

На правах рукописи

ЛЕ ХАЙ НИНЬ

**ИЗМЕРЕНИЕ 2D и 3D-МОРФОЛОГИИ ВЯЗКИХ ИЗЛОМОВ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность 05.16.01

«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре металловедения и физики прочности  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования “Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»”

**Научный руководитель:**

профессор, д.т.н. **А.В. Кудря**

**Официальные оппоненты**

профессор, д.ф.-м.н. **А.М. Авдеенко**  
(Академия ГПС МЧС)

к.т.н. **Г.Р. Шнейдеров**  
(ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова»)

**Ведущая организация:**

ФГПУ ЦНИИЧермет им И.П. Бардина

Защита состоится « 18 » июня 2015 года в 15<sup>30</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д.212.132.08, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, ауд. А-305

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте  
[www.misis.ru](http://www.misis.ru)

Автореферат разослан «    » 2015 года

Учёный секретарь диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук



С.И. Мухин

## **Актуальность работы**

Для повышения однородности качества металла даже в рамках хорошо отлаженной технологии необходимо понимание разницы в механизмах разрушения, как причины разброса прочности, пластичности и вязкости. Для выявления критических факторов структуры (в т.ч. включений), лимитирующих неоднородность вязкости металла, нужны количественные методы анализа вязких изломов, однако существующие подходы к оценке их строения носят преимущественно качественный характер. В этой связи работе развиты методы количественной трехмерной микроскопии изломов.

## **Цель исследования**

1. Сопоставить вязкие изломы конструкционных сталей, отличающихся сортаментом (сорт, поковки, лист), схемой испытания (растяжение, удар) и ориентировкой образцов (долевые, тангенциальные и Z-образцы).
2. Оценить информативность параметров геометрии вязкого излома для выявления причин различий в уровне вязкости конструкционных сталей.

## **Научная новизна**

- Показана возможность сопоставления вязкости сталей по изменениям ямок микрорельефа излома. Найден переход формы ямки от параболической к сферической с увеличением масштабов, не зависящий от типа микроструктуры (сорбит отпуска, феррит-перлитная полосчатость, остатки дендритной структуры) и от схем испытания (на удар и статическое растяжение, при вырезке образцов вдоль и поперек направления прокатки, тангенциально в поковке);
- Для оценки различий между системами ямок предложен анализ их полиэдров Вороного и распределений полиэдров по площадям, числу соседей и расстояний между ямками;
- Выявлено два механизма слияния смежных пор: разрушение перемычек отрывом со вторичными микроямками на перемычке и срезом (без микроямок);
- Из статистики полиэдров Вороного следует, что наблюдаемое увеличение ударной вязкости ряда конструкционных сталей с 0,54 до 2,8 МДж/м<sup>2</sup>, относительного сужения с 37 до 75 %, сопровождается ростом доли крупных ямок (их размеров от 8 до 25 мкм), уменьшением площади перемычек между смежными ямками;
- Показано, что различие в соотношении глубин и диаметров ямок:  $0,87 \pm 0,04$ ;  $0,61 \pm 0,03$  и  $1,34 \pm 0,08$  отражает особенности эволюции пор в продольных образцах (на удар и на растяжение) и Z-образцах на растяжение стали с феррит-перлитной полосчатостью.

## **Практическая ценность**

Состоит в использовании предложенной методики измерения 2D и 3D-микрорельефа изломов для выявления причин неоднородности вязкости в листе и поковках.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Сопоставление ударной вязкости и результатов измерений геометрии микрорельефа вязкого излома различных типов микроструктур (сорбит отпуска, феррит-перлитная полосчатость, остатки

дендритной структуры) и схем испытания (на удар и статическое растяжение, при вырезке образцов вдоль и поперек направления прокатки, тангенциально в поковке).

2. Выявление различий в размещении ямок по разбиению 2D-изображений ямочного рельефа на полиэдры Вороного.

3. Механизмы слияния смежных пор при вязком разрушении.

4. Статистика полиэдров Вороного и 3D-микрогеометрии рельефа изломов

5. Особенности эволюции пор при вязком разрушении в образцах листовой стали различной ориентировки.

### **Достоверность**

Достоверность результатов обеспечивается использованием современной исследовательской техники в сочетании с разнообразным программным обеспечением и статистическими методами обработки результатов.

### **Апробация работы**

Основные результаты доложены на XIII Международной научно-технической Уральской школе-семинаре молодых ученых металлургов. Екатеринбург, 2012 г.; 53-й Международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности», УО «ВГТУ». Витебск. 2012 г.; на VI и VII Евразийской конференции «Прочность неоднородных структур». Москва. 2012, 2014 гг.; на VI международной школе «Физическое материаловедение». Тольятти. 2013 г.; на «Proceedings of Thirteenth International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics», Jacksonville, FL, USA, November 13-15, 2013.

### **Личный вклад**

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, выражается в том, что он планировал, непосредственно участвовал в лабораторных экспериментах, проводил построение трехмерных цифровых моделей изображений изломов, предлагал методику их обработки, в т.ч. статистической и выполнял анализ полученных результатов; исследовал макро- и микроструктуры. Основные положения диссертационной работы сформулированы автором.

### **Вклад соавторов**

Участие научного руководителя А.В. Кудри – постановка задач исследования и обсуждение результатов. Э.А. Соколовская – консультации по обработке стереопар методами стереофотограмметрии и 3D-моделей на их основе. С.В. Скородумов, А.М. Арсенкин – получение стереопар на сканирующем электронном микроскопе. В.А. Траченко – разработка программного обеспечения для обработки изображений и отработка ряда статистических процедур. К.Б. Папина – получение изображений ряда структур исследуемых сталей. Н.И. Сидорова, Е.Н., Бокарева Е.Н., Нгок Ха – обработка стереопар, накопление статистики измерений строения геометрии рельефа. Е.И. Кузько – описание сериальных ударных кривых из принципа максимума правдоподобия, М.И. Федоров - измерение макрогеометрии изломов ударных образцов после сериальных испытаний. Ю.А. Глазкова и Чинь Хыу Чыонг – количественное описание полосчатости в микроструктуре.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, аналитического обзора литературы, 5 глав с описанием методики и результатов исследований, выводов и списка использованных источников из 130 наименований. Работа изложена на 155 страницах, содержит 69 рисунков и 11 таблиц.

## Краткое содержание диссертации

### 1. Материал и методика исследования

В качестве объекта исследования были использованы изломы ударных образцов: Менаже 40X2H2МА (квадрат стороной 80 мм), 15X2НМФА (из необлученного металла обечайки корпуса реактора типа ВВЭР-1000), 16Г2АФ (лист, толщиной 30 мм), 38ХНЗМФА-Ш (цилиндрические поковки поперечником 500 мм, уков 1,5), 09Г2С (лист, толщиной 42 мм) стандартного состава, полученные по принятой технологии [1] и испытанные при комнатной температуре (ГОСТ 9454) на маятниковом копре Roell Amsler RKP-450 и долевых и Z-образов на растяжение (диаметром 12 и 5,5 мм соответственно, лист из стали 09Г2С). Испытание на растяжение проводили на универсальных испытательных машинах Z250 фирмы ZWICK и Instron 150 LX.

Химический состав сталей (таблица 1), определенный на спектрометре тлеющего разряда SA-2000 фирмы LECO (концентрация серы - на анализаторе серы CS-400 той же фирмы) соответствовал требованиям нормативных документов.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сталей (масс, %)

масс., %	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cu	Cr	V	Mo	Al	As	N
16Г2АФ	0,17	0,4	1,5	0,1	0,015	0,01	0,1	0,2	0,09	-	-	-	-
15X2НМФА	0,17	0,29	0,47	1,34	0,009	0,014	0,05	2,24	0,09	0,51	-	-	-
40X2H2МА	0,38	0,26	0,46	1,73	0,012	0,003	0,02	1,48	-	0,24	-	-	-
38ХНЗМФА-Ш	0,37	0,31	0,25	3	0,011	0,002	0,11	1,2	0,12	0,44	-	-	-
09Г2С	0,1	0,66	1,55	0,11	0,008	0,003	0,08	0,04	-	-	0,006	0,004	0,006

Режимы термической обработки металла представлены в таблице 2, механические свойства – в таблице 3.

Таблица 2 – Режимы обработки исследуемых сталей

Марка стали	Сортамент	Режим термической обработки
16Г2АФ	лист	Тнорм=890-910°C,
15X2НМФА	поковка	Т=920 <sup>0</sup> С, вода +620 <sup>0</sup> С, 25ч.+ 650 <sup>0</sup> С, 20 ч.
40X2H2МА	сорт	Тзак=850 °С; Тотп=570 °С, 1 ч
38ХНЗМФА-Ш	поковка	Тзак=850-870°C, и отпуск при 520°C, 3,5ч.+540°C, 6ч.
09Г2С	лист	Тнорм=930°C, 2ч.

Таблица 3 - Механические свойства

Марка стали	Предел текучности $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\Psi$ , %	Ударная вязкость, КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
16Г2АФ	350	590	19,0	68	1,87
40Х2Н2МА	1120	1210	16,2	61,3	1,20
38ХН3МФА-Ш	1190	1200	12,8	36,8	0,54
15Х2НМФА	605	710	21,0	70	1,7
09Г2С (долевые образцы на растяжение и удар)	390	485	30	75	2,8
09Г2С на растяжение * (Z- образец)	-	-	-	74	-

\* испытывались малогабаритные образцы нестандартных пропорций

Анализ микро- и макроструктуры проводился на металлографических шлифах, изготовленных с использованием отрезного станка Viper, заливочного прессы PR-32 и автоматического полировального станка SS-2000 фирмы LECO. Для шлифовки применялись абразивные шкурки разной зернистости, полировки – алмазные суспензии с размером частиц 3 мкм, 1 мкм и 0,05 мкм. Микроструктуру сталей, выявляли с помощью травления в 3%-спиртовом растворе азотной кислоты. Макроструктуру сталей - глубокого травления в 50 % р-ре HCl.

Травлением в горячем пересыщенном водном растворе пикриновой кислоты с добавлением моющего средства "FAIRY" в качестве ПАВ с последовательными переполіровками была получена структура бывшего зерна аустенита.

Параметры микроструктуры и зерен определяли на оптическом микроскопе OLYMPUS PME-3 при увеличении  $\times 100$ -200 при помощи программы анализа изображения Image Expert Pro 3.

Неметаллические включения (НВ) контролировали на нетравленных шлифах и серном отпечатке.

Изломы образцов на удар растяжение анализировали на дне макрохрупкого квадрата (или плоской площадке в изломе типа «конус-чашечка») в сканирующем электронном микроскопе HITACHI S-800 и JEOL JSM-6610LV в диапазоне увеличений ( $\times 50 \dots 2500$ ). В изломе каждого образца было просмотрена площадь от  $1,8 \times 10^4$  до  $2,8 \times 10^6$  мкм<sup>2</sup> (не менее 2-5 образцов на вариант).

## 2. Получение изображений изломов и процедуры их описания

При вариации ударной вязкости исследуемых сталей в пределах от 0,52 до 2,8 МДж/м<sup>2</sup> (в зависимости от структуры, металлургического качества металла) для всех изломов наблюдался номинально однотипный механизм ямочного разрушения. Обычная визуальная оценка изломов различных полей зрения не смогла обеспечить надежное выявление причин различий вязкости (рисунок 1).

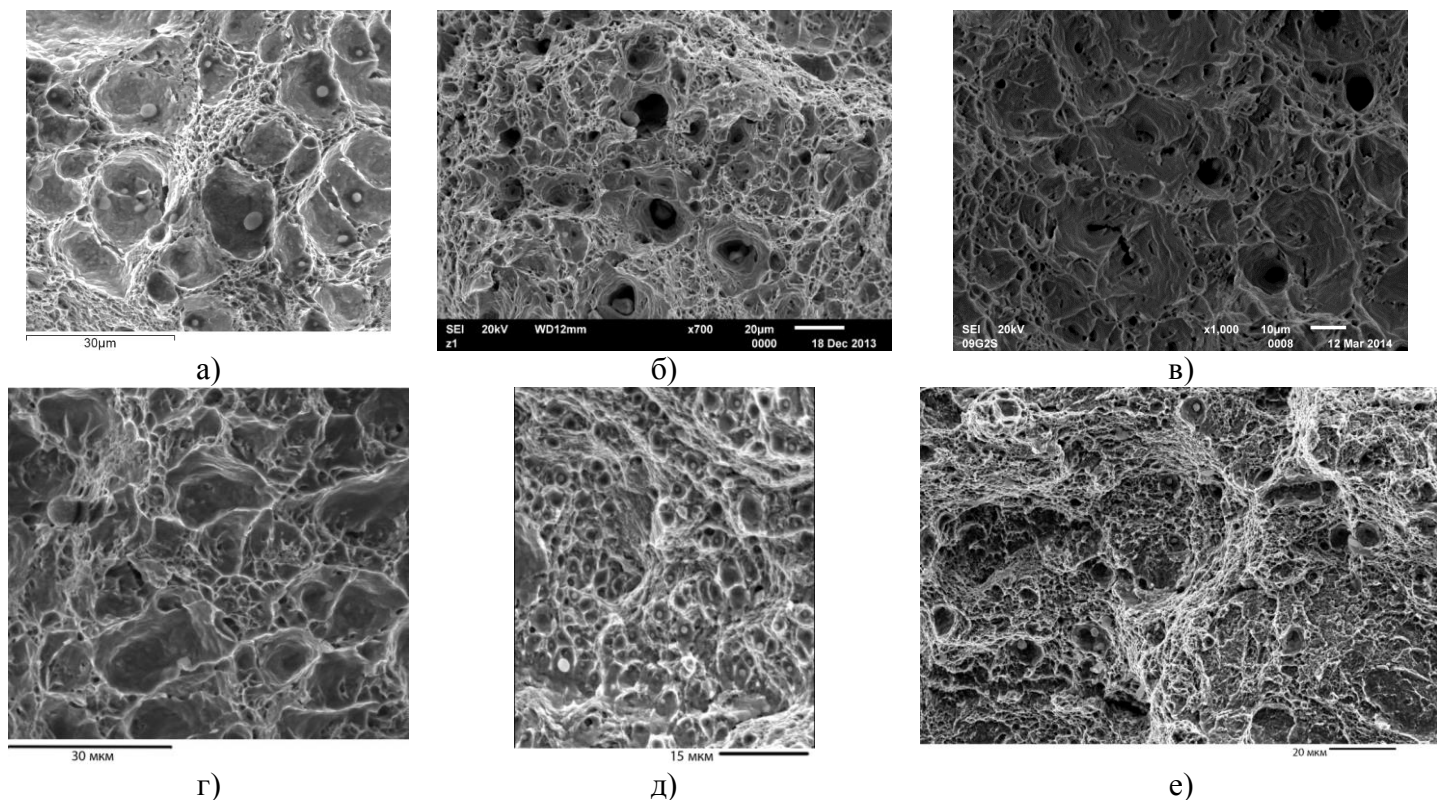


Рисунок 1 – Изломы исследуемых сталей 15X2НМФА (а), 09Г2С (Z- и продольный образцы на растяжение – б, в, соответственно), 16Г2АФ (г), 38ХНЗМФА-Ш (д), 40Х2Н2МА (е)

В этой связи были сопоставлены возможности исследования изломов средствами 2D- и 3D-размерности (с учетом их различий в трудоемкости, ошибок, вносимых в измерения различными экспериментаторами).

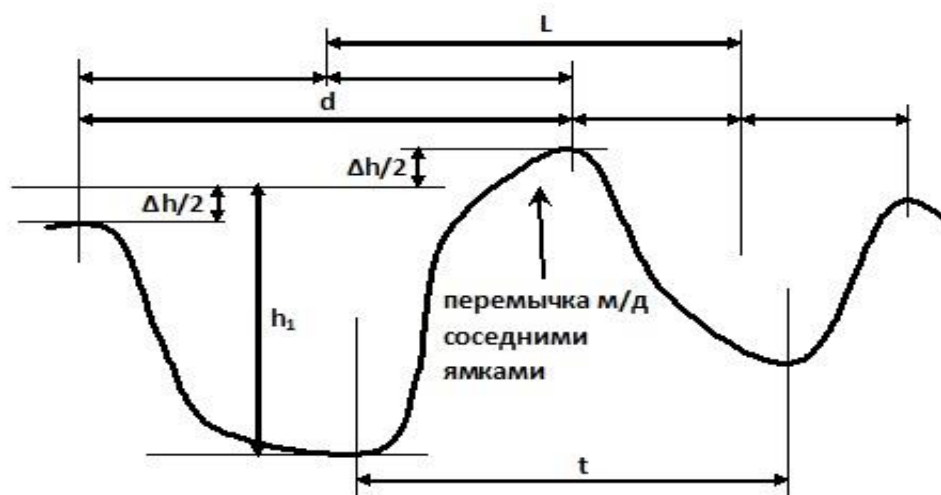
Очевидно, что максимально полную реконструкцию рельефа излома может дать только синтез 3D-картины из нескольких 2D (стереофотограмметрия) кадров, полученных в сканирующем электронном микроскопе. В стереопаре два кадра с одного и того же поля зрения, были сняты под углами, отличающимися на  $5 - 10^\circ$ . Если одна точка рельефа выше другой на величину  $z$ , то взаимное смещение их изображений на стереопаре (параллакс)  $x = z \tan \alpha \approx z\alpha$ . Реконструкцию 3D-картины излома проводили с использованием программы PHOTOMOD, описание 3D рельефа излома и его элементов - программы Origin. Для получения сопоставимых абсолютных значений геометрических параметров объектов по Z-координате и проверки правильности 3D-реконструкции использовали тест – объекты: порошки интерметаллида NiAl размером 10-25 мкм [1] и глобулярные включения размером 5-10 мкм, расположенные в ямках вязкого излома.

Геометрию 2D изображений излома описывали с использованием программ Intensiv (разработана В.А. Траченко), Image Expert Pro 3, статистическую обработку результатов - программ: Statistica, Origin, Mathcad и Excel.

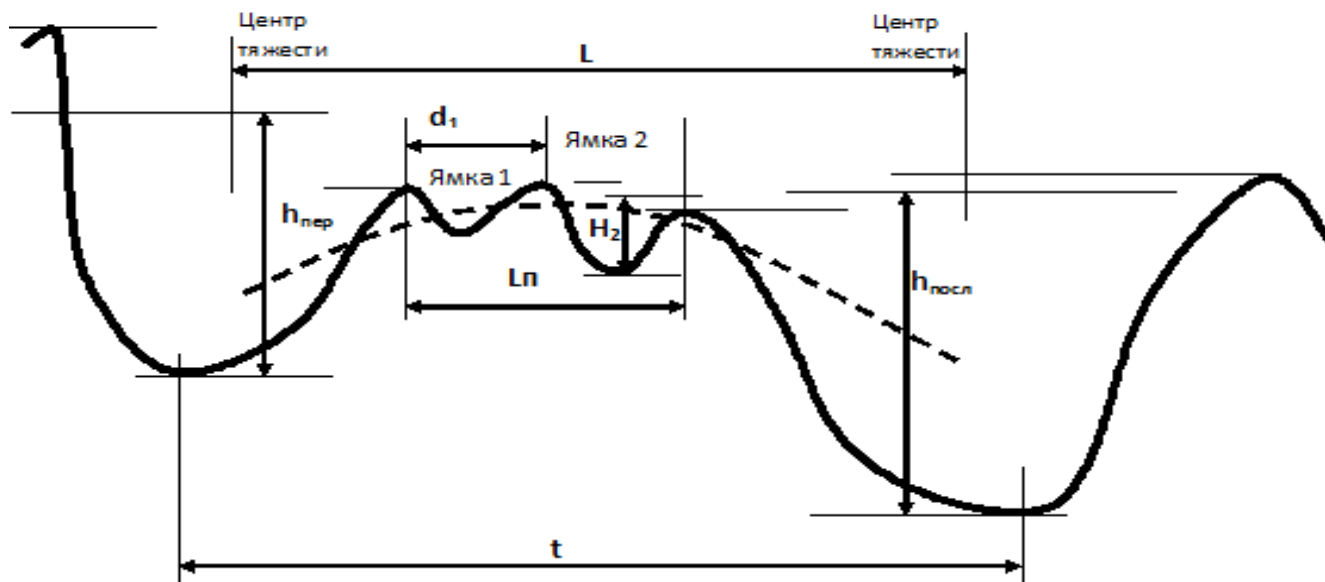
Существуют разные подходы к оценке вязкости материала по строению ямочного излома: по поперечнику и глубине ямки [2], полезно измерение ширины перемычек между смежными ямками, как меры микропластической деформации, предшествующей их слиянию. Были сопоставлены два

способа измерения геометрии вязкого излома на 2D-кадре: визуально и по распределению интенсивности яркости изображения в 256 оттенках серого. При первом подходе проводилось прямое измерение диаметра ямки на изображении, а при втором – по расстоянию между пиками на кривой распределения интенсивности яркости вдоль секущих на изображении, где максимумам и минимумам яркости соответствовали элементы излома, например, границы и тело ямки.

При изучении вязких изломов в 3D – масштабах наблюдения геометрические параметры определялись в соответствии со схемой (рисунок 2).



а)



б)

Рисунок 2 - Схема определения размеров ямок вязкого излома (диаметр –  $d$ , глубина –  $h$ ), толщин перемычек –  $L_{\text{п}}$ , расстояния между смежными ямками –  $L$ , в т.ч между точками, соответствующими их наибольшей глубине ( $t$ ) (а, б – два типа перемычек: с микроямками и без них)



Измерение поперечников и глубин ямок по четырем взаимно перпендикулярным секущим (рисунок 3 а) на плоском снимке дало их средние значения  $d_{cp}$  и  $H_{cp}$  соответственно. Из соотношения поперечников ямок оценивали вытянутость ямок и её ориентацию относительно направления магистрального распространения трещины (рисунок 3 б).

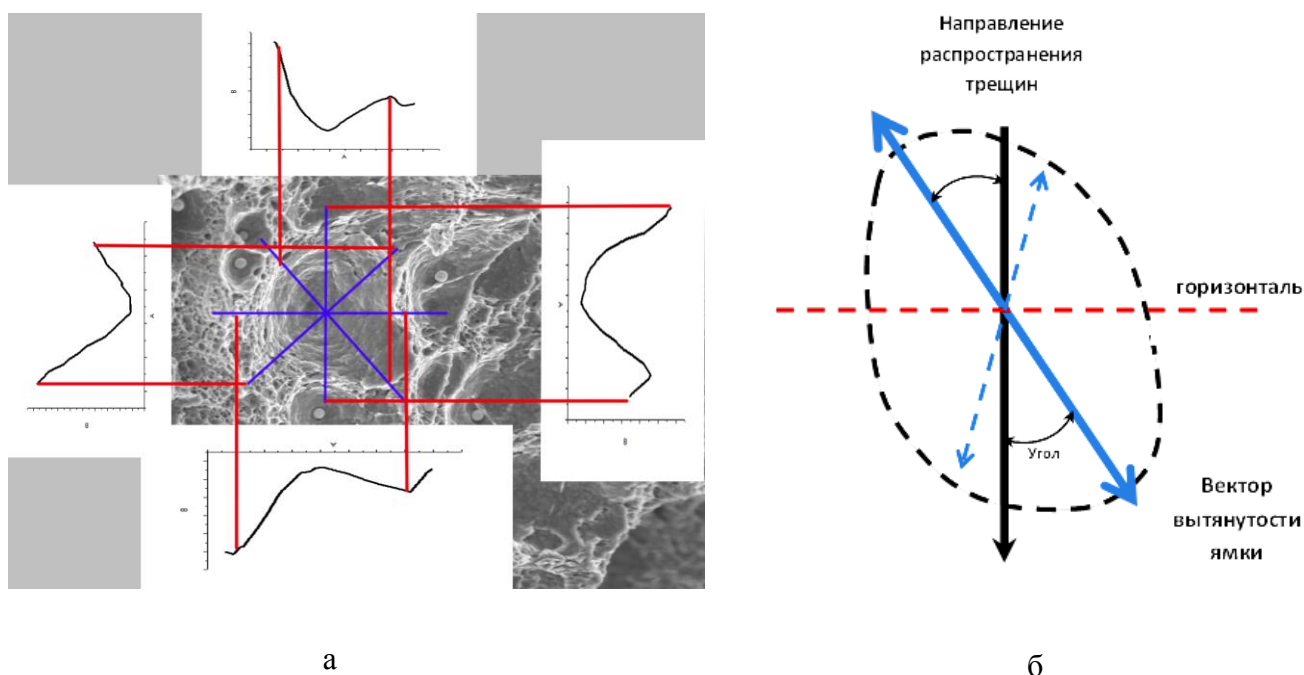


Рисунок 3 - Схема определения контура ямки путем построения его профиля (а) и определение вытянутости ямок относительно направления магистрального распространения трещины (б).

Из анализа 3D-моделей вязких изломов следует, что в ряде случаев (50-70%) контур ямки (горизонтальная проекция) имеет неправильную форму, также наблюдаются овальные ямки, вытянутые в направлении отличающимся от вектора развития магистральной трещины (от надреза ударного образца к его тыльной стороне ямки сдвига (рисунок 4). Геометрия контура ямки дает информацию о градиенте пластической деформации перемычек, предшествующей слиянию смежных пор. Это позволяет уточнить их механизм слияния.

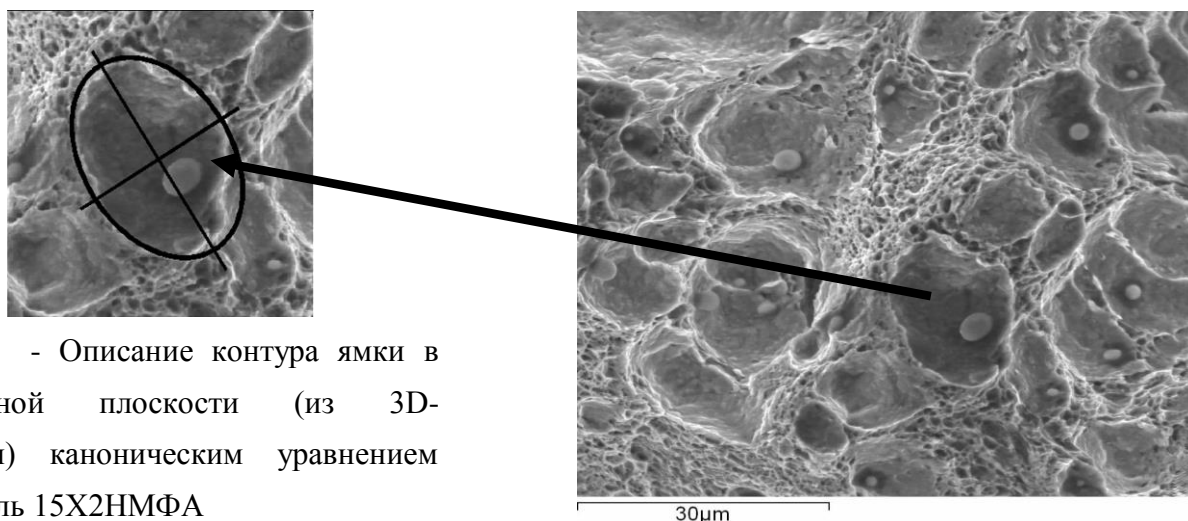
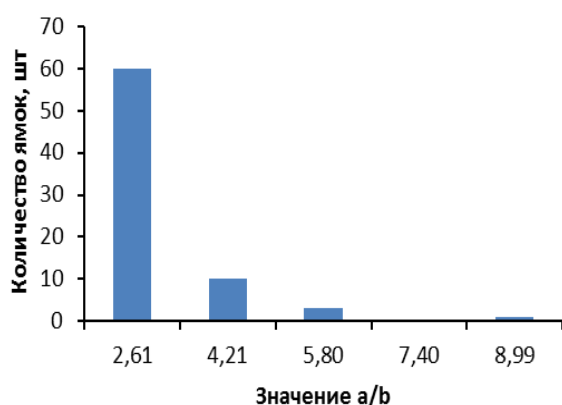


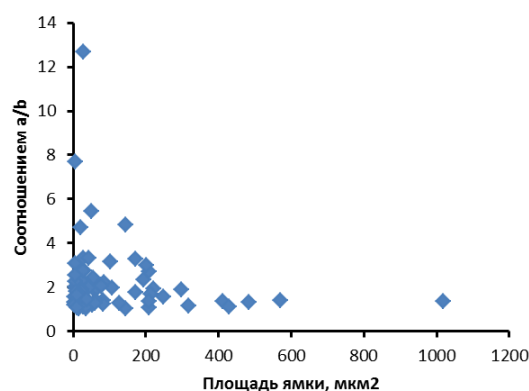
Рисунок 4 - Описание контура ямки в горизонтальной плоскости (из 3D-изображения) каноническим уравнением эллипса, сталь 15Х2НМФА

При этом направления вытянутости ямок в изломах различных образцов не всегда совпадали. Так для изломов ударных образцов сталей 15Х2НМФА, 16Г2АФ и 40Х2Н2МА направление вытянутости ямок более близко к направлению распространения магистральной трещины, по сравнению с изломами сталей 09Г2С и 38ХНЗМФА-Ш.

Форма контура ямки в горизонтальной плоскости чаще всего имеет эллиптический вид и ее описывали каноническим уравнением  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ , где  $a > 0$  – большая полуось;  $b > 0$  – малая полуось, когда  $a = b$  эллипс превращается в окружность. Это дало статистику геометрии контура ямки в горизонтальной плоскости (рисунок 5).



а



б

Рисунок 5 – Пример распределения значений соотношений полуосей  $a/b$  поперечников ямок (а) и соотношения полуосей  $a/b$  и площади проекций ямок (б), сталь 15Х2НМФА

Величина соотношения  $a/b$  варьировалась в диапазоне  $2,16 \div 2,74$ , но не были исключением и большие их значения. С увеличением площади ямки ее форма приближалась к окружности.

### 3. Исследование морфологии вязких изломов

Для корректного сопоставления различных выборок значений параметров геометрии вязких изломов необходимо предварительно оценить характер их распределения (исходя из вклада неметаллических включений в вязкое разрушение и особенностей их распределения по размерам). С этой целью были построены гистограммы распределений значений диаметров, глубин ямок и толщин перемычек между ними. Количество разрядов гистограмм  $n$  определялся как  $n = \sqrt[3]{N}$ , где  $N$  – количество значений в выборке. Распределение ямок по их размерам имело ассиметричный вид (рисунок 6). Это затрудняет использование средних размеров для сопоставления различных выборок результатов измерения. В этой связи в работе на основе накопленной представительной статистики наблюдений геометрии элементов вязкого излома была проведена систематическая оценка вида их распределения (на основе применения непараметрического критерия Колмогорова-Смирнова) [3].

Принадлежность распределения к некоторой функции определяли по критерию  $\sqrt{nd}$  (где  $n$  - количество наблюдений,  $d$  – максимальная разность функций распределения). Было показано, что распределение размеров ямок ( $d$ ,  $h$ ) - логнормальное или гамма при уровне значимости  $\alpha=0,05$  (таблицы 4 и 5). Такой характер изменения геометрии ямок отражает доминирующую роль неметаллических включений в вязком разрушении [1,2].

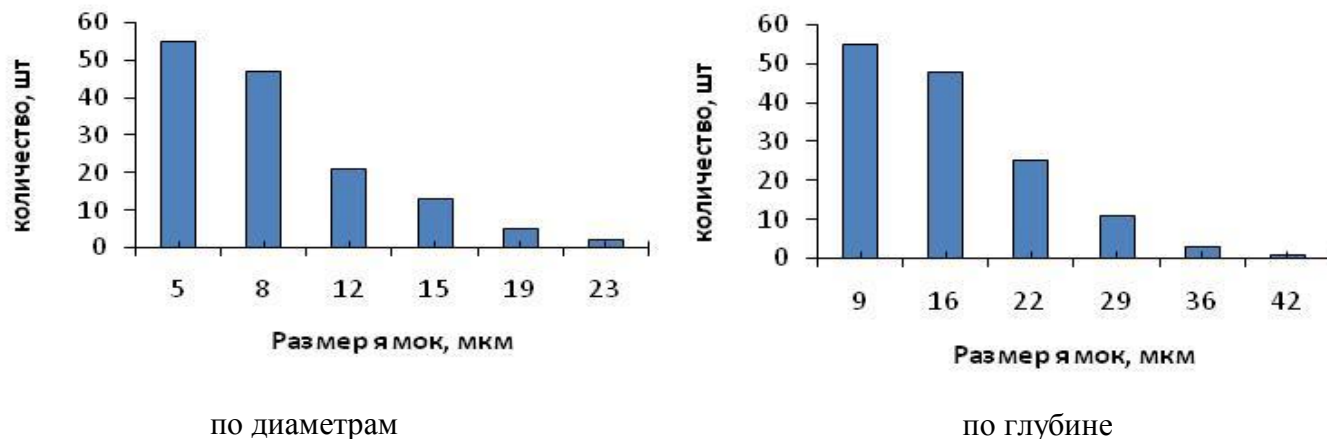


Рисунок 6 – Распределение размеров ямок в изломе Z-образца на растяжение, сталь 09Г2С

Таблица 4 – Значения критерия Колмогорова-Смирнова для проверки вида распределения значений диаметров ямок

Вид распределения	Сталь 15Х2НМФА			Сталь 38ХНЗМФА-Ш	Сталь 09Г2С			Сталь 40Х2Н2МА	Сталь 16Г2АФ
	Образец 2	Образец 3	Образец 4		(Z- обр.) на растяжение	Долевые образцы			
						на растяжение	на удар		
Нормальное	1,26	0,76	1,7	1,6	1,92	1,98	2,03	1,88	2,45
Экспоненциальное	2,01	1,92	2,56	2,64	2,85	1,87	1,9	1,69	3,42
Гамма	0,84	0,38	0,87	1	1,03	1,13	1,3	1,75	1,75
Логнормальное	0,96	0,36	0,85	0,68	0,8	1,14	1,23	1,24	1,34

Таблица 5 - Значения критериев Колмогорова-Смирнова для проверки вида распределения значений глубин ямок

Вид распределения	Сталь 15Х2НМФА			Сталь 38ХНЗМФА-Ш	Сталь 09Г2С			Сталь 40Х2Н2МА	Сталь 16Г2АФ
	Образец 2	Образец 3	Образец 4		(Z- обр.) на растяжение	Долевые образцы			
						На растяжение	На удар		
Нормальное	1,3	0,79	1,63	1,34	1,12	1,78	1,58	2,2	1,49
Экспоненциальное	1,06	1,97	0,92	3,15	2,94	1,69	1,46	1,95	3,43
Гамма	1,03	0,45	0,76	1,12	1,06	1,12	0,98	1,36	0,85
Логнормальное	0,93	0,6	0,63	0,97	0,91	1,3	0,92	0,97	0,99

Из полученных результатов следует, что для сравнения различных выборок результатов измерения геометрии строения изломов также предпочтительнее использование непараметрического критерия Колмогорова-Смирнова.

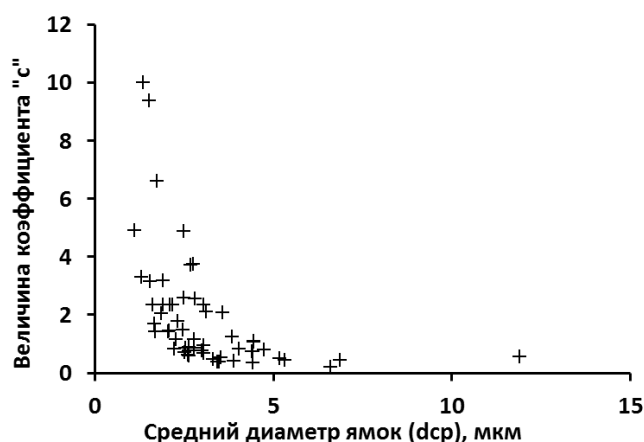


Рисунок 7 – Пример соотношения коэффициента параболы «с» и масштабов ямок, сталь 38ХНЗМФА-Ш

ударных образцов, так и для образцов на растяжение (долевых и Z-образцов) и, по-видимому, носит универсальный характер.

Анализ соотношения «глубина – диаметр ямок» выявил наличие связи между параметрами геометрии ямок, близкой к линейной (рисунок 8) - коэффициент корреляции в пределах 0,5-0,7. Отклонение от линейности определяется влиянием мезорельефа излома [1], когда ямки одного и того же диаметра в проекции на 2D-плоскость дают в зависимости от угла наклона его мезоступени излома различные значения поперечника. В работе было показано, что это выполняется для широкого сортамента металла, различных видов испытания и направлений вырезки образцов.

Прямое сопоставление результатов измерения диаметров одних и тех же ямок на 2D и 3D-изображениях, в частности, позволило оценить возможность использования измерений ямок на плоских снимках для грубой экспресс-оценки их геометрии (при обеспечении достаточной статистики измерений). При этом воспроизводимость результатов измерения на различных полях зрения одного излома, обеспечивалась, когда было измерено не менее 90...100 ямок на вариант.

Из массовых измерений профилей излома, получаемых из 3D-изображений рельефа следует, что ямки в простейшем (квадратичном) приближении представляют собой параболоид вращения  $y = c(x^2 + z^2)$ , «обрезанный сверху» плоскостью мезоступени излома, наклонённой под углом  $\alpha = \arctg (H/ B)$ , где H и B – высота и её ширина. С увеличением размера ямки коэффициент «с» в уравнении уменьшается (рисунок 7), ямки становятся более плоскими.

Такое вырождение ямок с увеличением их размеров наблюдалось для всех исследуемых сталей (во всех состояниях поставки), как для изломов

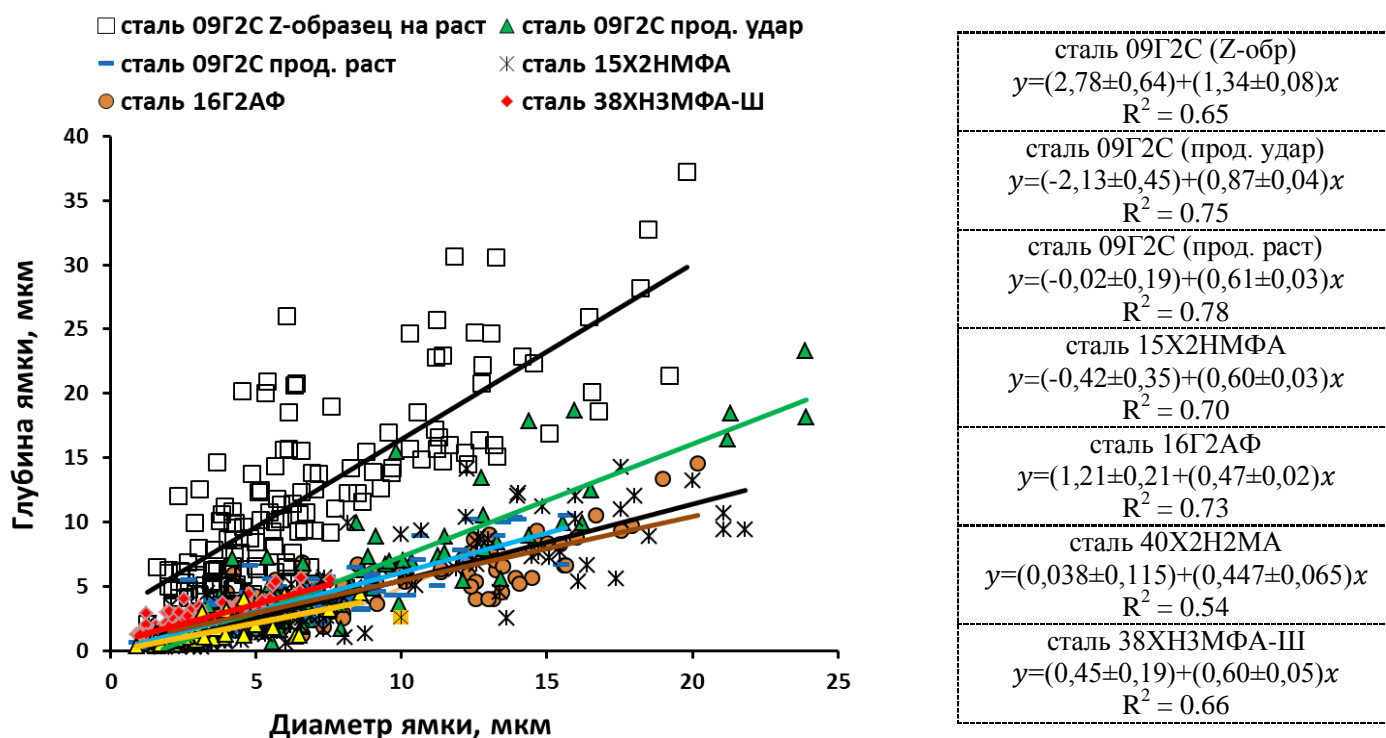


Рисунок 8 – Соотношение диаметра и глубины ямок в изломах исследуемых сталей

Очевидно, что на геометрии ямок может также сказаться неоднородность микроструктур. Так, например, в изломах Z-образцов на растяжение из листовой стали 09Г2С было обнаружено ступенчатое строение стенок ямок (рисунок 9). В изломах других образцов (в т.ч. продольных образцов на растяжение и удар из этой же стали) стенки ямок были относительно гладкими, их неровности имели случайный характер.

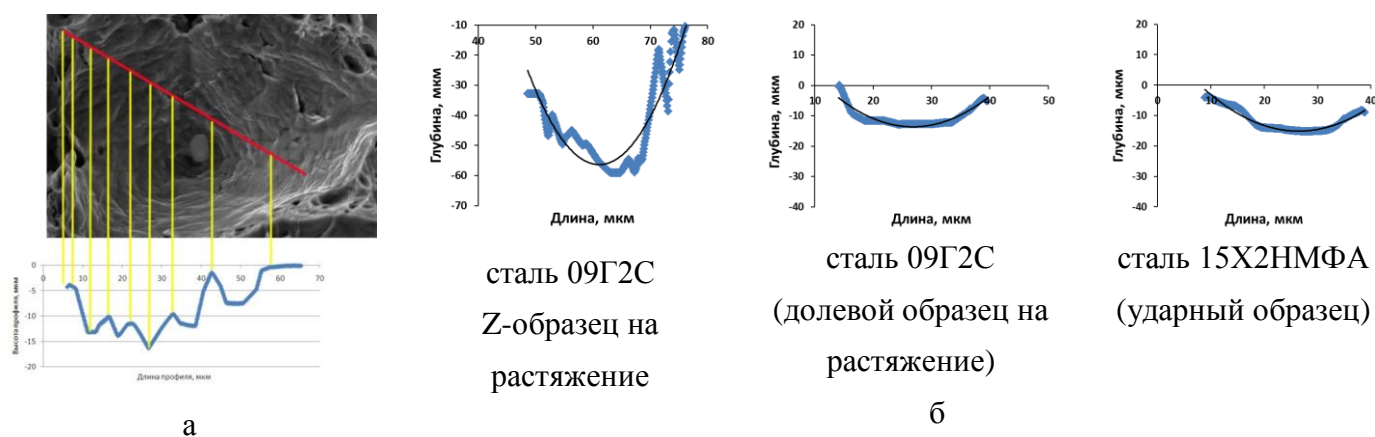


Рисунок 9 – Ступеньки на стенках ямок в изломе Z-образца из стали 09Г2С (а) и сравнение шероховатости сопоставимых по диаметрам ямок изломов сталей 15Х2НМФА, 09Г2С (б)

При локализации пластического течения в шейке Z-образцов наблюдалось изменение шага полосчатости феррито-перлитной структуры (рисунок 10). Изменение направления действия напряжений (для образца иной ориентации вырезки – совпадающей с направлением прокатки) дает другую последовательность протекания деформации и разрушения феррито-перлитной полосчатой

конфигурации структуры. Вследствие этого, при сопоставлении геометрии изломов образцов из сталей 09Г2С различных схем вырезки и нагружения (продольные ударные и образцы на растяжение и Z-образцы на растяжение), было отмечено, что соотношение глубин и диаметров ямок изменяется в диапазоне от  $0,60 \pm 0,05$  до  $1,34 \pm 0,08$ .

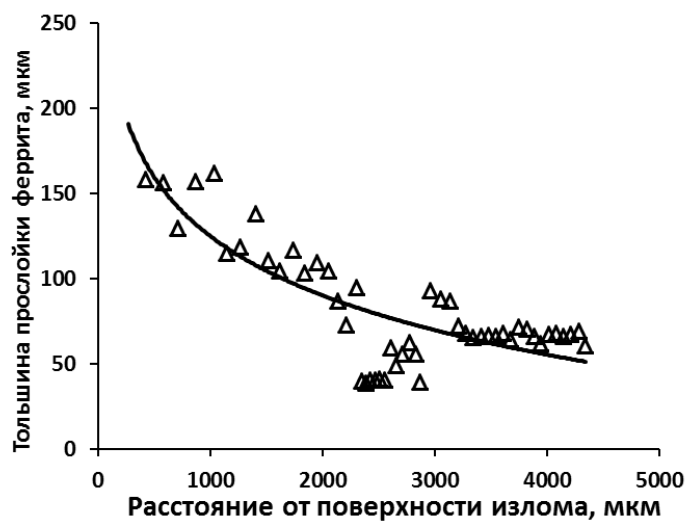
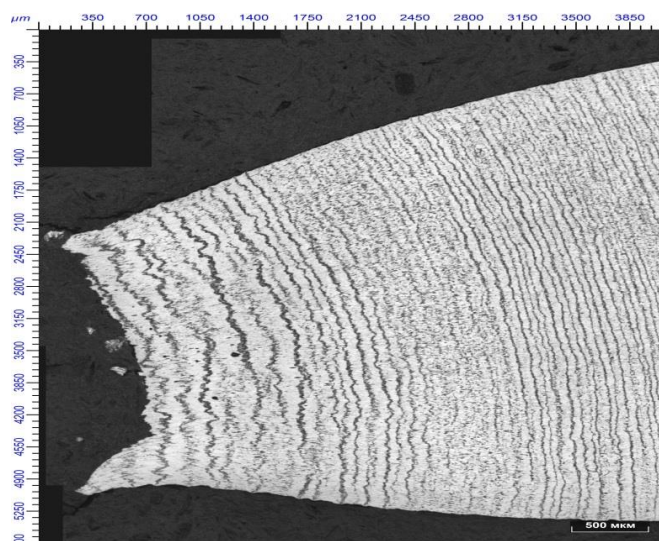


Рисунок 10 – Изменение шага ферритных прослоек в шейке Z-образца на растяжение (сталь 09Г2С с феррито-перлитной полосчатостью в структуре)

Это отражало особенности эволюции пор при повышении уровня напряжений. Расширение в шейке Z-образца ширины мягких ферритных прослоек (с 30...40 мкм до 100...170 мкм) при локализации пластического течения способствовало вытягиванию пор в направлении действия нормальных напряжений и увеличению глубины ямок. В долевых же образцах вследствие дробления хрупких полос перлита при деформации, смежные прослойки феррита объединяются, что делает предпочтительным вытягивание пор по толщине листа с образованием крупных неглубоких ямок поперечником от 8-10 мкм и более.

Изучение строения перемычек помогает понять особенности процесса образования и слияния пор (образования ямок). Многообразие перемычек можно свести к двум типам (рисунок 11), простой геометрии (вершина между двумя впадинами) – разрушение срезом или более сложной формы (с пологой вершиной и вторичными микроямками на плато) – разрушение мезоотрывом.



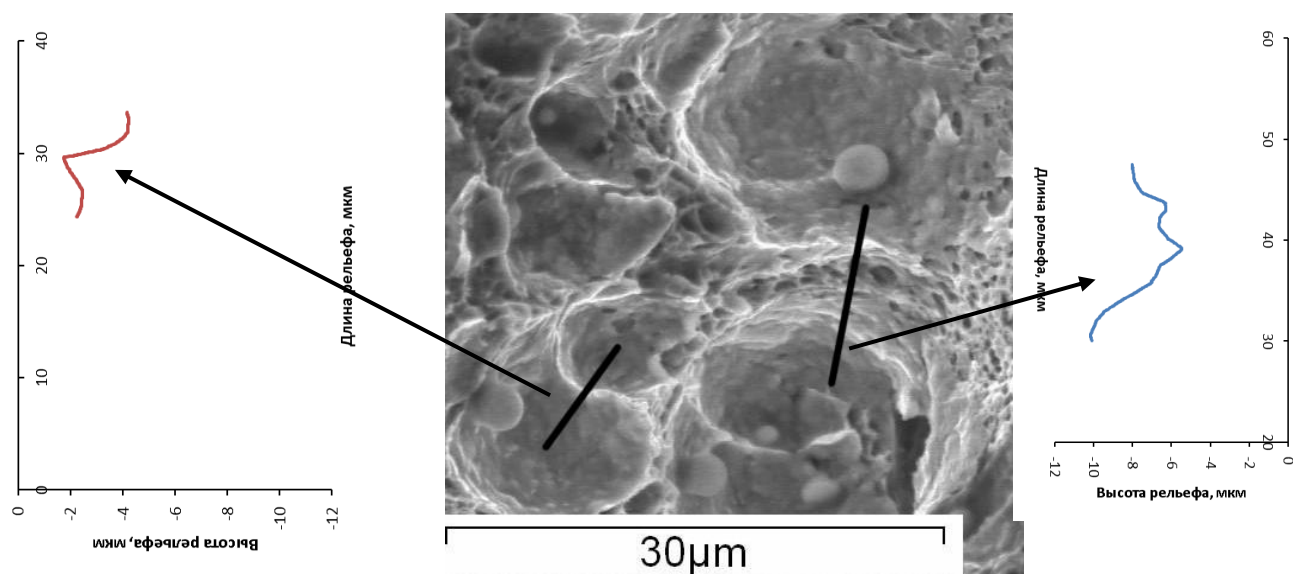
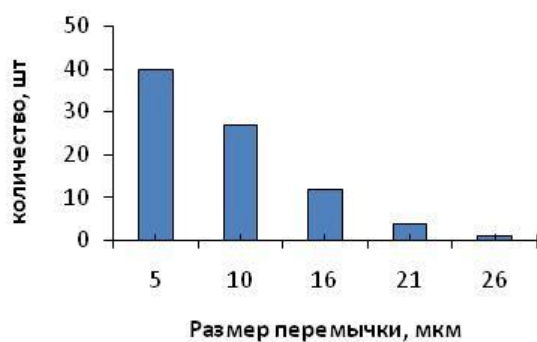
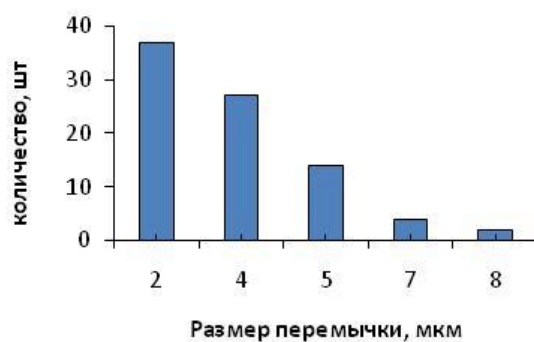


Рисунок 11 – Типичные перемычки между ямками и их профили (сталь 15Х2НМФА)

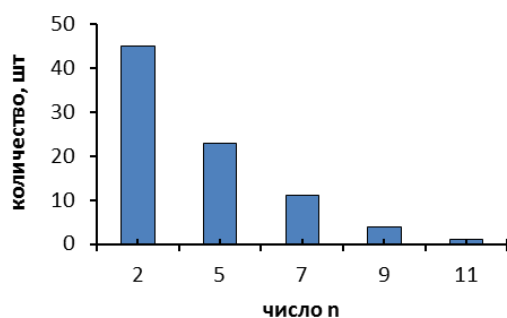
На результаты измерения геометрии перемычек, которая несет существенную информацию о механизмах слияния смежных пор, как одного из факторов, определяющих энергоемкость вязкого разрушения, распространяются такие же статистические подходы, как и при оценке геометрии других элементов вязкого излома. Показано, что в соответствии с критерием Колмогорова-Смирнова распределение толщин перемычек в изломах сталей 15Х2НМФА, 38ХН3МФА-Ш, 09Г2С и 16Г2АФ отвечает гамма функции, а их высот и количества мелких вторичных ямок – экспоненциальному закону (рисунок 12).



а



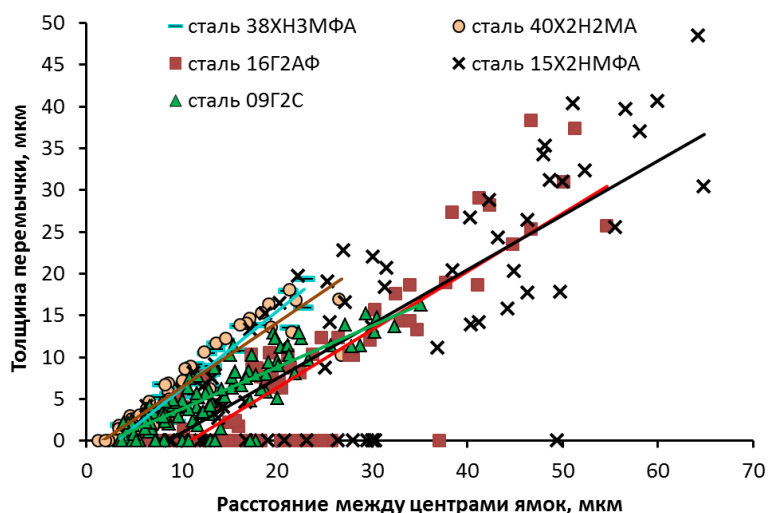
б



в

Рисунок 12 – Пример распределения значений размеров перемычек: по толщине ( $L_p$ ) – а; высоте ( $H_p$ ) – б; количеству вторичных ямок ( $n$ ) на ней – в, сталь 38ХН3МФА-Ш

Из 3D-изображений изломов всех исследуемых сталей следует, что количество вторичных ямок в перемычке может достигать 9-10 шт а толщина перемычки - 40-50 мкм. Толщина перемычки ( $L_p$ ) увеличивается с увеличением расстояния ( $L$ ) между центрами смежных ямок, образующих ее (рисунок 13). Их соотношение отражает пластичность и вязкость исследуемых сталей ( $R^2$  варьируется в диапазоне значений 0,70-0,89).



Сталь	Тангенс угла наклона
38ХНЗМФА-Ш	0,920±0,051
40Х2Н2МА	0,771±0,046
16Г2АФ	0,694±0,037
15Х2НМФА	0,650±0,060
09Г2С	0,435±0,031

Рисунок 13 - Соотношение толщин перемычек и расстояний между центрами ямок в изломах ударных образцов исследуемых сталей (и соответствующие значения тангенса наклона зависимостей)

Из анализа соотношения толщин перемычки и расстояний между центрами смежных ямок на изломах различных сталей следует, что уменьшению значения тангенса наклона зависимости соответствует повышение вязкости и пластичности. Их предельные значения, когда одному и тому же значению межцентрового расстояния отвечают различные значения толщины перемычек соответствуют сталям 38ХНЗМФА и 09Г2С.

#### 4. Оценка неоднородности размещения ямок на 2D-изображении излома

На вязкость стали (при прочих равных) должно влиять размещение ямок в изломе, в частности, наличие кучности («след» скоплений включений, инициировавших их образование). Неоднородность расположения ямок на плоскости определяли на основе построения полиэдров Вороного (рисунок 14). Это - метод пересечения серединных перпендикуляров: если центры всех объектов (в данном случае центры тяжести ямок) соединить отрезками и через середину каждого провести перпендикуляр, то около каждого объекта будет построен многоугольник, в котором все точки ближе к центру «своего» объекта, чем «чужого» [4].

На первом этапе процедуры осуществлялся перевод исходного 2D-изображения излома (в оттенках серого) в черно-белое (матрица вида «0-1»). Порог бинаризации варьировали от 1 до 255. Для оптимального выбора порога была построена зависимость суммарной площади темных объектов



(ямок) от суммы их периметров при изменении уровня бинаризации (рисунок 14, б). «Нос» S-образной кривой соответствовал оптимальный порог бинаризации.

Далее выделяли границы ямок и замыкали при необходимости их контуры (в 5-7 % случаев, когда на линии контура ямки были разрывы, протяженностью в несколько пикселей). При выделении контуров на изображении на белом фоне присутствовали черные объекты (шум), площадью от одного до 3...4 пикселей малые, по сравнению с исследуемыми объектами. Их удаляли с помощью специальных фильтров. Анализ геометрии профилей (из трехмерных цифровых моделей) при необходимости позволяет уточнить процедуру определения края ямки.

Из полученных изображений рельефа можно описать закономерности в расположении объектов, в частности, с использованием полиэдров Вороного. Разбиение изображения на полиэдры Вороного дает количественную информацию о размещении ямок в плоскости излома: площадь полиэдров, число соседей, расстояние между ближайшими объектами (полиэдрами), расстояние между смежными ямками).

Из двух хвостов гистограммы распределения величин отрезков  $L_{ij}$ , соединяющих центры смежных полиэдров Вороного  $i$  и  $j$ , можно оценить масштаб скученности и разреженности ямок, там, где будет облегчено вязкое разрушение и пластическое течение соответственно.

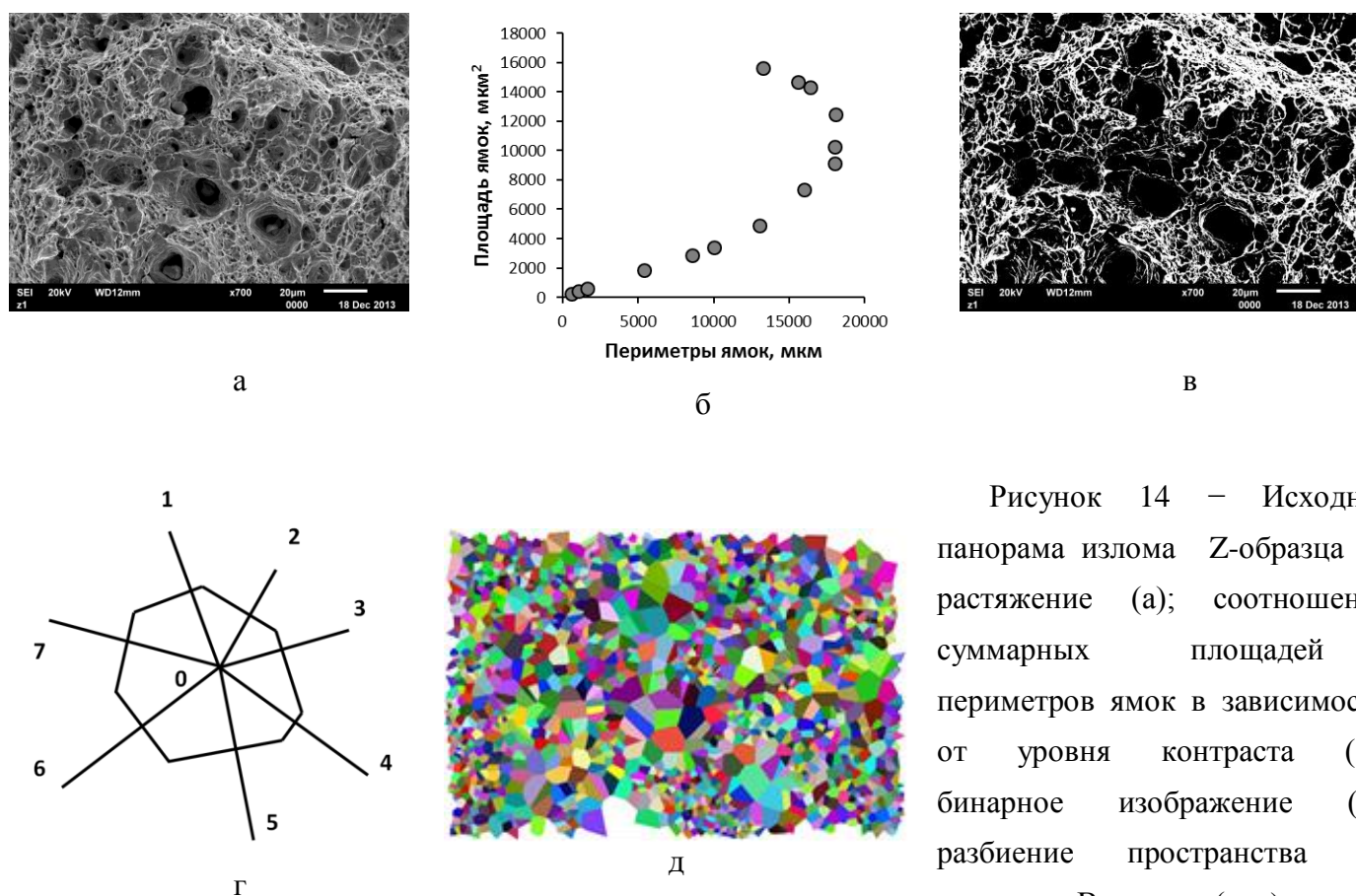
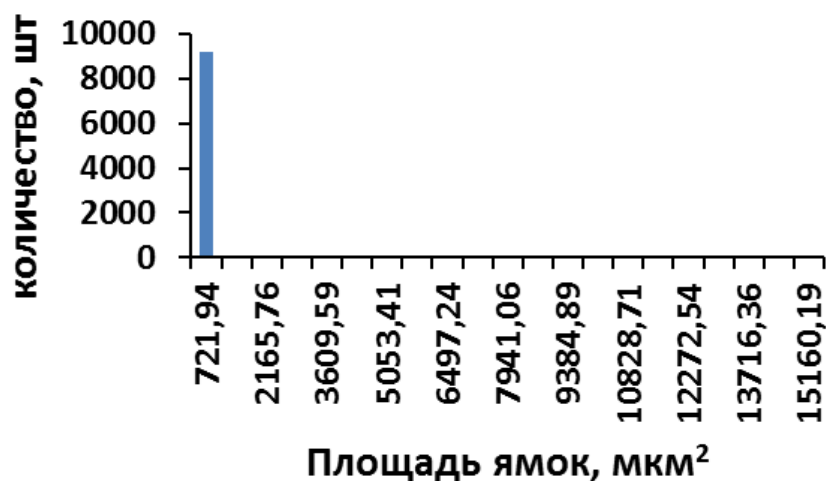
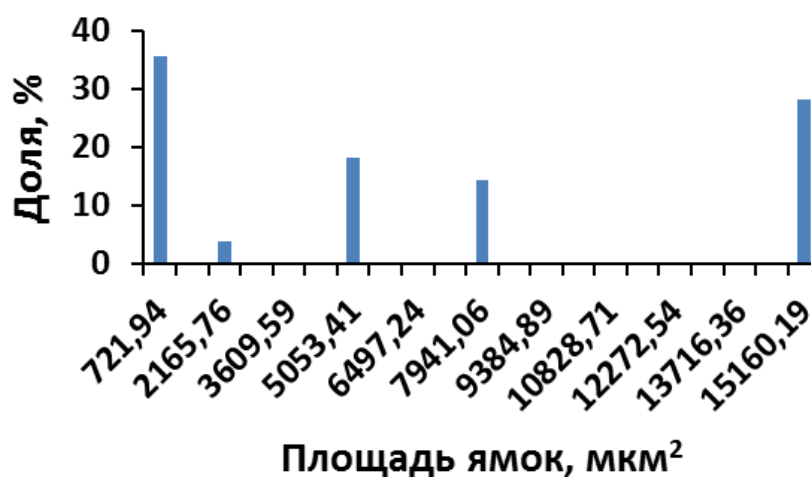


Рисунок 14 – Исходная панорама излома Z-образца на растяжение (а); соотношение суммарных площадей и периметров ямок в зависимости от уровня контраста (б); бинарное изображение (в), разбиение пространства на полиэдры Вороного (г, д), сталь 09Г2С

При выборе оптимального размера анализируемой панорамы вязкого излома учитывали и особенности распределения ямок по размерам. Классические гистограммы распределения ямок по их площадям (рисунок 15 а), не учитывают долю площади, занимаемой в изломе ямками каждого размерного диапазона, в связи с этим оценивали и этот фактор геометрии рельефа (рисунок 15 б).



а



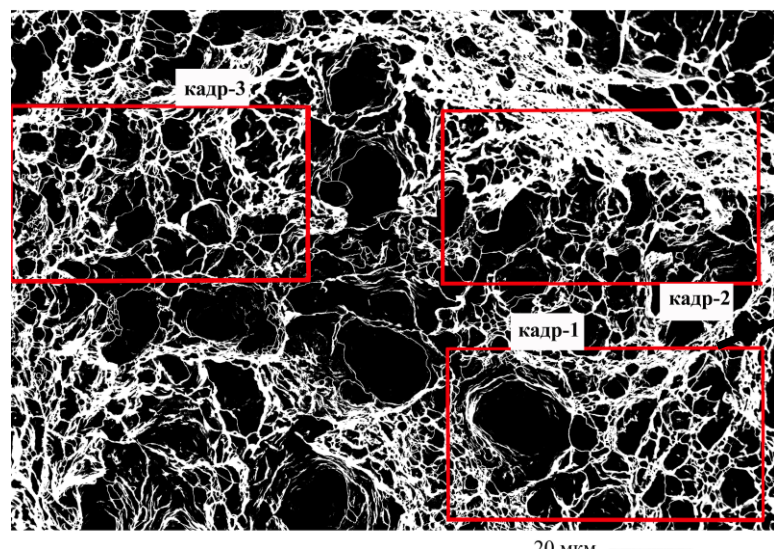
б

Рисунок 15 - Распределение ямок по площадям в зависимости от их количества (а) и доли площади, занимаемой ямками каждого размерного диапазона (б), излом ударного образца из стали 40Х2Н2МА

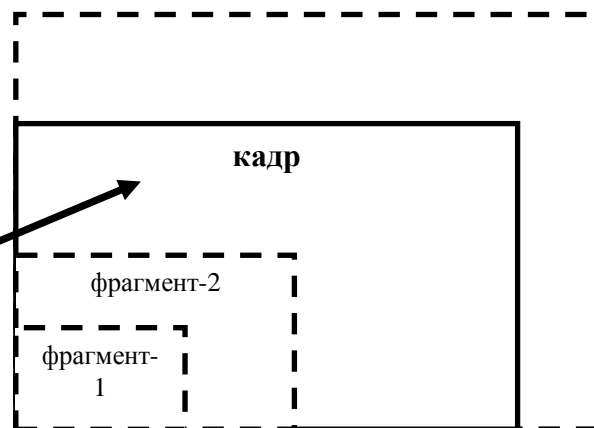
Было показано, что с увеличением поперечника ямки вероятность их появления становится меньше, однако они занимают значительную площадь и оказывают существенное влияние на развитие вязкой трещины по дну макрохрупкого квадрата, по сравнению с множеством мелких ямок. Это обстоятельство необходимо было учитывать для каждого вида излома при сопоставлении их вязкости и с целью обоснования минимально допустимой площади наблюдения, обеспечивающей воспроизводимость получаемых результатов.

Для получения минимального размера проводили также сопоставление характеристик геометрии излома, полученных с разных кадров, вырезанных из панорамы (в различных местах макрохрупкого

квадрата, различных образцов). «Нарезка» фрагментов изображения с последовательно увеличивающейся площадью давала представление об изменении его характеристик, сначала в пределах кадров (полей зрения, расположенных в различных местах панорамы), а далее, при последовательном увеличении площади - до полного размера панорамы (рисунок 16 а и б).

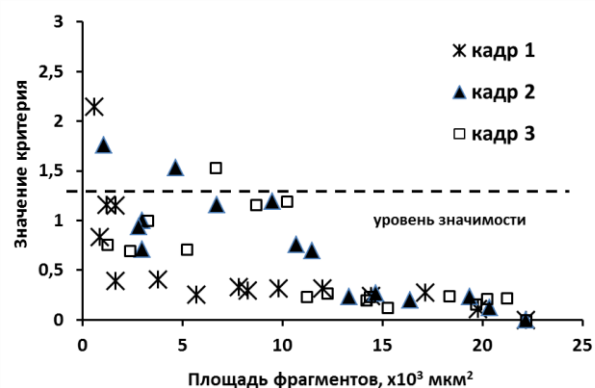


а)



б)

Рисунок 16 – Схемы вырезки кадров из панорамы излома (а) и последующего их деления на участки меньшей площади - фрагменты с целью определения статистики полиэдров Вороного на фрагментах переменной площади (вплоть до достижения полного размера панорамы) (б) - пример сопоставления гистограмм распределения значений площадей полиэдров в пределах таких фрагментов (для каждого из трех кадров) на основе критерия Колмогорова-Смирнова (в), сталь 09Г2С, Z-образец на растяжение



в)

Показано, что с увеличением анализируемой площади вероятность получения воспроизводимых результатов повышается (по критерию Колмогорова-Смирнова), например, для изломов Z-образцов (сталь 09Г2С) масштаб такого изображения должен быть не менее  $10 \times 10^3 \text{ мкм}^2$  (рисунок 16 в).

Как правило, чем больше размер кадра, тем больше строение его изображения отражает морфологию излома в целом. Показано, что воспроизводимость получаемых характеристик (площадь полиэдров и число соседей) обеспечивалась при построении полиэдров на изображениях площадью (в масштабах образца) от  $11-12 \times 10^3$  (сталь 09Г2С, продольный ударный образец,  $\times 800$  и Z-образец,  $\times 700$ ) до  $900-1000 \times 10^3 \text{ мкм}^2$  (сталь 15Х2НМФА,  $\times 130$ ).

Проверка вида распределения площадей полиэдров изломов всех образцов стали 09Г2С показала, что для изломов образцов на растяжение оно преимущественно логнормальное, для

ударных – может быть и экспоненциальным (таблица 6). Такие же закономерности наблюдались и для изломов других сталей.

Таблица 6 – Значения критериев Колмогорова-Смирнова и вид проверяемого распределения для площадей полиэдров (все образцы стали 09Г2С)

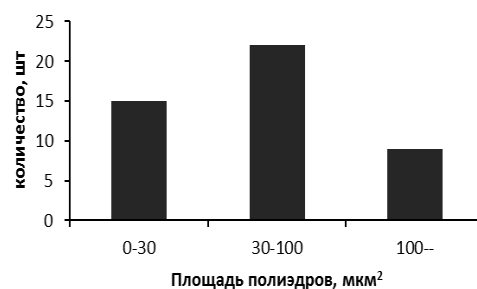
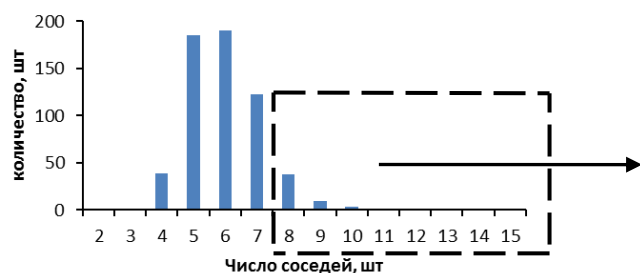
Образец	поле зрения	Значение критерия Колмогорова-Смирнова $\sqrt{nd}$				Результат проверки
		Нормальное	Экспоненциальное	Логнормальное	Гамма	
Z-образец на растяжение	1	6,179	6,438	0,888	2,664	логнормальное, гамма
	2	6,674	6,252	1,151	3,107	
	3	5,107	1,800	0,438	0,876	
	4	1,89	2,93	0,66	1,29	
Продольный образец на растяжение	1	2,400	1,660	0,434	1,404	логнормальное гамма
	2	3,469	1,498	0,324	1,048	
Ударный образец	1	2,12	0,50	0,21	0,72	логнормальное, гамма, экспоненциальное
	2	4,06	1,51	0,64	1,65	

Это означает, что для сопоставления результатов разбиения изображений на полиэдры Вороного и последующего их анализа также целесообразно использование непараметрической статистики (критерия Колмогорова-Смирнова).

## 5. Совместное влияние различных факторов на образование вязкого излома.

Накопленная статистика измерений геометрии рельефа поверхности разрушения средствами 2D и 3D размерности была использована при сопоставлении вязкости сталей с различной структурой (сорбит отпуска в сорте, феррито-перлитная полосчатость в листе, дальние последствия сохранившейся дендритной структуры в крупных поковках), для различных схем испытания (растяжение, удар) и вырезки образцов (долевые, тангенциальные и Z-образцы). С учетом полученного типа распределения значений геометрических параметров рельефа сопоставление различных выборок проводили с использованием критерия Колмогорова-Смирнова.

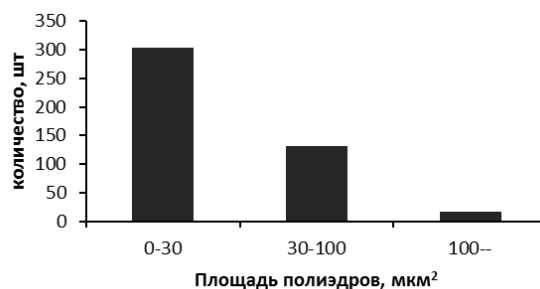
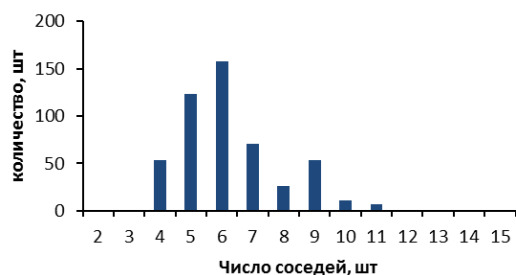
Показано, что колебания ударной вязкости (в связи с различным состоянием поставки и, как следствие, структур) при качественно однотипном ямочном механизме разрушения (идентифицируемом визуально) определяется рядом различий в строении изломов. Для сталей с различной ударной вязкостью наблюдается разница в величине коэффициента асимметрии в эмпирических распределениях числа соседей ямок, определяемых на основе разбиения пространства на полиэдры Вороного, когда большему числу соседей соответствуют ямки большего масштаба (рисунок 17).



а) сталь 09Г2С, продольный ударный образец

(Коэффициент асимметрии 0,97)

в «хвосте» распределения

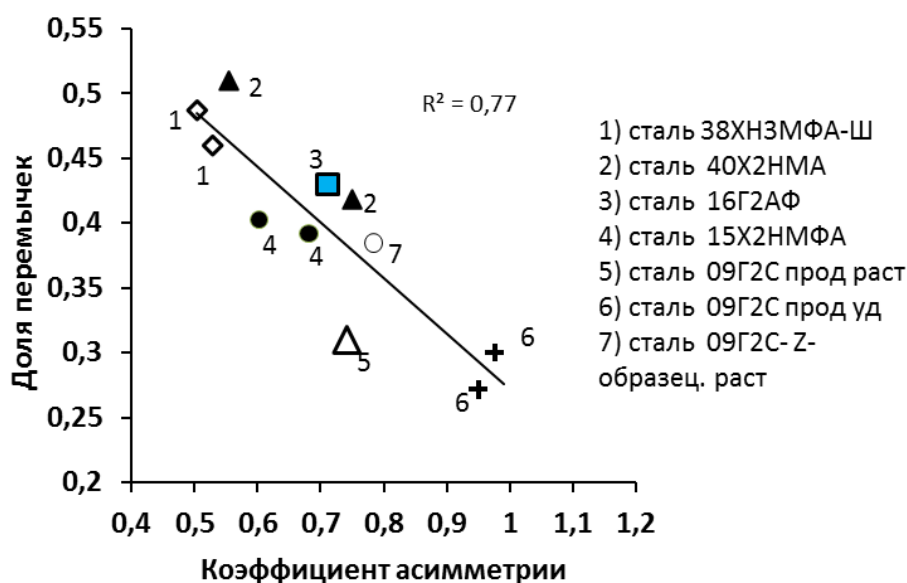


б) сталь 38ХНЗМФА-Ш

(Коэффициент асимметрии 0,53)

общее

в)



д)

Рисунок 17 – Асимметричность распределений числа соседей ямок для сталей с различным уровнем ударной вязкости (а, б), соотношение крупных ямок на «хвосте» одного из них (в) и связь коэффициента асимметричности с общей долей перемычек для аналогичных распределений всех исследуемых сталей (д)

Следует отметить, что для образцов с различной ударной вязкостью в целом характерно несовпадение эмпирических распределений результатов измерения параметров геометрии вязкого излома (диаметр и глубина ямок, толщина перемычки между смежными ямками).

Этому сопутствует изменение доли перемычек, разрушающихся по механизму мезоотрыва  $v_{mo}$  (в сопоставлении с их разрушением срезом  $v_{ср}$ ):  $v_{mo}/v_{ср}$  от 0,65 до 1,9. Уменьшению толщины перемычки между смежными ямками сопутствует увеличение вязкости и пластичности (относительное сужение  $\Psi$ ), в следующей последовательности: от сталей 38ХНЗМФА-Ш и 40Х2Н2МА к сталям 09Г2С (продольные образцы на удар и растяжение). Разрушение перемычек между смежными ямками, когда вязкость максимальна, происходит по линии действия касательных напряжений (разрушение срезом), перемычка разрушается мезоотрывом (протяженностью до 40-50 мкм) с образованием ямок микронного размера (до 5 – 10 штук). Различие в величине относительного сужения сталей, по-видимому, определяет вклад микропластической деформации, предшествующей слиянию смежных пор, в формирование уровня работы распространения трещины по дну макрорупного квадрата.

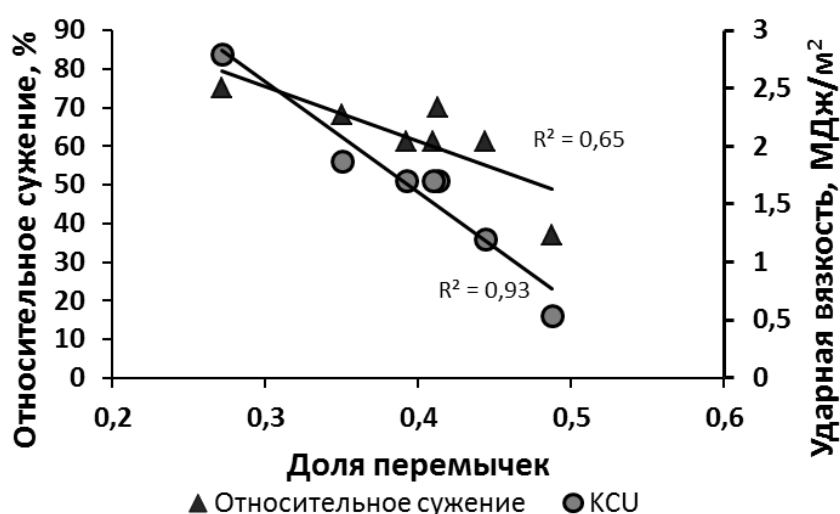


Рисунок 17 - Соотношение значений ударной вязкости, пластичности и доли перемычек между смежными ямками в вязких изломах

Таким образом, результаты работы свидетельствуют об информативности измерения геометрии вязких изломов для описания причин различий вязкости конструкционных сталей. Очевидно, что при накоплении достаточной статистики наблюдений в их измерение можно ввести количественные меры и стандартизировать их.

### Основные выводы

1. Из массовых измерений 2D и 3D геометрии вязких изломов сталей с различными типами структур (сорбит отпуска, феррит-перлитная полосчатость, остатки дендритной структуры), схем испытания (на удар и статическое растяжение, при вырезке образцов вдоль и поперек направления прокатки, тангенциально в поковке), выделены параметры рельефа, позволяющие выявить различия в уровне вязкости металла (глубина и диаметр ямки, толщина перемычки между смежными ямками). Для оценки неоднородности размещения ямок в изломе использована статистика полиэдров Вороного (распределение полиэдров по площадям, числу соседей и расстоянию между ямками);

2. Для компьютеризированных процедур измерения морфологии изломов определен минимальный масштаб наблюдения и уровень разрешения, обеспечивающие воспроизводимость результатов.

3. Сопоставление статистики распределения ямок по размерам и числу их соседей (по разбиению 2D-кадра на полиэдры Вороного) показало, что увеличение числа соседей большего размера в интервале 8...25 мкм и уменьшение толщины перемычек между смежными ямками сопутствует росту ударной вязкости и пластичности в 5 и 2 раз соответственно.

4. Колебания ударной вязкости при качественно одностипных ямочных изломах сопровождаются следующими различиями в его геометрии:

- Изменениями диаметра и глубины ямок и толщины перемычки между смежными ямками;
- Уменьшению доли перемычек, разрушающихся по механизму мезоотрыва (в сопоставлении со срезом) соответствует повышение ударной вязкости;

5. При феррито-перлитной полосчатости (лист из стали 09Г2С) различие пластичности феррита и перлита проявляется в ступенчатом профиле стенки крупных ямок изломов Z-образцов и увеличении величины соотношения между глубиной и диаметром ямок в 1,5 раза (по сравнению с долевыми образцами).

#### **Список используемой литературы**

1. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Арсенкин А.М. // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 1. С. 38-44.
2. Штремель М.А. Разрушение. В 2 кн. Кн. 1. Разрушение материала : моногр. –М.: Изд. Дом МИСиС, 2014.–670 с.
3. Никитин Я.Ю. Асимптотическая эффективность непараметрических критериев. М.: Физматлит, 1995. – 240 с.
4. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. 2. Деформация. М.: Металлургия. - 1997. - с.527.

#### **Публикации по диссертационной работе:**

1. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Траченко В.А., Ле Хай Нинь, Скородумов С.В., Папина К.Б. Измерение неоднородности разрушения в конструкционных сталях с разнородной структурой // МиТОМ. 2015. № 4. С. 12-18.
2. Соколовская Э.А., Ле Хай Нинь, Кудря А.В, Арсенкин А.М., Скородумов С.В., Траченко В.А., Сидорова Н.И. Возможности 3D-реконструкции рельефа вязких изломов средствами стереофотограмметрии для углубления представлений о механизме разрушения // "Вектор науки ТГУ".–2013.–№ 3.–с.267-269.
3. Кудря А. В, Соколовская Э. А., Скородумов С.В., Траченко В.А., Папина К.Б., Ле Хай Нинь. Развитие процедур измерения неоднородности структур и разрушения (по геометрии излома) для классификации сталей по вязкости // "Вектор науки ТГУ".–2013.–№ 3.–с.198 -201.
4. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Arsenkin A.M., Le Hai Ninh, Trachenko V.A. Elaboration of ductile fracture model of steels on the basis of measurement of fracture surface topography // Proceedings of



Thirteenth International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics, Jacksonville, FL, USA, November 13-15 2013.

5. Соколовская Э.А., Кудря А.В., Ле Хай Нинь, Траченко В.А., Сидорова Н.И., Бокарева Е.Н. Оценка закономерностей строения 3D-рельефа вязких изломов улучшаемых сталей // Сборник трудов VI-ой Евразийской научно-практической конференции "Прочность неоднородных структур" (ПРОСТ 2012), 17-19 апреля 2012 г.–М.: Издательство "Альянс Пресс", 2012.–С. 167.

6. Скородумов С.В., Папина К.Б., Траченко В.А., Ле Хай Нинь, Федоров М.И. Перспективы измерения морфологии изломов для сопоставления по вязкости материалов с разнородной структурой. В сб. научных трудов XIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара молодых ученых металлургов. Екатеринбург, 12 -16 ноября 2012 г. с.98-100.

7. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Кузько Е.И., Скородумов С.В., Траченко В.А., Папина К.Б., Ле Хай Нинь. Развитие методов оценки неоднородности вязкости в сталях с разнородной структурой. В сб. материалов 53-й Международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности». УО «ВГТУ», ч.2. Витебск. 2012 г., с. 163-165.

8. Соколовская Э.А., Кудря А.В., Ле Хай Нинь, Траченко В.А., Сидорова Н.И., Бокарева Е.С. В сб. трудов конференции «Прочность неоднородных структур», М. НИТУ «МИСиС».2012. с. 167.

9. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Траченко В.А., Папина К.Б., Ле Хай Нинь. Совершенствование процедур измерения неоднородности структур и разрушения (по геометрии излома) для классификации сталей по вязкости // Физическое материаловедение: VI Международная школа с элементами научной школы для молодежи (Тольятти, 30 сентября - 5 октября 2013 года) : сб. материалов / отв. ред. А.А. Викарчук, Д.Л. Мерсон.–Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013.–С. 23-24.

10.Соколовская Э.А., Кудря, А.В., Ле Хай Нинь, Сидорова Н.И. 3D-реконструкция рельефа вязких изломов средствами стереофотограмметрии для углубления представлений о механизме вязкого разрушения // Физическое материаловедение: VI Международная школа с элементами научной школы для молодежи (Тольятти, 30 сентября - 5 октября 2013 года): сб. материалов / отв. ред. А.А. Викарчук, Д.Л. Мерсон.–Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013.–С. 24-25.

11.Соколовская Э.А., Ле Хай Нинь, Кудря А.В., Траченко В.А., Сидорова Н.И., Бокарева Е.С., Нго Нгок Ха. Изучение закономерностей строения рельефа вязких изломов конструкционных сталей средствами стереофотограмметрии // Сборник трудов VII-ой Евразийской научно-практической конференции "Прочность неоднородных структур" (ПРОСТ 2014), 22-24 апреля 2014 г.–М.: ПОЧЕРК МАСТЕРА, 2014.–С. 141.

12.Кудря А.В., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Траченко В.А., Папина К.Б., Ле Хай Нинь, Глазкова Ю.А., Чинь Хыу Чыонг. Измерения неоднородных структур в листовых сталях для определения причин разброса вязкости // Сборник трудов VII-ой Евразийской научно-практической конференции "Прочность неоднородных структур" (ПРОСТ 2014), 22-24 апреля 2014 г.–М.: ПОЧЕРК МАСТЕРА, 2014.–С. 188.