этой задачи необходимо использование цифровых средств и методов измерения строения изломов, применения современных методов мониторинга подраста трещины, например, по измерениям акустической эмиссии (АЭ). При определении трещиностойкости структурно неоднородных материалов важно оценить уровень вязкости разрушения с привязкой к технологически неизбежной неоднородности структур. Это может быть полезно для выявления критических элементов структуры, их сочетаний, лимитирующих сопротивляемость разрушения металла в целом и для выработки объективных приемов управления технологическим процессом получения металлопродукции.

В этой связи, **целью диссертационной работы** явилась разработка цифровых процедур измерения изображений неоднородных структур и их разрушения для выявления критических параметров разнородных структур, лимитирующих запас вязкости конструкционных сталей;

Для достижения целей работы решались следующие **основные задачи**:

- разработка компьютеризированных процедур измерения геометрии разномасштабных структур и разрушения на макро-, мезо- и микромасштабных уровнях наблюдения.
- накопление представительной статистики данных о морфологии структур и изломов конструкционных сталей различного сортамента, взаимосвязи их строения;
- определение возможности прогноза разрушения конструкционных сталей на основе результатов измерения неоднородности строения структуры;
- оценка возможности применения параметров нелинейной механики разрушения: критического раскрытия трещины –  $\delta_c$  и  $J$ -интеграла для определения трещиностойкости сталей с неоднородной структурой на основе измерения геометрии раскрытия трещины и мониторинга её распространения в процессе испытания;
- оценка неоднородности вязкости разрушения сталей 38ХНЗМФА(-Ш) и 15Х2НМФА на основе уточненных методов определения критического раскрытия трещины и  $J$ -интеграла с учетом кинетики подраста вязкого подраста трещины и анализа ее геометрии.

#### **Научная новизна:**

- С использованием метрологически обоснованных цифровых процедур измерения изображений разнородных структур выявлена существенная вариация статистических характеристик (коэффициенты асимметрии и эксцесса) распределения размеров зерна аустенита и расстояний между ближайшими неметаллическими включениями в улучшаемых сталях 40Х2Н2МА и 38ХНЗМФА (для различных температур аустенитизации и зон поковки соответственно), что определяет неоднородные условия образования вязкого излома и разброс вязкости сталей соответственно.
- В представлении мезопрофиля изломов (в направлении распространения трещины) ударных образцов из улучшаемой стали 40Х2Н2МА (после нагрева под закалку при температурах 850, 1100 и 1200 °С), как ломаной лестницы, показана возможность ранжировки мезорельефа изломов на основе параметров шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789:  $R_a$  – среднеарифметическое отклонение профиля;  $R_z$  – наибольшая высота профиля и  $R_{max}$  – полная высота профиля.
- Для листовой стали 16Г2АФ сопоставление результатов прямых измерений геометрии строения бинарных изображений серного отпечатка по Бауману и соответствующего ему шиферообразного излома (после совместных преобразований их изображений на основе разработанной последовательности процедур дилатации, эрозии и фильтрации) показало возможность прогноза его появления по морфологии темных пятен серного отпечатка.
- На основе определения критериев нелинейной механики разрушения: критического раскрытия трещины  $\delta_c$  и  $J$ -интеграла по уточненной методике (с учетом измерения геометрии раскрытия трещины и кинетики её распространения – по совместным измерениям цифровых моделей изломов и акустической эмиссии при разрушении) сопоставлены возможности их

применения для оценки трещиностойкости улучшаемых сталей 38ХН3МФА и 15Х2НМФА с привязкой к неоднородности морфологии их структуры.

**Практическая ценность** состоит в возможности использования развитых методик цифрового измерения геометрии изображений структур и изломов, уточненной методики определения критического раскрытия трещины  $\delta_c$  и  $J$ -интеграла (и границ эффективного применения) для выявления масштабов и причин неоднородности вязкости в конструкционных сталях с неоднородной структурой, прогноза разрушения по структуре.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- закономерности строения разнородных структур и изломов из стали типа 38ХН3МФА, 16Г2АФ, 40Х2Н2МА, 15Х2НМФА и процедуры обработки их изображений;
- уточненные подходы к оценке неоднородности строения мезорельефа изломов;
- предлагаемые подходы к оценке трещиностойкости улучшаемых сталей с привязкой к структуре, на основе развитых методов определения критериев нелинейной механики разрушения (критическое раскрытие трещины  $\delta_c$  и  $J$ -интеграл) с учетом геометрии раскрытия трещины и кинетики её распространения (по измерениям акустической эмиссии и количественной фрактографии).

**Достоверность полученных результатов** обеспечена использованием современной исследовательской техники, массовых цифровых измерений структур и разрушения в сочетании с разнообразным программным обеспечением и статистическими методами обработки результатов, согласием с результатами, имеющимися в научно-технической литературе по данной проблеме.

**Личный вклад** соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, выражается в том, что автор планировал, непосредственно участвовал в лабораторных экспериментах, разрабатывал алгоритмы подхода к анализу структур и изломов, предложил методику обработки профилей изломов на мезоуровне для получения статистики их геометрических параметров, развил подходы к оценке трещиностойкости на основе критериев нелинейной механики разрушения, обработал, интерпретировал и оформлял результаты в виде научных статей и тезисов докладов. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

**Вклад соавторов**

Участие научного руководителя Кудри А.В. в постановке задач исследования, обсуждении результатов и формулировке выводов. Соколовская Э.А. – участие в разработке алгоритмов обработки изображений и подготовке статей. Кузько Е.И. – помощь в получении первичных результатов измерения мезотопографии изломов и 3D-моделей изломов, Сергеев М.И. – помощь в обработке 3D-изображений изломов. Погорелов Е.В. – участие в подготовке образцов из стали 15Х2НМФА для испытания на трещиностойкость и проведении фрактографического анализа методами сканирующей микроскопии; Кодиров Д.Ф. – получение

изображений ряда структур исследуемых сталей. Отдельные благодарности Ожерелкову Д.Ю. за помощь в проведении испытаний на трещиностойкость, Каратыщевой Г.А – за участие в обработке результатов испытаний на трещиностойкость, Траченкову В.А. за помощь в разработке программного обеспечения, Нго Нгок Ха – за участие в проведении некоторых испытаний на трещиностойкость и совместной обработке и обсуждении этих результатов.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на: IX Международной школе «Физическое материаловедение» с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 2019 г.; X-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ, Москва, 2021 г.

#### **Публикация:**

Основные результаты диссертации представлены в 4 статьях, опубликованных в высокорейтинговых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ (4 - в изданиях, входящих в систему цитирования WoS, Scopus), а также представлены на 2-х международных конференциях и в 3-х тезисах докладов.

#### **Структура и объем диссертации:**

Диссертационная работа состоит из введения, 3 главы, выводов и списка использованной литературы из 133 наименований, изложена на 118 страницах, содержит 54 рисунок, 22 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, и поставлены задачи исследования, изложена научная новизна полученных результатов, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен аналитический обзор литературы по исследуемой проблеме. Рассмотрены различные виды разрушения, их механизмы протекания и факторы (структурные и металлургические), контролирующие разрушение конструкционных сталей. Неоднородность разномасштабных структур является одним из важнейших факторов, определяющих разрушение. В процесс разрушения сталей участвует весь диапазон масштабов структуры – это дендритный рисунок, НВ разного типа и микроструктура сталей. Разнообразное проявление технологической наследственности приводит к формированию неоднородности структуры стали, и, как в результате, существенно влияет на степень неоднородности механических свойств металлопродукции. Для более точного изучения влияния неоднородности на разброс вязкости разрушения материала нужна разработка как методика описания, процедур измерения изображений неоднородных структур, так и на их основе выработать критерий неоднородности структуры, обеспечивающей заданную вязкость стали.

Вязкость разрушения материалов является важнейшей характеристикой материала. Для ее оценки широко используют критический коэффициент интенсивности напряжения  $K_{IC}$  (в рамках линейной механики разрушения). Главным недостатком линейной механики разрушения является

необходимость использования образцов больших размеров, удовлетворяющих условиям плоской деформации, а также мощной испытательной техники для проведения испытания. В последние десятилетия для определения трещиностойкости вязких материалов малой и средней прочности получили развитие методы нелинейной механики разрушения (критерий  $\delta_c$  и  $J$ -интеграл). При оценке вязкости структурно-неоднородных материалов с использованием  $J$ -интеграла может быть менее предпочтительным, т.к. это некоторая интегральная характеристика сопротивляемости разрушению и не позволяет определить вязкость с привязкой к структуре металла, что затрудняет выдачу конкретных рекомендаций, направленных на повышение уровня трещиностойкости материала.

Предлагаемые стандартные подходы в полной мере не учитывают кинетику развития трещины, геометрию ее раскрытия, вследствие этого физически недостаточно обоснованы. В этой связи получаемые оценки вязкости могут оказаться не вполне корректными. Отсюда вытекает необходимость дальнейшего совершенствования методики определения вязкости разрушения для повышения достоверности полученных результатов. Очевидно, что дальнейший прогресс механики разрушения должен основываться на углубленном изучении физических представлений о механизме развития трещины с использованием тонких методов исследования, таких как метод АЭ и количественный фрактографический анализ.

Во **второй главе** описаны материалы и методы их исследования. В качестве объекта исследования были выбраны конструкционные стали следующих марок: среднеуглеродистая улучшаемая сталь для крупных изделий 38ХНЗМФА(-Ш), 40Х2Н2МА, сталь для корпусов атомных реакторов 15Х2НМФА и низкоуглеродистая низколегированная сталь 16Г2АФ, полученные по общепринятым технологиям [1]. Химический состав исследуемых сталей (таблица 1) соответствовал требованиям ГОСТ 4543-71. Режимы термической обработки представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Химические составы исследуемых сталей

Сталь	Массовая доля элементов, %									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
38ХНЗМФА	0,41	0,22	0,22	0,020	0,020	0,87	3,32	0,58	0,14	0,03
38ХНЗМФА-Ш	0,41	0,29	0,33	0,010	0,006	0,98	3,12	0,60	0,12	0,11
40Х2Н2МА	0,40	0,32	0,28	0,010	0,008	1,05	1,01	0,25	0,10	0,12
15Х2НМФА	0,17	0,47	0,29	0,009	0,014	2,24	1,34	0,51	0,09	0,05
16Г2АФ	0,17	1,50	0,40	0,015	0,010	0,20	0,10	-	0,09	0,10

Таблица 2 – Режимы обработки исследуемых сталей

Марка стали	Сортамент	Режим термической обработки
38ХНЗМФА(-Ш)	Поковка, прокат	Тнорм = 915 – 925 °С, Тзак = 850 – 870 °С; 3,5 – 4,5 ч, охлаждение через воду в масло и двукратный отпуск (520 °С; 3,5 ч + 540 °С; 6 ч, охлаждение на воздухе).
40Х2Н2МА	сорт	Тнорм = 850 °С 2,0 ч. Тзак = 850 °С, 2 ч.; Тотп = 570 °С, 2 ч
15Х2НМФА	поковка	Тзак = 920 °С, вода +620 °С, 25 ч +650 °С, 20 ч.
16Г2АФ	лист	Тзак = 900 °С; Тотп = 640 °С

Металлографические исследования: анализ неметаллических включений (НВ), изучение микро-, макроструктуры, серного отпечатка по Бауману проводились на заранее подготовленных шлифованных и полированных шлифах (подготовка на специализированном станке Buehler AutoMet 250). Изображения структур получали с помощью микроскопа AxioLab Observer D1m Carl Zeiss при увеличении 50 – 1000 крат.

Загрязненность сталей НВ наблюдали на полированных шлифах без травления под световым микроскопом. Микроструктуры исследуемых сталей - после травления, проводимого в 3% растворе азотной  $\text{HNO}_3$  в спирте. Распределение серы (ликвацию серы) в металле (в масштабе темплета и образца) определяли по серному отпечатку (СО) - метод Баумана, согласно ГОСТ 10243-75. Макроструктура исследуемых сталей изучалась после глубокого травления в течение от 45 мин до 1 час в 50% водном растворе соляной кислоты  $\text{HCl}$  при нагреве до температуры 80 °С.

Цифровые изображения структур и изломов исследуемых сталей обрабатывались с помощью стандартного (ImageExpert Pro 3 и ImageJ, Excel) и разработанного на кафедре МиФП программного обеспечения.

Параметры вязкости разрушения исследуемых сталей ( $K_{IC}$ ,  $\delta_C$ ,  $J_C$ ) оценивались при испытании на трёхточечный изгиб образцов плоской прямоугольной формы (15×20×120 мм) и (10×20×120 мм) с наведенной усталостной трещины из сталей 38ХНЗМФА и 15Х2НМФА по ГОСТ 25.506–85 и усовершенствованным в рамках настоящей работы методикам определения  $\delta_C$  и  $J_C$ . Испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron 150LX с синхронной записью диаграммы нагрузки, раскрытия берегов трещины (с помощью консольного датчика смещения тензорезисторного типа) и сигналов акустической эмиссии АЭ при разрушении (рисунок 1). Условия проведения испытания: температура – комнатная, скорость нагружения 0,5 мм/мин; расстояние между опорами – 80 мм.

Изображения изломов ударных образцов и образцов на статистический изгиб были получены в сканирующем электронном микроскопе СЭМ HITACHI S-800. Также поверхность излома исследовали методами лазерной профилометрии, обеспечивающей получение карт высот рельефа излома на дне макрорупкого квадрата, с шагом до 2 мкм по двум координатам и реконструированных 3D-моделей изломов при помощи комплектующего модуля к оптическому микроскопу, позволяющего получить 3D-изображения рельефа изломов.

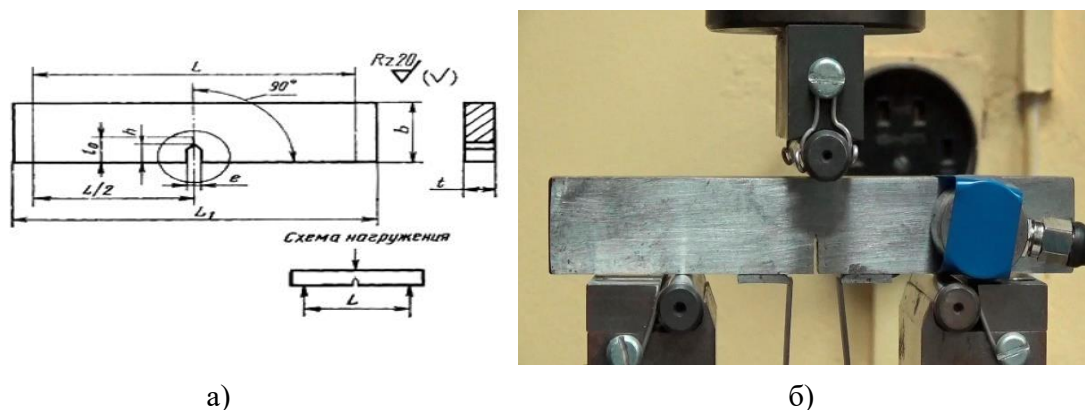


Рисунок 1 – Образец и схема испытания на трещиностойкость по ГОСТ 25.506-85 с применением метода АЭ; а – образец на трехточечный изгиб; б – образец в процессе испытания

В третьей главе представлены результаты исследования.

**Измерение структур и оценка закономерности их строения.** Установлены масштабы неоднородности разномасштабных структур исследуемых сталей и процедура обработки цифровых изображений структур и изломов. Типичные изображения НВ, СО, макро- и микроstructures сталей показаны на рисунке 2.

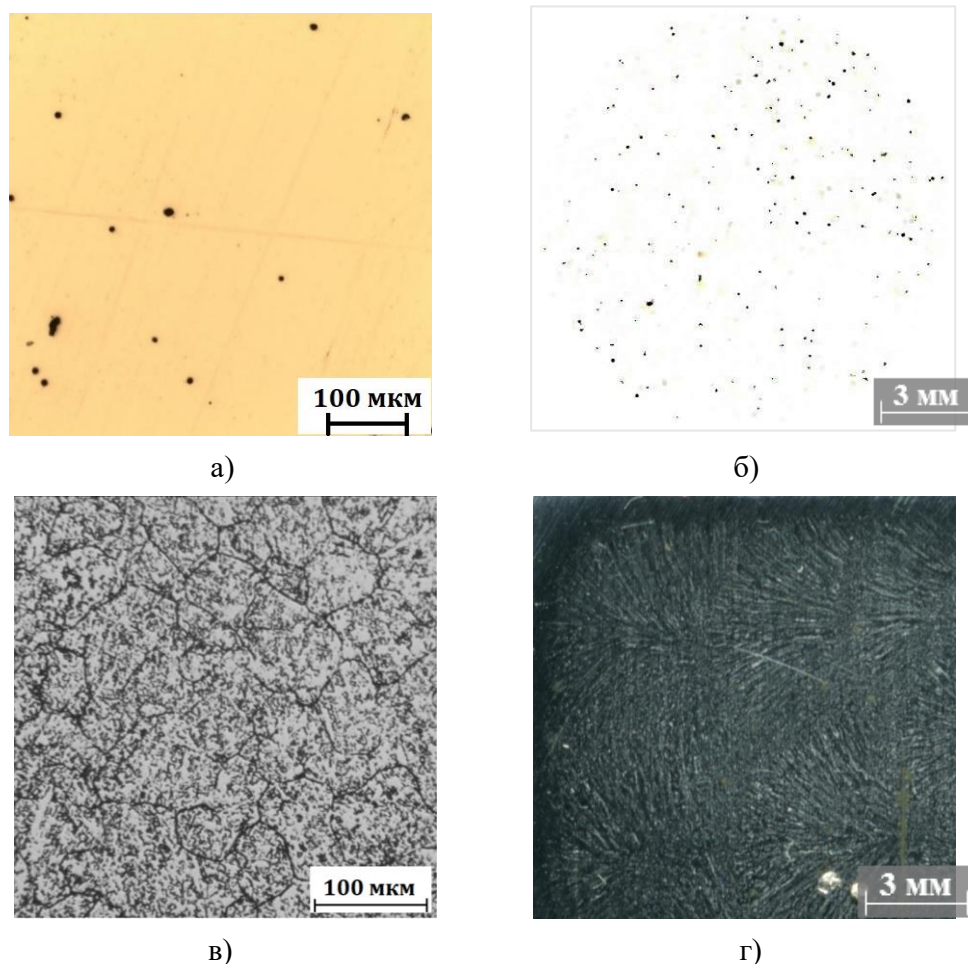


Рисунок 2 – Типичные изображения разномасштабных структур исследуемых сталей  
а – НВ в поковках из стали 38ХН3МФА; б – серный отпечаток в стали 38ХН3МФА; в –  
микроструктура стали 15Х2НМФА; г – дендритная структура стали 15Х2НМФА

Как и следовало ожидать, после окончательной термообработки, заключающейся в закалке и высоком отпуске в структуре сталей 15Х2НМФА и 38ХН3МФА наблюдается феррито-цементитная смесь бейнитного типа. Микроструктура стали 40Х2Н2МА – сорбит отпуска. Наблюдаемая дендритная структура стали 38ХН3МФА является более грубой, по сравнению со сталью 15Х2НМФА, при этом плотность дендритов в первой стали меньше, чем во второй, о том свидетельствуют значения их плотности: 3,0 и 6,1 шт/мм<sup>2</sup> соответственно.

Для обеспечения воспроизводимости получаемых результатов количественной оценки изображений, их необходимо было предварительно обработать, применив обоснованные алгоритмы бинаризации и фильтрации шумов. В основу выбора критериев бинаризации был положен анализ закономерностей формирования поля яркости изображений конкретных типов структур и учет особенностей их строения, поведения при деформации и разрушения. Например, для изображения с развитой геометрией структур и с близким соотношением доли темных и светлых фрагментов



(дендритная структура в слитке или феррито-перлитная полосчатость в микроструктуре проката) полезной оказалась процедура бинаризации всего кадра в целом – по методу С-образной кривой (построение зависимости «площадь элементов изображения – их суммарный периметр» при вариации уровня бинаризации изображения в 256-оттенках серого от 0 до 255 с шагом 1 уровень серого). Если в структуре наблюдалось несколько типов однотипных элементов, то лучшим было использование эффекта мультиризации в рамках той же зависимости. Для тех изображений, где доля темных объектов много меньше светлого фона (например, НВ на нетравленном шлифе) оптимальной была процедура бинаризации с привязкой к интенсивности яркости отдельных частиц. Необходимость учета природы анализируемых структур важна и при обосновании процедуры фильтрации шумов. Все это позволило выделить информативную часть изображения для последующего автоматического обсчета с использованием различного программного обеспечения.

Для реальных структур вероятность наблюдения различных статистических характеристик распределения экспериментальных значений результатов измерения элементов структур безусловно, была весьма высока. В частности, для изображений зерна аустенита стали 40Х2Н2МА после закалки с 850, 950 и 1050 °С (выдержка 1 час), их распределение по размерам (в пределах номера – по ГОСТ 5639-82) отличается от нормального (рисунок 3), этому соответствовало и различие статистических характеристик распределений, для различных номеров зерна значения коэффициентов асимметрии и эксцесса варьировались в пределах от 2,19 до 1,57 и 6,82 до 2,36 соответственно (таблица 3).

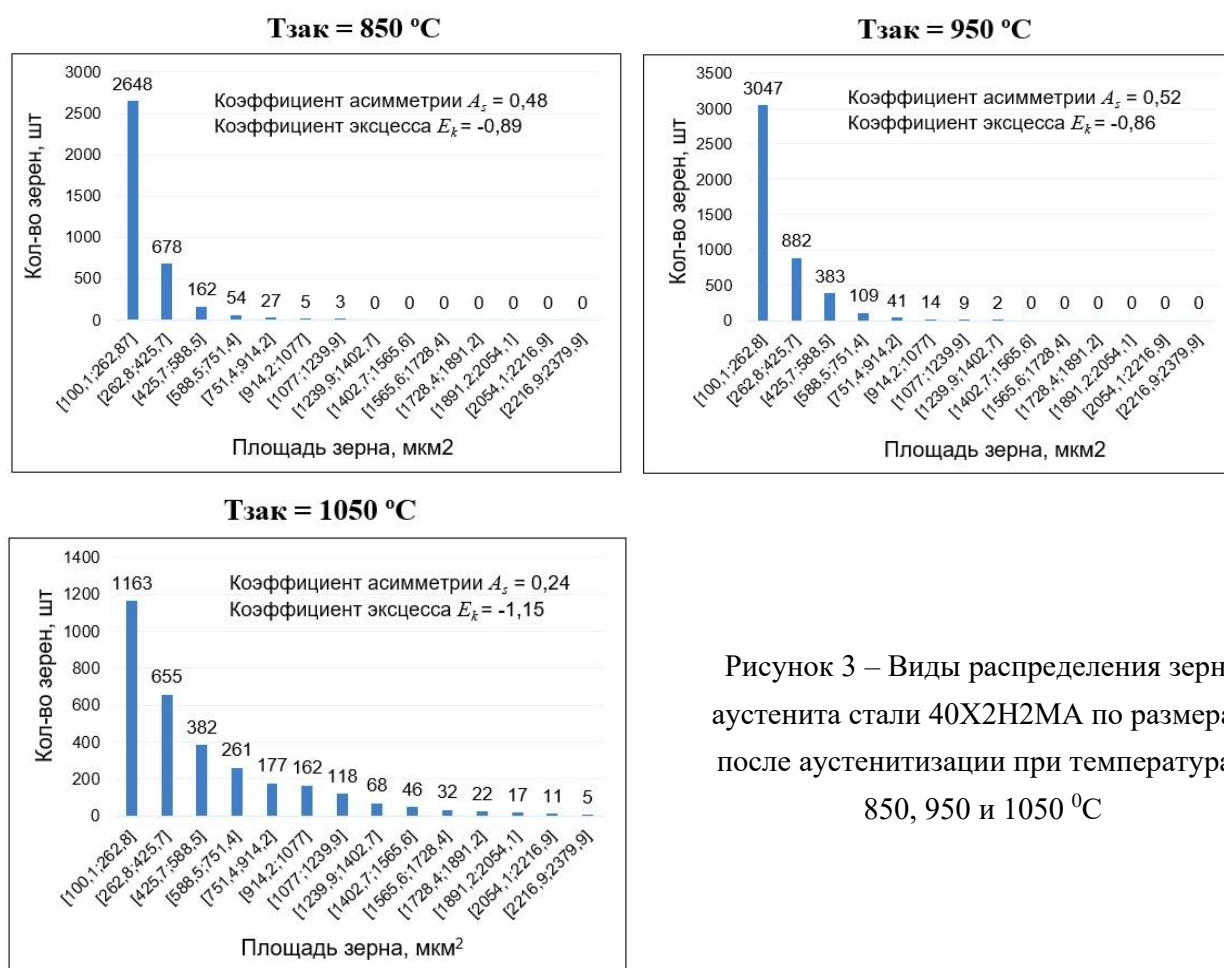


Рисунок 3 – Виды распределения зерна аустенита стали 40Х2Н2МА по размерам после аустенитизации при температурах 850, 950 и 1050 °С

Таблица 3 – Статистические характеристики морфологии структуры зерна аустенита стали 40X2H2MA после различных температур аустенитизации Т при выдержке в течение 1 ч.

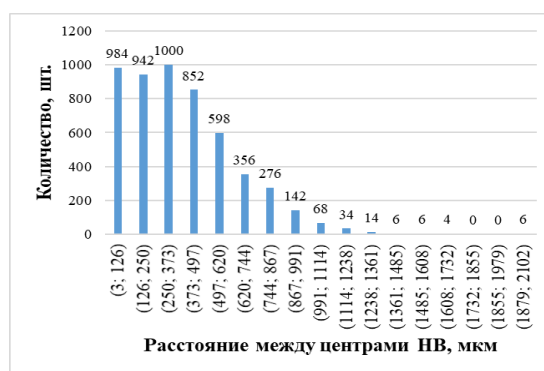
Т, °С	Коэффициент		Экстремумы выборки значений площади зерен $X$ , мкм <sup>2</sup>		Размах, $\Delta = X_{\max} - X_{\min}$ , мкм <sup>2</sup>	$X \pm S$ , мкм <sup>2</sup>	Количество зерен на 1 мм <sup>2</sup> шлифа	Номер зерна G, ГОСТ 5639
	асимметрии $A_s$	эксцесса $E_k$	минимум $X_{\min}^*$	максимум $X_{\max}$				
850	2,19	6,82	100	1152	1052	223,9±2,2	3179	9
950	2,06	5,94	100	1331	1231	245,7±2,3	2564	8
1050	1,57	2,36	100	2380	2280	497,0±7,2	1313	7

Для оценки неоднородности размещения неметаллических включений в поле зрения, а также темных пятен серного отпечатка использовалось разбиение изображения на полиэдры Вороного – многоугольники, в каждом из которых все точки расположены ближе к его центру (тяжести, в данном случае темного пятна – НВ, серного отпечатка, либо другого элемента изображения, например, ямки вязкого излома), по сравнению с точками, расположенными в соседних полиэдрах. Для крупных поковок кубической формы из улучшаемой стали 38ХНЗМФА с сохранившейся литой структурой это позволило сопоставить размещение НВ в сечениях нескольких образцов, вырезанных в различных местах поковки, как одного из факторов, определяющего различие в работе образования вязкого излома.

Было показано, в частности, что в пределах одного образца сечением ~320 мм<sup>2</sup> (при ×100) распределения значений расстояний между соседними полиэдрами имели асимметричный характер (рисунок 4). Различия в величинах коэффициентов асимметрии и эксцесса таких распределений оказались достаточно велики, как в пределах одного образца, так и между отдельными полями зрения (площадью не менее 80 мм<sup>2</sup>, соизмеримой с площадью образца на ударный изгиб) (таблица 4) и варьировались в пределах: -0,18...0,81 и 0,41...0,74 соответственно. Существенно, что в таком случае неизбежно возрастают риски, связанные с применением и средних значений при сопоставлении различных выборок результатов измерения и соответствующих критериев классической статистики. В этой связи были применены критерии непараметрической статистики, в частности, Колмогорова-Смирнова, не зависящие от вида распределения.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Статистика распределения расстояний между полиэдрами-соседями (а, б, в, г) для четырех изображений неметаллических включений (нетравленные шлифы из стали 38ХНЗМФА площадью ~320 мм<sup>2</sup> каждый)

Таблица 4 – Статистика неоднородности размещения неметаллических включений (на основе построения полиэдров Вороного) в образцах стали 38ХНЗМФА после закалки и высокого отпуска на четырех полях зрения площадью не менее 80 мм<sup>2</sup> каждое

Образец	Поля зрения	Расстояние между включениями-соседями, мм	Коэффициент асимметрии $A_s$	Коэффициент эксцесса $E_k$
1	1	$434,6 \pm 7,4$	0,22	0,61
	2	$633,6 \pm 15,2$	-0,18	0,41
	3	$383,3 \pm 5,8$	0,05	0,56
	4	$466,9 \pm 10,3$	0,04	0,67
2	1	$328,4 \pm 4,1$	-0,02	0,63
	2	$307,1 \pm 3,5$	-0,12	0,56
	3	$332,4 \pm 3,8$	0,06	0,51
	4	$294,1 \pm 3,1$	0,81	0,74
3	1	$400,3 \pm 7,8$	1,64	1,09
	2	$379,5 \pm 7,9$	0,35	0,69
	3	$388,9 \pm 8,1$	4,75	1,53
	4	$350,1 \pm 6,5$	0,35	0,84
4	1	$391,9 \pm 5,5$	-0,29	0,40
	2	$419,3 \pm 6,6$	-0,29	0,43
	3	$382,3 \pm 5,3$	-0,05	0,55
	4	$433,6 \pm 7,1$	-0,044	0,41

Очевидно, что для массовых количественных измерений возрастает значение их метрологическое обеспечение для обеспечения надежного выделения информативных признаков (элементов) изображений структур. В противном случае масштабы неопределенности при оценке воспроизводимости получаемых результатов и их сопоставимости не дадут оснований утверждать о

получении объективных характеристик исследуемых структур. В равной мере это относится и к измерению морфологии изломов, поскольку именно сопоставление результатов совместного измерения строения структур и сопутствующих изломов позволит получить более глубокое представление о закономерностях разрушения в материале, как среде со структурой.

В этой связи, для массового количественного описания различий в строении изображений структур и изломов сталей перспективно применение цифровизации. При накоплении необходимой статистики результатов измерений возможен переход к количественным мерам при их описании. Это позволит перейти к новой линейке стандартов, обеспечивающих более тонкую ранжировку разрушения и понимание причин разброса свойств, как основы для выработки обоснованных технологических решений, направленных на повышение качества металла.

**Измерение изломов.** Наличие широкого масштаба разнородных структур в материале определяет возможность их совместного участия в зарождении и развитии трещины. Отсюда необходимость исследования изломов на разных масштабных уровнях наблюдения: от элементарных актов разрушения к их взаимодействию (мезоскопический уровень процесса) и далее, к конечному макроскопическому результату - магистральной трещине. Последующий синтез результатов измерения разрушения на трех масштабных уровнях: макро-, мезо- и микроуровне – дают понимание механизмов разрушения в среде со структурой, её критических элементов, их геометрических параметров, определяющих различие в сопротивляемости разрушению. Наиболее полное представление о строении излома, в первую очередь в микромасштабах, дают его 3D-измерения (стереофотограмметрия и конфокальная микроскопия).

Однако в рамках двумерной модели удобно оценить особенности размещения однотипных элементов в плане, например, ямок вязкого излома (в связи с распределением неметаллических включений). Так, в частности, при анализе строения номинально однотипных вязких изломов (ударные образцы из улучшаемых сталей 15X2НМФА и 40X2Н2МА) было оценено различие в размещении ямок (на основе построения полиэдров Вороного на панорамах изломов, площадью не менее 0,3 мм<sup>2</sup> каждая (в масштабе образца) в сканирующем электронном микроскопе (рисунок 5).

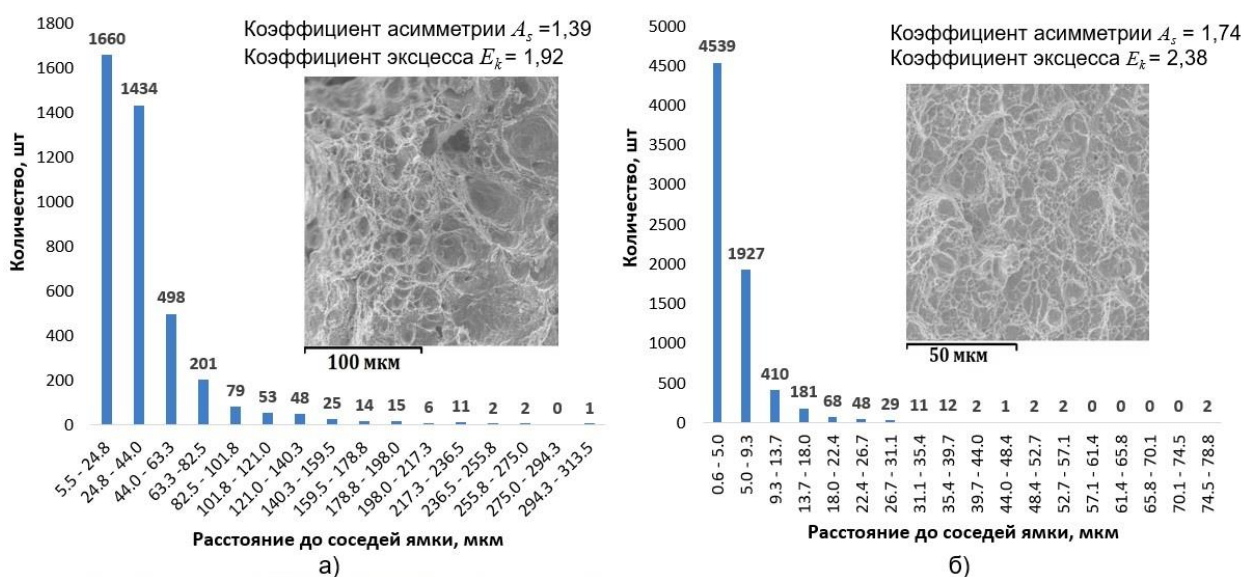


Рисунок 5 – Распределение расстояний между центрами полиэдров (ямки соседей) Вороного на 2D-изображении изломов улучшаемых сталей 15X2НМФА (а) и 40X2Н2МА (б)

Интерес к наименее изученному мезомасштабу строения изломов обусловлен, в частности, тем, что на этом масштабном уровне может получить свое отражение роль структуры слитка в разрушении металла, чьи дальнейшие последствия наследуются часто сортом и листом. Информация о мезорельефе, например, при испытании на ударную вязкость, содержится на макроплоской площадке излома – «хрупком квадрате», окруженном с трех сторон откосами среза – областями «выбега трещины». Для её получения, необходимо отделить зоны, соответствующие зарождению трещины и периферии излома, вычесть макрокривизну «хрупкого квадрата» или низкочастотную составляющую рельефа, не связанные с механизмом разрушения. С этой целью линию  $z(x)$  пересечения рельефа с нормальной к излому плоскостью (траектория излома, обусловленная механизмом разрушения) аппроксимировали методом наименьших квадратов полиномами оптимальной степени  $n$ , когда понижение остаточной дисперсии регрессии  $s^2(n)$  стало бы не значимым.

Полученные после вычитания оптимального полинома профили обычно представляли собой последовательность чередующихся выступов и впадин различной геометрии, что отражает колебания растущей трещины относительно направления её распространения. Их аппроксимация методом наименьших квадратов (построение наилучшей ломаной) дает представление траектории  $z(x)$  в виде ломаной лестницы (или пилообразного излома) (рисунок 6). Построенная ломаная лестница была дополнительно подвергнута фильтрации для удаления ступеней малого, не соответствующих мезоуровню наблюдения: ограничение на минимальный размер ступени – 100 мкм. Для этого ступени с одинаковым знаком угла наклона объединялись, путем их присоединения к ближайшей (им) ступени (ям).

По полученным ломаным определяли их геометрические параметры:

- высота ступени:  $H_i = z_{i+1} - z_i$
- ширина ступени:  $B_i = x_{i+1} - x_i$
- длина ступени:  $L_i = (h_i^2 + b_i^2)^{1/2}$
- угол её наклона к макроплоскости излома:  $\alpha_i = \arctg(h_i/b_i)$

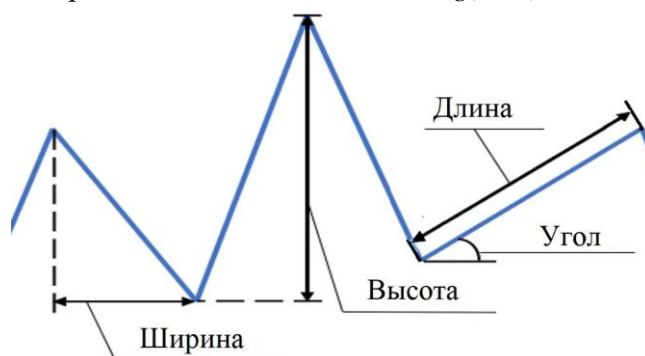


Рисунок 6 – Информативные параметры мезо-геометрии излома (геометрические параметры ступеней)

С целью оптимизации процедуры построения ломаных лестниц был разработан программный код, написанный на базе Mathcad Prime, позволяющий обработать множество профилей и получить сводную статистику значений геометрических параметров ломаных.



Для оценки вида распределения значений параметров ломаной лестницы было проанализировано 200 профилей (в пределах макрорупкого квадрата) излома образца из улучшаемой стали 40X2H2MA с длиной реализации 4000 мкм каждый. Показано, что распределение величин геометрических параметров мезопрофиля излома имеет асимметричный характер (рисунок 7). Их меру отклонения от нормального распределения хорошо иллюстрирует разброс значений коэффициентов асимметрии и эксцесса, представленный там же. Аналогичные результаты были получены и для изломов других исследуемых сталей

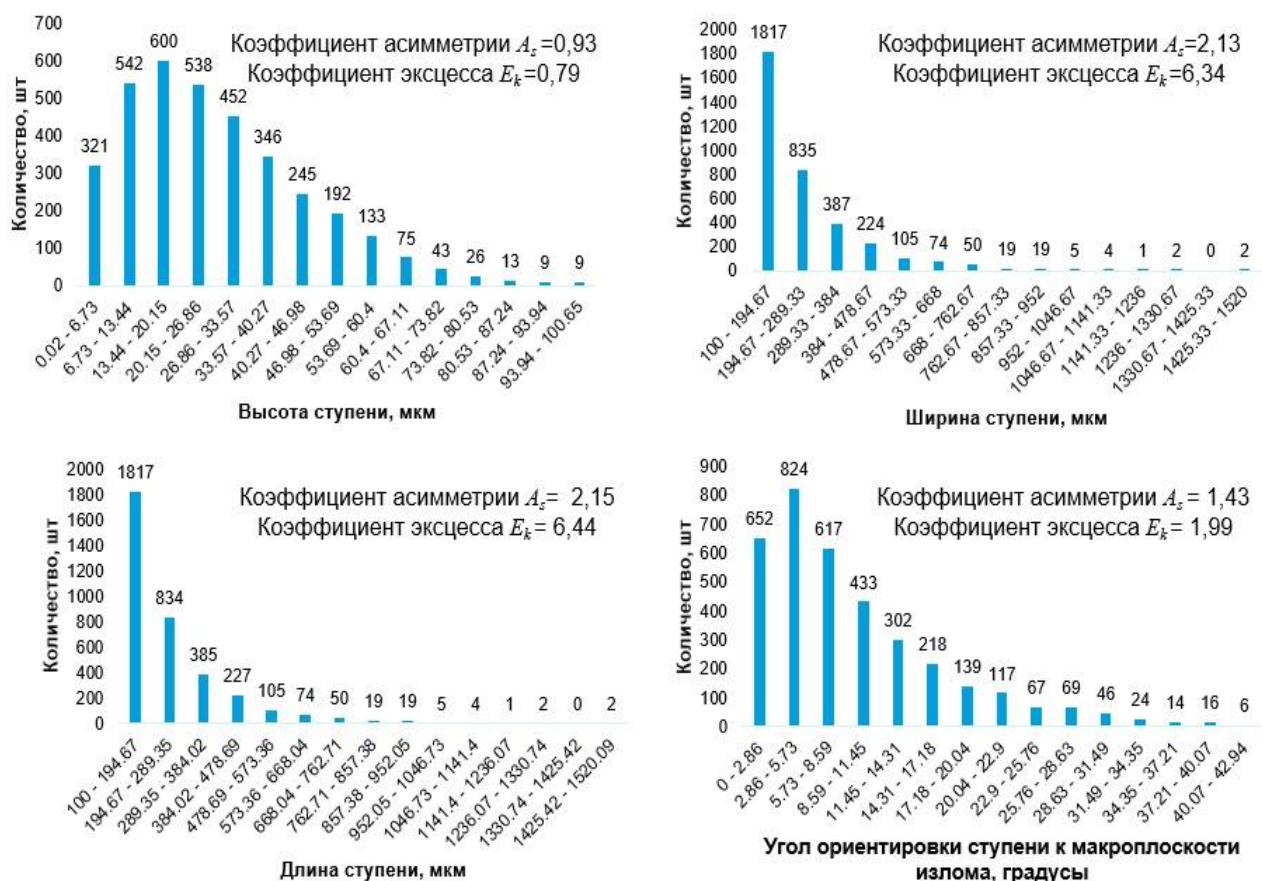


Рисунок 7 – Распределения значений геометрических параметров (высот, ширин, длин, углов ориентировки ступеней и величин генеральной дисперсии), полученные по результатам построения 200 ломаных лестниц излома образца из стали 40X2H2MA (при нижнем пороге ширины ступени 100 мкм)

При измерении профиля излома, например, с шагом 10 мкм большинство ступеней лестницы будут иметь длину менее 50 мкм. Однако при увеличении шага измерения, что возможно с учетом наблюдаемых размеров поперечника зоны пластической деформации в вершине растущей трещины [2], значения геометрических параметров ломаной лестницы, построенной для одних и тех же профилей будут характеризоваться иными численными средними значениями (таблица 5). Различия наблюдаются и в виде гистограмм распределения значений этих параметров (рисунок 8). Отсюда

следует, что построение ломаной лестницы должно проводиться с привязкой к конкретной задаче, учитывать природу разрушения анализируемого объекта.

Таблица 5 – Параметры ступеней ломаной лестницы профилей вязкого излома, полученных после измерения мезорельефа с различным шагом, сталь 38ХНЗМФА

№	Шаг измерения профиля трещины мкм	Длина < $L$ >	Высота < $H$ >	Ширина < $B$ >	Угол < $\alpha$ >, град
		мкм			
1	10	82,7 ± 3,1	31,9 ± 1,9	72,4 ± 2,6	20,9 ± 0,7
2	50	304,3 ± 16,9	70,1 ± 5,1	290,9 ± 16,9	14,9 ± 0,9
3	100	607,8 ± 39,6	108,5 ± 9,5	591,1 ± 40,1	12,1 ± 1,1

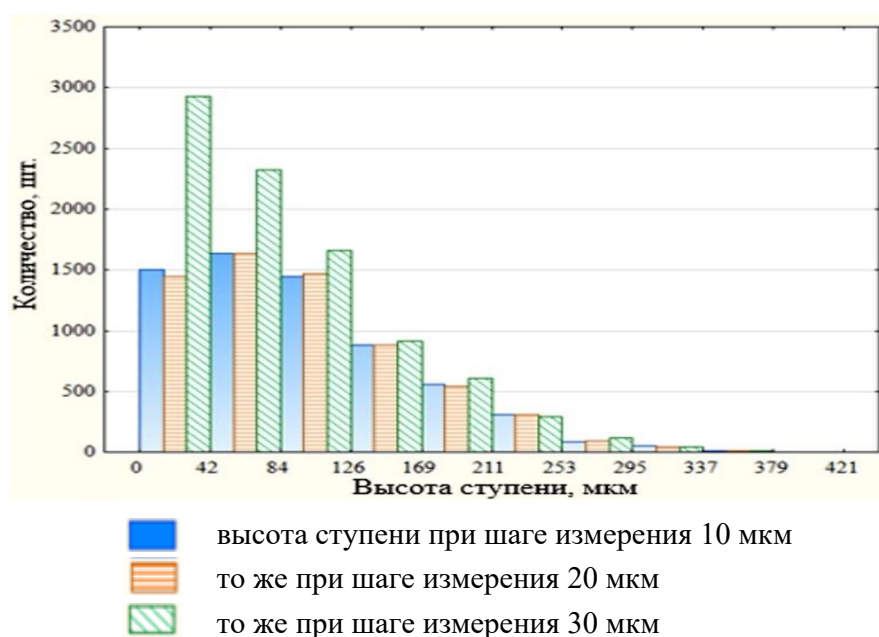


Рисунок 8 – Изменение вида распределения значений высоты ступени  $H$  ломаной лестницы в зависимости от шага измерения (при ограничении её ширины  $B \geq 120$  мкм), излом ударного образца из стали 40Х2Н2МА, отпуск  $570^\circ\text{C}$ , (Тисп =  $20^\circ\text{C}$ )

Определение параметров геометрии мезорельефа позволяет не только оценить влияние степени проработки слитка при горячей деформационной обработке на строение излома (таблица 6), но и выявить различия в морфологии изломов образцов, вырезанных из поковок, отличающихся дендритным рисунком.

Таблица 6 – Различие значений параметров мезогеометрии изломов ударных образцов стали 38ХНЗМФА с сохранившейся литой и деформированной структурой после отпуска при  $570^\circ\text{C}$ , 3 час, температура испытания  $20^\circ\text{C}$ , шаг сканирования 10 мкм

Состояние	Параметры ступеней ломаной лестницы			
	Ширина < $L$ >, мкм	Угол < $\alpha$ >, град	Высота < $H$ >, мкм	Длина < $L$ > , мкм
прокат	$108,0 \pm 4,5$	$55,8 \pm 1,2$	$70,5 \pm 4,9$	$125,0 \pm 5,8$
поковки	$151,0 \pm 6,3$	$62,3 \pm 3,3$	$215,0 \pm 9,5$	$140,5 \pm 8,7$
	$132,9 \pm 5,7$	$77,0 \pm 0,9$	$205,4 \pm 8,7$	$162,8 \pm 9,1$
	$139,9 \pm 4,9$	$78,5 \pm 3,1$	$222,3 \pm 19,0$	$228,8 \pm 33,9$

Следует отметить, что поскольку в формировании излома фактически участвует слой структур толщиной, соизмеримой с глубиной рельефа поверхности, то при измерении его топографии еще более актуальным становится получение статистически представительных выборок результатов измерения геометрии строения структур и изломов.

Технически, шаг измерения первичного профиля трещины может варьироваться в зависимости от решаемой задачи и средств наблюдения: от 1мкм (сканирующая, конфокальная электронная микроскопия) и выше. При любом шаге, особенно, меньше и равном 10 мкм, достаточно высока вероятность измерения фрагментов микрорельефа излома. Их масштаб косвенно будет характеризовать величина генеральной дисперсии уравнения прямой, аппроксимирующей каждую из ступеней ломаной лестницы. В частности, было показано, что более грубым структурам в поковках из стали 38ХНЗМФА-Ш соответствует более тяжелый хвост распределения значений генеральной дисперсии по сравнению с аналогичным распределением для стали 15Х2НМФА.

Минимальная величина ступени также может быть ограничена снизу, условиями решаемой задачи, например, при описании мезорельефа излома на основе требований ГОСТ 2789 – минимизация шага может быть избыточной, поскольку внесет изменения в значения характеристик шероховатости поверхности разрушения, связанные с регистрацией элементарных площадок разрушения (таблица 7). Из полученных результатов также следует, что применение параметров шероховатости поверхности в соответствии с ГОСТ 2789 может быть полезно для ранжировки изломов. Очевидно, что представляет интерес продолжение исследований в данном направлении.

Таблица 7 – Изменение значений параметров шероховатости (ГОСТ 2789) пилообразного мезорельефа вязких изломов ударных образцов (температура испытания 20 °С) из улучшаемой стали 40Х2Н2МА при различном уровне ограничения минимальной длины ступени профиля

Параметр шероховатости	Минимальная длина ступени, мкм	Температура аустенитизации, °С		
		850	1100	1200
Среднеарифметическое отклонение профиля $R_a$ , мкм	20	$12,1 \pm 0,2$	$17,3 \pm 0,3$	$19,3 \pm 0,3$
	100	$8,1 \pm 0,2$	$9,8 \pm 0,5$	$15,9 \pm 0,7$
Наибольшая высота профиля $R_z$ , мкм	20	$64,0 \pm 0,7$	$86,9 \pm 1,5$	$119,7 \pm 2,3$
	100	$25,2 \pm 0,7$	$30,4 \pm 1,4$	$59,3 \pm 2,3$
Полная высота профиля $R_{max}$ , мкм	20	$90,3 \pm 1,5$	$120,9 \pm 3,3$	$171,8 \pm 4,8$
	100	$12,1 \pm 0,2$	$17,3 \pm 0,3$	$19,3 \pm 0,3$

**Возможность прогноза разрушения по виду структуры.** При массовых обработках 2D-изображений изломов неизбежно возникает проблема удаления шумов. С этой целью достаточно эффективной оказалась процедура «эрозия - дилатация», когда пошагово (шаг кратен пикселю) проводится уменьшение размеров объектов, а затем, такое же их последовательное восстановление. При обоснованном выборе числа шагов, учитывающих природу измеряемого объекта, шумы в процессе процедуры эрозии исчезали, а последующая процедура дилатации «возвращала» элементы структуры в исходное состояние (размеры).

Было также показано, что возможности процедур эрозии и дилатации не ограничиваются только удалением объектов шумовой природы. В частности, они были применены для уточнения представлений о природе шиферообразного излома в ударных поперечных образцах из листовой



стали 16Г2АФ. На изображении (с разрешением 1 пикс = 2 мкм) в 256 оттенках серого, тёмным полоскам соответствовали вытянутые ямки вязкого излома; светлый фон – перемычкам среза между ними (рисунок 9). На дне вытянутых ямок были видны нитки сульфидов, диаметром ~ 1 мкм, длиной 300 – 1000 мкм.

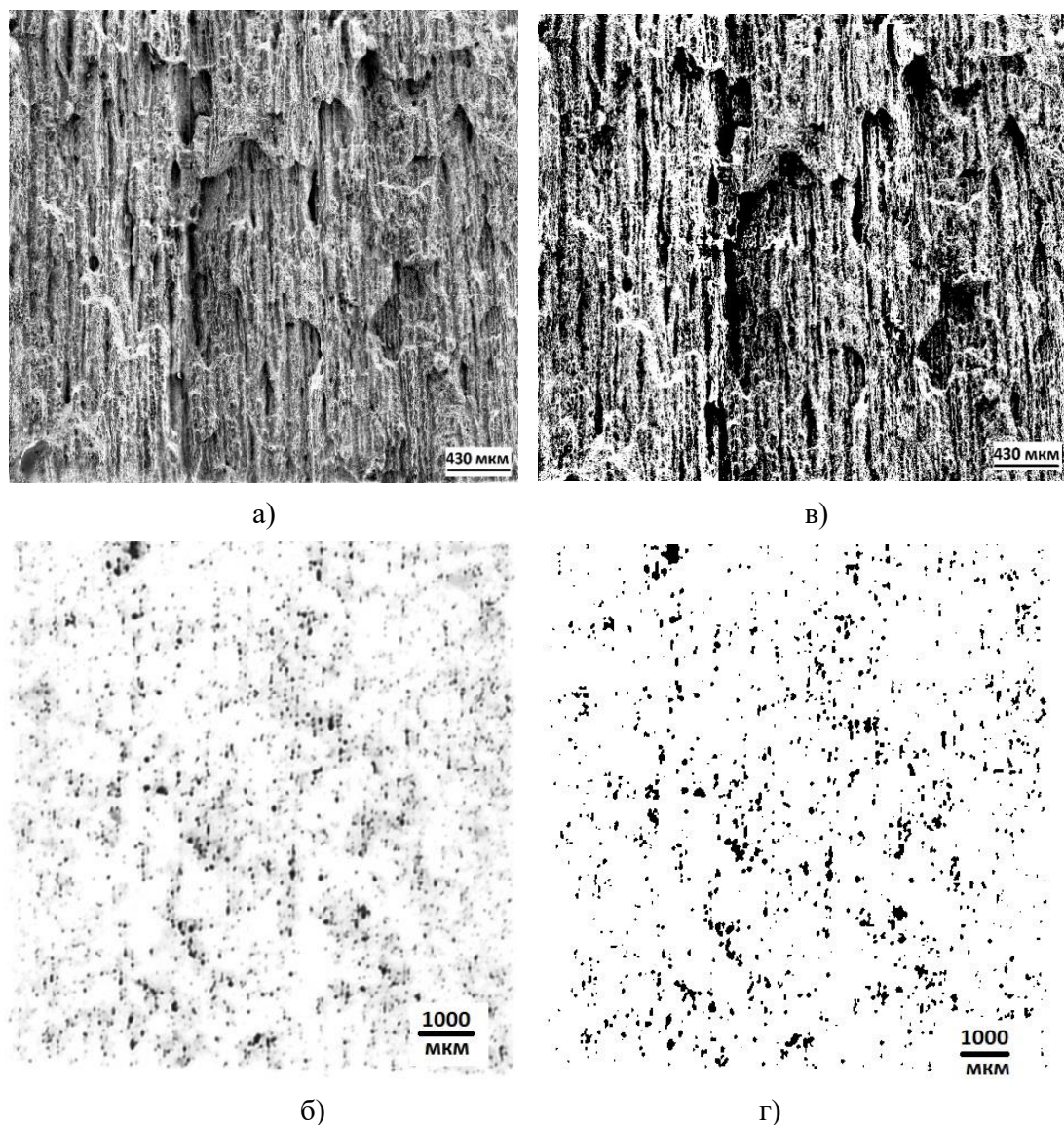


Рисунок 9 – Шиферообразный излом в поперечных ударных образцах из листовой стали 16Г2АФ (а), отвечающее ему изображение серного отпечатка по Бауману (б) и их изображения после бинаризации (в) и (г) соответственно

Очевидно, что именно они стали причиной такого излома стали 16Г2АФ. Их можно выявить либо на металлографическом шлифе (сшивкой большого числа кадров в панораму), либо на основе экспресс-измерений в масштабах образца геометрии серного отпечатка по Бауману. Однако на изображении серного отпечатка явного наличия ориентировки темных пятен вдоль направления прокатки не наблюдалось.

Для выявления взаимосвязи строения серного отпечатка и сопутствующего ему излома их изображения подвергались попиксельной последовательной эрозии и дилатации (с учетом различий

масштабов изображений) с одновременным определением среднего расстояния между темными объектами (темные пятна серного отпечатка и вытянутые ямки соответственно). (рисунок 10).

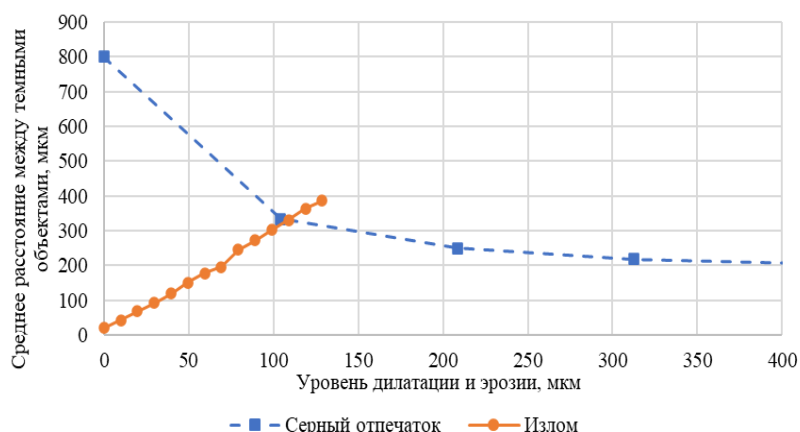


Рисунок 10 – Расчет среднего расстояния между объектами при последовательной эрозии для серного отпечатка и эрозии для изображения излома

Сопоставление результатов измерений обработанных 2D-изображений излома и серного отпечатка показало (рисунок 11), что при достижении определенного шага эрозии и дилатации наблюдается близкий характер распределения значений расстояний между темными объектами – вытянутыми ямками в изломе и пятнами серного отпечатка.

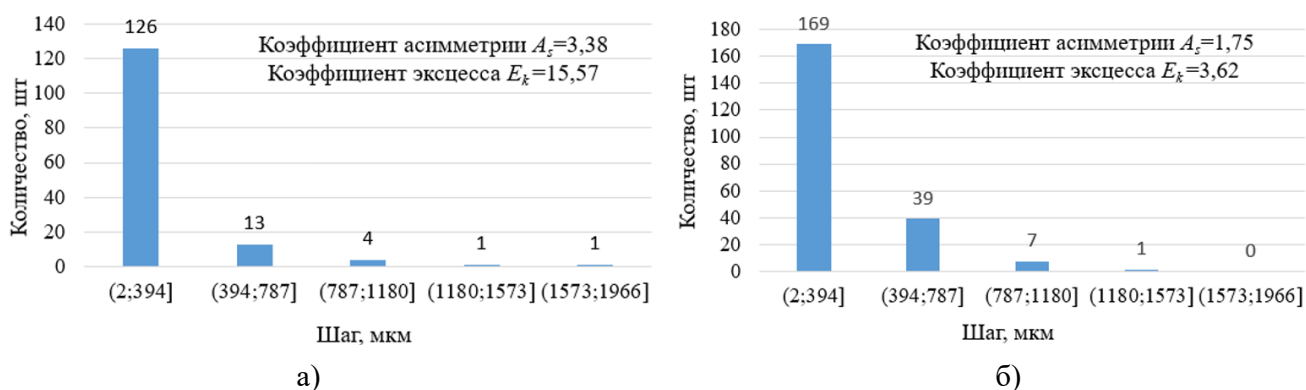


Рисунок 11 – Распределение значений шага между темными объектами – вытянутыми ямками на бинарных 2D-изображениях излома (а) и темными пятнами серного отпечатка (б)

Полученные результаты указывают на одинаковые закономерности в формировании 2D-изображений серного отпечатка и соответствующих им изломов ударных образцов из листовой стали 16Г2АФ. Таким образом, измерения строения изображений прямо подтвердили определяющую роль ниток сульфидов в появлении шиферообразного излома. Это означает, что результаты цифровых измерений и обработки изображений серных отпечатков могут дать дополнительную существенную информацию об их строении, важную, для прогноза разрушения, в данном случае, образования шиферообразного излома.

**Определение трещиностойкости сталей.** При наличии неоднородных разномасштабных структур важно оценить их влияние на механические свойства, в том числе трещиностойкость. Для вязких материалов это достаточно трудно сделать с помощью силового критерия вязкости разрушения  $K_{IC}$ , вследствие трудностей, связанных с выполнением условий плоской деформации

(хотя при этом нет сомнений, что именно с различием в геометрии разнородных структур связан существенный разброс значений трещиностойкости, обычный для испытаний на вязкость разрушения). Более информативными в этой связи могут оказаться критерии нелинейной механики разрушения: интеграл Черепанова-Райса  $J_c$  и критическое раскрытие трещины  $\delta_c$ . ГОСТ25.506-85 формализует процедуру их определения, однако есть известная неопределенность в их нахождении, например, не вполне ясно, почему старту трещины (при оценке  $\delta_c$ ) должно соответствовать достижение максимальных значений нагрузки. Не ясно, в какой мере необходимо учитывать различия в кинетике распространения трещины в целом. В этой связи, очевидно, что в рамках каждого испытания необходимо учитывать закономерности продвижения вязкой трещины, например, по совместным измерениям акустической эмиссии и топографии статического излома, и геометрию раскрытия её берегов. При таком подходе есть основания также надеяться на получение значений трещиностойкости с привязкой к структуре.

В связи с этим определение критического раскрытия трещины  $\delta_c$ , проводили на основе представления о раскрытии трещины как результата вращения ее берегов относительно некоторого центра (оси вращения)  $O$ , когда при достижении в устье трещины критического значения раскрытия становится возможным ее рост (рисунок 12).



Рисунок 12 – Схема определения критического раскрытия трещины:  $V_c$  – смещение берегов трещины, соответствующее критическому моменту ее распространения;  $B$  – высота образца;  $O$  – центр вращения и длина усталостной трещины с надрезом  $l$ ;  $L_0$  – расстояние от центра вращения до края образца;  $z$  – расстояние от места крепления датчика смещения до образца;  $n$  – коэффициент вращения берегов трещины;

Тогда относительное перемещение краев трещин при ее вершине и раскрытие трещины на открытом конце связаны линейным соотношением:

$$\delta_c = \frac{V_c}{1+n \frac{l+z}{B-l}} \quad (1)$$

Применение данной концепции осложняется, в частности, тем, что не ясно, чем определяется значение коэффициента  $n$ , о критериях выбора величины  $V_c$  на диаграмме «нагрузка–смещение». Подход, приведенный в ГОСТ25.506–85 исключает величину  $n$  из расчетов. Однако её можно определить в ходе испытания. Далее, ГОСТ 25.506–85 рекомендует при определении  $\delta_c$

использовать значение смещения  $V_c$ , соответствующее максимальному значению нагрузки. Однако если для хрупких материалов достижение максимальной нагрузки обычно совпадает с началом нестабильного распространения трещины, то для вязких материалов обычно наблюдается скачкообразный рост трещин. Для более точного определения критического момента, соответствующего старту трещины (начала ускоренного роста), необходимо использовать прямые методы мониторинга распространения трещины. В этой связи перспективным является метод АЭ. Получение представительной статистики измерений может обеспечить их цифровизация.

Для уточнения величины коэффициента вращения  $n$  экспериментально, по измерениям смещений берегов трещины на трех уровнях по ее высоте, определяли положение геометрического центра вращения берегов трещины (объект исследования: образцы на статический изгиб - крупные поковки из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш и стали 15Х2НМФА). Метод наименьших квадратов позволил аппроксимировать значения всех трех смещений (для фиксированных моментов нагрузки), полученные уравнения прямых дали, при их пересечении с осью симметрии надреза и трещины, положение центра  $L_0$  (оси) вращения берегов трещины по высоте образца. Это дало возможность вычислить значение постоянной  $n_{\text{экс}} = (B-l)/[L_0-(l+z)]$ . Её величина варьировалась в зависимости от длины усталостной трещины (с надрезом)  $l_0$  в пределах ее поля допуска  $(0,45 \div 0,55)B$ , установленного ГОСТ 25-506-85 и положения центра вращения (таблица 8). Это обстоятельство подтверждает необходимость экспериментального определения постоянной  $n_{\text{экс}}$ .

Таблица 8 – Значения геометрического центра вращения ( $L$ ) и коэффициента вращения берегов трещины  $n_{\text{экс}}$  исследуемых сталей

Сталь	Номер образца	$L$ , мм	$\ell$ , мм (усталостная)	$n_0$
38ХНЗМФА-Ш	1	$14,6 \pm 1,2$	$9,7 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,3$
	2	$14,1 \pm 0,8$	$10,4 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,1$
	3	$13,7 \pm 0,7$	$9,5 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,3$
	4*	$14,4 \pm 0,3$	$10,8 \pm 0,6$	$2,9 \pm 0,4$
	5*	$14,9 \pm 0,7$	$10,9 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,7$
15Х2НМФА	6	$15,3 \pm 0,2$	$10,5 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,2$
	7	$15,3 \pm 0,2$	$10,1 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,8$

\* Испытания проводились совместно с Нго Нгок Ха

Измерение АЭ от вязкого подроста трещины в ходе испытаний выявило равномерно чередующуюся последовательность наиболее мощных по амплитуде  $A$  ( $A \geq 3,8$  В) сигналов АЭ (рисунок 13). Это признак стабильного, скачкообразного подроста трещины, что делает возможным определение критического раскрытия трещины для любого из ее скачков с учетом подроста и формы переднего фронта трещины.

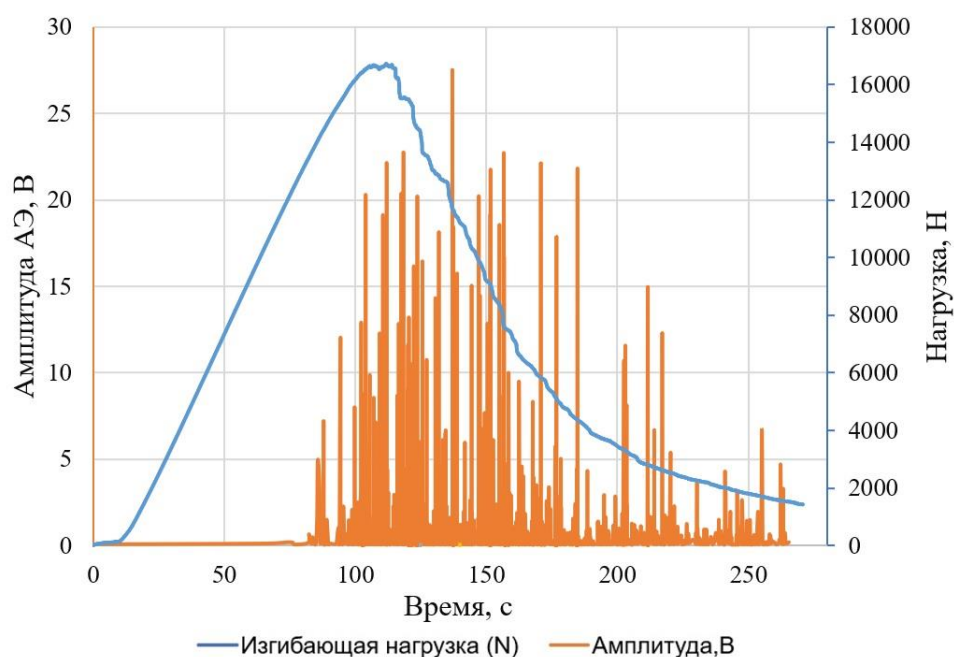


Рисунок 13 – Импульсы акустической эмиссии при разрушении образца из стали 38ХНЗМФА

Определение масштабов последовательных подростов трещины и формы их передних фронтов возможно на основе цифровых 3D-моделей изломов образцов. Сопоставление числа передних фронтов трещины в изломе и максимальных импульсов АЭ на изломе каждого образца выявило их совпадение, что указывает на корректность определения критических моментов в развитии статической трещины. Это позволило определить значения критического раскрытия трещины  $\delta_c$  для каждого из ее первых 4-5 скачков, с учетом экспериментально найденных значений коэффициента вращения  $n$ , величин подроста трещины и кривизны её переднего фронта (в таблице представлены значения  $\delta_c$  для его центральной области, где обеспечивается максимальная стесненность пластической деформации) и сопоставить со значениями  $\delta_c$ , определенными по ГОСТ 25.506-85 (таблица 9). Полученные результаты позволили выявить масштаб различий значений трещиностойкости (критического раскрытия трещины) как в пределах каждого образца и их воспроизводимости от поковки к поковке ( $\Delta^{\delta_c} = \delta_c^{\max} - \delta_c^{\min}$ ;  $\Delta_1^{\delta_c} = |\delta_c^{\text{ГОСТ}} - \delta_{c1}|$ ;  $\Delta_{\max}^{\delta_c} = |\delta_c^{\text{ГОСТ}} - \delta_c^{\max}|$ ;  $\Delta_{\min}^{\delta_c} = |\delta_c^{\text{ГОСТ}} - \delta_c^{\min}|$ ) (таблица 10).

Таблица 9 – Значения трещиностойкости (КРТ) исследуемых сталей

Сталь	Номер образца	$\delta_c$ по ГОСТу 25.506, мм	$\delta_c$ по классической формуле (с учетом скачков трещины), мм					
			$\delta_{c1}$	$\delta_{c2}$	$\delta_{c3}$	$\delta_{c4}$	$\delta_{c5}$	$\delta_c^{\text{ср}}$
38ХНЗМФА-III	1	0,077	0,082	0,079	0,093	0,108	-	$0,091 \pm 0,007$
	2	0,082	0,098	0,088	0,091	0,077	0,081	$0,087 \pm 0,004$
	3	0,090	0,121	0,111	0,117	0,119	0,091	$0,112 \pm 0,002$
	4*	0,067	0,065	0,062	0,063	0,056	0,052	$0,059 \pm 0,002$
	5*	0,086	0,093	0,085	0,073	0,071	0,068	$0,078 \pm 0,005$
15Х2НМФА	6	0,296	0,319	0,329	0,298	0,347	0,316	$0,322 \pm 0,010$
	7	0,268	0,179	0,173	0,194	0,152	0,228	$0,185 \pm 0,009$

Таблица 10 – Масштаб неоднородности значений  $\delta_c$  (мм) металла поковок с неоднородной структурой из стали 38ХН3МФА-Ш и 15Х2НМФА

Сталь	Номер образца	$\Delta_1^{\delta_c}$	$\delta_c^{\max}$	$\delta_c^{\min}$	$\Delta^{\delta_c}$	$\Delta_{\max}^{\delta_c}$	$\Delta_{\min}^{\delta_c}$
38ХН3МФА- Ш	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	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

\* Испытания проводились совместно с Нго Нгюк Ха

Для крупных поковок из стали 38ХН3МФА-Ш и 15Х2НМФА показано, что значения  $\delta_c$  в пределах одного образца могут различаться от 25 до 37% и от 16 до 50 % соответственно. При этом значения, определенные в соответствии с ГОСТ 25.506, могут отличаться от 3 до 34% для 38ХН3МФА-Ш и 8 до 33% для 15Х2НМФА по сравнению с величинами  $\delta_c$ , характерными для первого скачка статической трещины (по измерениям АЭ).

Отличие гостовских значений  $\delta_c$  в пределах одного образца по сравнению с величиной КРТ, определенной экспериментально -  $\delta_c^{\max}$ , варьировалось в пределах от 3 до 40 % для стали 38ХН3МФА-Ш, от 15 до 17% для 15Х2НМФА; по сравнению с минимальным значением раскрытия -  $\delta_c^{\min}$ , оно достигало 22 и 43 % соответственно.

Наблюдаемое различие значений трещиностойкости в пределах одного образца и между поковками показывает, что объективная оценка влияния разнородных структур: дендритной, неметаллических включений и микроструктуры) – на сопротивление металла разрушению возможна только с привязкой к структуре. Это обуславливает преимущество предложенного подхода в определении величины  $\delta_c$  с привязкой к конкретной зоне поковки или фрагменту ее разнородной структуры. Это повысит объективность прогноза разрушения металла в целом.

Исходя из этого можно выделить именно те факторы структуры, которые лимитируют разброс вязкости, что важно для разработки технологических мероприятий по повышению однородности вязкости разрушения металла.

Для оценки работоспособности материалов, разрушающихся вязко также возможно применение другого параметра нелинейной механики разрушения:  $J$ -интеграла. Предполагается, что моменту достижения  $J$ -интеграла некоторой критической величины  $J_{Ic}$  должен соответствовать неограниченный рост трещины.

На этапе становления энергетического подхода к оценке трещиностойкости было предложено несколько экспериментальных методик определения  $J$ -интеграла, не потерявших актуальности в настоящее время. Существующие нормативные документы, в частности ГОСТ 25.506, предполагают его оценку с привязкой к моменту старта исходной усталостной трещины. Кроме этого, должно быть дополнительно подтверждено соответствие полученных значений  $J_c$  критическим ( $J_{Ic}$ ). Однако остается неудовлетворенность получаемыми результатами в связи с той же неоднородностью структур и сопутствующим этому разбросу значений критерия. Измерение статического подраста трещины (по регистрации акустической эмиссии при разрушении и анализе морфологии излома по его 3D-модели) дало возможность определения  $J$ -интеграла с привязкой к



каждому скачку статической трещины (таблица 11). Полученные результаты позволили выявить масштаб различий значений трещиностойкости ( $J$ -интеграл) как в пределах каждого образца и их воспроизводимость от поковки к поковке ( $\Delta^J = J^{\max} - J^{\min}$ ;  $\Delta_1^J = |J^{\text{ГОСТ}} - J_1|$ ;  $\Delta_{\max}^J = |J^{\text{ГОСТ}} - J^{\max}|$ ;  $\Delta_{\min}^J = |J^{\text{ГОСТ}} - J^{\min}|$ ) (таблица 12).

Таблица 11 – Значения трещиностойкости ( $J$ -интеграл) стали 38ХНЗМФА-Ш и 15Х2НМФА

Сталь	Номер образца	$J$ -интеграл по ГОСТу 25.506, МДж/м <sup>2</sup>	$J$ -интеграл (с учетом скачков трещины), МДж/м <sup>2</sup>					
			$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J^{cp}$
38ХНЗМФА-Ш	1	0,057	0,066	0,075	0,097	0,092	0,083	0,083 ± 0,006
	2	0,099	0,055	0,047	0,057	0,081	0,076	0,063 ± 0,007
	3	0,070	0,095	0,102	0,135	0,083	0,086	0,100 ± 0,009
	4*	0,062	0,088	0,092	0,102	0,079	0,097	0,092 ± 0,004
	5*	0,067	0,039	0,053	0,042	0,064	0,045	0,049 ± 0,006
15Х2НМФА	6	0,298	0,336	0,519	0,587	0,342	0,481	0,453 ± 0,050
	7	0,274	0,168	0,145	0,179	0,122	0,189	0,161 ± 0,012

Таблица 12 – Масштаб неоднородности значений  $J$ -интеграл (МДж/м<sup>2</sup>) металла поковок с неоднородной структурой из стали 38ХНЗМФА-Ш и 15Х2НМФА

Сталь	Номер образца	$J_1$	$J_{\max}$	$J_{\min}$	$\Delta^J$	$\Delta_1^J$	$\Delta_{\max}^J$	$\Delta_{\min}^J$
38ХНЗМФА-Ш	1	0,066	0,097	0,066	0,031	0,009	0,040	0,009
	2	0,055	0,081	0,047	0,034	0,044	0,018	0,052
	3	0,095	0,135	0,083	0,052	0,025	0,065	0,013
	4*	0,088	0,102	0,079	0,023	0,026	0,040	0,017
	5*	0,039	0,064	0,039	0,025	0,028	0,003	0,028
15Х2НМФА	6	0,336	0,587	0,336	0,251	0,038	0,289	0,038
	7	0,168	0,189	0,122	0,067	0,106	0,085	0,152

\* Испытания проводились совместно с Нго Нгок Ха

Для крупных поковок из сталей 38ХНЗМФА-Ш и 15Х2НМФА показано, что значения  $J$ -интеграла в пределах одного образца различались от 29 до 72% и от 55 до 75% соответственно. При этом 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), составило 16 - 44% для стали 38ХНЗМФА-Ш, 13 - 39% для стали 15Х2НМФА.

Сравнение значений, определенных в соответствии с ГОСТ 25.506, с величиной  $J_{\max}$  дало следующее различие в уровне трещиностойкости: от 4 до 93 % для стали 38ХНЗМФА-Ш и от 31 до 97% для стали 15Х2НМФА; по сравнению с минимальным значением  $J_{\min}$  - от 16 до 53 % и от 13 до 55 % соответственно.

Полученные результаты показывают, что при определении  $J$ -интеграла с учетом требования его теоретической модели, необходим учет всех методических особенностей экспериментального определения  $J$ -интеграла, в том числе оценки кинетики распространения трещины, геометрии строения изломов. По-видимому, одним из узких мест методики определения интеграла Черепанова-Райса остается его недостаточная привязка к структуре, аномалий ее строения

(номинально однотипных), что может ограничить информацию о масштабах неоднородности трещиностойкости и повысить риски прогноза разрушения материалов.

## ВЫВОДЫ

1. С целью количественной оценки строения неоднородных структур и изломов сталей 38ХНЗМФА, 40Х2Н2МА, 15Х2НМФА и 16Г2АФ апробированы цифровые процедуры измерения и обработки их изображений, включающие их бинаризацию и фильтрацию, в т.ч. шумов, основанные на анализе поля яркости изображений (в 256 оттенках серого), учете статистики распределения значений измеряемых параметров геометрии информативных элементов изображений и масштабного фактора (объем выборки результатов измерения).

2. Для повышения объективности результатов измерения изломов на мезо уровне наблюдения предложены: критерий для выбора оптимального полинома степени  $n$  при вычитании низкочастотной составляющей мезотопографии на основе аппроксимации МНК линии  $z(x)$  пересечения рельефа с нормальной к излому плоскостью: отсутствие значимого понижения остаточной дисперсии регрессии  $s^2(n)$  при дальнейшем увеличении  $n$ ; усовершенствованная процедура представления траектории  $z(x)$  в виде ломаной лестницы с последующим измерением параметров её геометрии. Оценен вид их распределения (асимметричный) и его статистические показатели в зависимости от шага измерения и ограничения минимальных размеров её элементов (ступеней). Из накопленной статистики результатов определения значений параметров ломаной лестницы (в масштабах образцов) изломов исследуемых сталей следует, что она отражает различия в механизмах их разрушения и может быть использована для объективной классификации изломов.

3. Для уточнения представлений о механизме образования шиферообразного излома в ударных поперечных образцах из листовой стали 16Г2АФ были использованы процедуры эрозии, дилатации и фильтрации бинарных изображений излома и соответствующего ему серного отпечатка по Бауману. Сопоставление результатов измерений 2D-изображений излома и серного отпечатка (в совпадающей по ориентировке плоскости шлифа) выявило статистическое сходство видов распределения значений шага между вытянутыми ямками в изломе и темными пятнами серного отпечатка (в одном и том же направлении), что подтверждает вклад ниток сульфидов в образовании шиферообразного излома.

4. Выявлено соответствие между изменением размера зерна аустенита стали 40Х2Н2МА от  $17,1 \pm 0,2$  до  $91,2 \pm 1,4$  и  $109,3 \pm 1,5$  мкм и значениями параметров ломаной лестницы (в терминах ГОСТ 27964 «Измерение параметров шероховатости») мезорельефа соответствующих изломов, испытанных при комнатной температуре: среднеарифметического отклонения профиля  $Ra$ , наибольшей и полной его высот  $Rz$  и  $Rmax$  соответственно.

5. На основе измерения геометрии раскрытия трещины и кинетики её раскрытия – по совместным измерениям цифровых моделей изломов и регистрации АЭ при испытании уточнены методы определения критического раскрытия трещины  $\delta_c$  и  $J$ -интеграла (с учетом кинетики вязкого подраста трещины и формы её переднего фронта).

6. С использованием уточненных методик оценки трещиностойкости установлено, что в пределах каждого образца из стали 38ХНЗМФА-Ш разброс значений  $\delta_c$  ( $J_c$ ) варьировался в



пределах от 25 до 37 (29 - 72)%, для образцов из стали 15Х2НМФА – от 16 до 50 (55 – 75)% соответственно. Такой разброс значений трещиностойкости может быть связан с неоднородностью строения разнородных структур металла. При этом различие значений  $\delta_s$  (Jс) определенных в соответствии с ГОСТ 25.506, и величин  $\delta_s$  (Jс), характерных для первого скачка статической трещины (по измерениям АЭ) находилось в диапазоне: от 3 до 34 (16 – 44)% для стали 38ХНЗМФА-Ш и от 8 до 33 (13 – 39)% для стали 15Х2НМФА соответственно.

#### **Список цитируемой литературы**

1. Сталь на рубеже столетий. Под ред. Ю.С. Карабасова. - М.: МИСиС, 2001. –664 с.
2. Разрушение. В 2 кн. Кн. 2. Разрушение структур: моногр. / М.А. Штремель. –М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 976 с.

#### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Кудря А.В., Соколовская Э. А., Танг В.Ф., Сергеев М.И.. Возможности цифровизации для контроля качества стали по строению излома. // Электromеталлургия. – 2021.–№ 10.–С. 30-38. A.V. Kudrya, E.A. Sokolovskaya, V.P. Tang, M.I. Sergeyev. Digitization Possibilities for Steel Quality Control Using the Structure of Fracture. // Russian Metallurgy (Metally).–V. 2021.–N. 11.–P. 1619–1624. DOI: 10.31044/1684-5781-2021-0-10-30-38

2. Кудря А.В., Соколовская Э. А., Танг В.Ф., Погорелов Е. В., Вяткина А.К.. Масштабы неоднородности структур конструкционных материалов и методы ее оценки. Электromеталлургия. –2022.–№ 5. –С. 30-40. A.V. Kudrya, E.A. Sokolovskaya, V.P. Tang, E.V. Pogorelov, A.K. Vyatkina. Scales of the heterogeneity of structural materials and methods of its estimation. Russian Metallurgy (Metally). – 2022.–N. 5.–P.603-610

DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-30-40

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.

DOI: 10.31044/1814-4632-2022-6-2-19

4. Соколовская Э.А., Кудря А.В., Пережогин В.Ю., Танг Вьет Фыонг, Кодиров Д.Ф., Сергеев М.И. Возможности цифровизации измерений в металловедении для внесения в оценку структур и разрушения количественной меры. Металлург –2022. –№ 7. – С. 48-57.

DOI 10.52351/00260827-2022-07-48-57

5. Г. А. Михайлова, Танг Вьет Фыонг, Г.В. Котишевский, Нго Нгок Ха, Э.А. Соколовская, А.В. Кудря. Оценка неоднородности трещиностойкости на малогабаритных образцах на снове нелинейной механики разрушения. // Сб. трудов X-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2021. 129 апреля 2021 года. – Москва, НИТУ «МИСиС». –С. 159

6. М.И. Сергеев, Танг Вьет Фыонг, А.В. Кудря. Развитие подходов к измерению мезостроения изломов. // Сб. трудов X-ой Евразийской научно-практической конференции

«Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2021. 130 апреля 2021 года. – Москва, НИТУ «МИСиС». –С. 159

7. М.И. Сергеев, Танг Вьет Фыонг, А.В. Кудря. Информативность измерения 2D-изображений изломов для выявления закономерностей их строения // Сб. трудов X-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2021. 130 апреля 2021 года. – Москва, НИТУ «МИСиС». –С. 159