

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»”

На правах рукописи

АРСЕНКИН АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

**ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ ВЯЗКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
СТАЛЕЙ ПО ИЗМЕРЕНИЮ СТРОЕНИЯ ИЗЛОМОВ СРЕДСТВАМИ  
РАЗЛИЧНОЙ РАЗМЕРНОСТИ**

Специальность 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва, 2009

**Работа выполнена на кафедре металловедения и физики прочности  
НИТУ «МИСиС»**

**Научный руководитель:**

Профессор, д.т.н. Кудря А.В.

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук Горицкий В.М. (ЗАО “ЦНИИПСК” им. Мельникова)

Кандидат технических наук Маркелов В.А. (ВНИИНМ им. А.А. Бочвара)

**Ведущая организация:**

Институт металловедения и физики металлов им. Г.В. Курдюмова  
Государственного научного центра РФ ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина

**Защита диссертации состоится** «17» декабря 2009 года в 15<sup>30</sup> на заседании  
Диссертационного совета № 212.132.08 при НИТУ «МИСиС».  
119049, Москва, Ленинский проспект, д.4, ауд. Б-436

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке** НИТУ «МИСиС»

**Автореферат разослан** «16» ноября 2009 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
проф., д.ф.-м.н.



С.И. Мухин

## Введение

В связи с развитием техники и повышением уровня интенсивности её эксплуатации по-прежнему актуальна проблема создания материалов обладающих высокой прочностью и вязкостью. Исследование механизмов разрушения конструкционных материалов и факторов, определяющих его развитие, является ключевой задачей при разработке новых материалов и технологий их получения. Это принципиально важно и при оптимизации технологии производства для повышения качества уже существующих материалов.

Практически все конструкционные материалы неоднородны (в зависимости от масштаба измерения) по структуре, химическому составу. В связи с этим необходимо знать степень влияния неоднородности на сопротивление разрушению материала.

Как известно, одним из основных методов исследования разрушения конструкционных материалов является фрактография. Однако пока качественная фрактография используется чаще. Это связано с трудоемкостью, а иногда и с невозможностью измерения параметров геометрии излома, особенно z-координат рельефа (на всех масштабных уровнях).

Бесконтактная профилометрия позволила производить измерения мезорельефа излома, а рост вычислительных мощностей (с помощью специальных компьютерных программ) – получить 3D-изображение микрорельефа излома.

Для реконструкции трехмерной картины излома обычно применяется синтез 3D-картины из нескольких 2D-изображений (стереофотограмметрия), полученных в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Это позволяет получить более полные знания о механизмах разрушения конструкционных материалов. Однако отсутствие системных исследований в данном направлении затрудняет понимание механизмов разрушения разнообразных

структур, оценку степени их опасности и, как следствие, разработку новых материалов и технологий их получения.

### **Цель исследования**

- Оценить границы применимости двумерных и трехмерных (2D и 3D) изображений излома для описания микрорельефа вязкого разрушения, эффективность используемых информативных параметров.
- Изучить механизм разрушения конструкционных сталей по зернограницным кластерам неметаллических включений.

### **Научная новизна**

- Установлены ограничения средств различной размерности для измерения геометрии вязких изломов.
- На основе прямых, массовых измерений морфологии ямок вязкого излома обнаружено нарушение принципа геометрического подобия их формы с увеличением масштабов ямок.
- Обоснованы условия получения воспроизводимых значений фрактальной размерности. Из измерения профилей изломов различной природы с шагом от 0,46 до 58,9 мкм для оценки значений фрактальной размерности установлено, что они с достоверностью 0,99 значимо не отличаются от размерности гладкой поверхности.
- На основе сопоставления 3D-изображений микрорельефа вязкой межзеренной фасетки камневидного излома и масштаба пластической невязки ответных его половин реконструирован сценарий разрушения по кластерам зернограницных частиц – от центра кластера к его периферии с последовательным увеличением степени участия пластической деформации в разрушении и оценен уровень энергоёмкости для зернограницных кластеров включений различной морфологии.

## **Практическая ценность**

Развитая методика измерения 3D - микрогеометрии рельефа вязких изломов использована при оценке неоднородности вязкости конструкционных сталей, для диагностики разрушения при эксплуатации деталей и конструкций.

## **Апробация работы**

Результаты проведенных исследований были доложены на научной сессии МИФИ. Москва. 2005 г.; на II, III и IV Евразийской конференции "Прочность неоднородных структур". Москва. 2004, 2006, 2008 гг.; на II, III и IV конференции молодых специалистов. Москва. ИМЕТ РАН. 2005, 2006, 2007 гг.; на 47-й и 48-й Международной конференции "Актуальные проблемы прочности". Н.Новгород. 2008 г. и Тольятти. 2009 г.; на IV – международной школе «Физическое материаловедение». Тольятти. 2009 г.

## **Структура и объем диссертации**

Материал диссертации изложен на 109 стр., содержит 60 рисунков, 5 таблиц, библиография 83 названия.

## **Краткое содержание диссертации**

### **1. Аналитический обзор литературы**

Проанализированы различные подходы к способу классификации видов разрушения, приведены примеры классификации разрушения по различным признакам. Подробно рассмотрены вязкое и хрупкое разрушение с учетом их микромеханизмов. Значительная часть литературного обзора посвящена вязкому зернограницному разрушению (камневидный излом), обсуждены причины, ведущие к его появлению в конструкционных сталях.

Сопоставлены методы исследования разрушения, особое внимание уделено фрактографическим методам в связи с тем, что вследствие быстроты

процесса разрушения его конечный результат – излом является во многих случаях единственным источником информации о механизмах разрушения.

## 2. Материал и методика исследования

### 2.1 Материал

В качестве объекта исследования были использованы изломы ударных образцов Менаже сталей 16Г2АФ, 40Х2Н2МА и 38ХН3МФА-Ш и Шарпи - 15Х2НМФА, стандартного (ГОСТ 4543) состава (определенного на спектрометре тлеющего разряда SA-2000 фирмы LECO) (табл.1), полученные по принятой технологии (табл.2) и испытанные при комнатной температуре (ГОСТ 9454) на маятниковом копре Roell Amsler RKP-450.

Таблица 1. Химический состав исследованных сталей

<b>%, масс.</b>	<b>С</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>	<b>Cr</b>	<b>V</b>	<b>Mo</b>
16Г2АФ	0,17	0,40	1,50	0,10	0,015	0,010	0,10	0,20	0,09	-
15Х2НМФА	0,17	0,29	0,47	1,34	0,009	0,014	0,05	2,24	0,09	0,51
40Х2Н2МА	0,38	0,26	0,46	1,73	0,012	0,003	0,02	1,48	-	0,24
38ХН3МФА -Ш	0,37	0,31	0,25	3,00	0,011	0,002	0,11	1,20	0,12	0,44

Таблица 2. Режимы обработки исследуемых сталей

<b>Марка стали</b>	<b>Сортамент</b>	<b>Режим термической обработки</b>
16Г2АФ	лист	Тзак =890-910°С, Тотп=640 °С
15Х2НМФА	поковка	Т=920 <sup>0</sup> С, вода +620 <sup>0</sup> С, 25ч.+ 650 <sup>0</sup> С, 20 ч.

Продолжение таблицы 2

Марка стали	Сортамент	Режим термической обработки
40X2H2MA	сорт	T <sub>зак</sub> =850 °С; T <sub>отп</sub> =570 °С, 1 ч.
38XH3MФА-Ш	поковка	T <sub>зак</sub> =850-870°С, и отпуск при 520°С, 3,5 ч.+540°С, 6ч.

## 2.2 Анализ структуры

Макроструктуру сталей и зёрна аустенита выявляли с помощью глубокого и обычного травления в 50 % р-ре HCl и в теплом пересыщенном водном растворе пикриновой кислоты с добавлением поверхностно-активного вещества (ПАВ) (моющее средство "FAIRY") соответственно, микроструктуру – в 3%-спиртовом растворе азотной кислоты.

Размер зерна аустенита определяли на оптическом микроскопе OLYMPUS PME-3 при увеличении  $\times 100$  методом хорд по 250-300 измерениям с использованием программы анализа изображения Image Expert Pro 3.

## 2.3 Фрактографический анализ

Анализ изломов на дне макрорупкого квадрата ударных образцов, проводился с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) HITACHI S-800 при увеличениях  $\times 200$  -  $\times 2000$ . Изображения были получены в цифровом виде с разрешением 1024x894 пикселей при помощи программного модуля INCA, поставляемого в комплекте с энергодисперсионным микроанализатором INCA x-act. Исследуемые изломы были вязкими, хрупкими и смешанными, для стали 38XH3MФА-Ш наблюдали смешанный излом, где было от 50 до 80% камневидной составляющей (на фоне вязкого излома).

3D-геометрию изломов реконструировали из стереопар, полученных в СЭМ методом наклона образца на угол  $6^\circ$ , реализованном в программном продукте PHOTOMOD Lite.

Выбор угла конвергенции был обусловлен тем, что при малых углах ( $5^\circ$  -  $15^\circ$ ) не происходит экранирования одних элементов излома другими [1]. Получение, составляющих стереопару, проводилась при следующих параметрах СЭМ, которые поддерживались постоянными: ускоряющее напряжение 20 кВ, рабочее расстояние 15 мм. Не допускалась расфокусировка изображений и контролировалась их однородность по контрастности и яркости [2]. Величина фокусного расстояния при съёмке в СЭМ определялась как произведение увеличения и рабочего расстояния [3].

При реконструкции трехмерных изображений по стереопарам микроскопических объектов для получения абсолютных значений геометрических параметров объектов по z-координате использовали тест – объект (предмет с известными геометрическими параметрами). В качестве тест – объекта применялись гранулы порошка интерметаллида NiAl размером 10-25 мкм и естественные тест - объекты - включения сульфидов глобулярной формы размером 5-7 мкм, расположенные в ямках вязкого излома.

Предварительно была проведена проверка правильности реконструкции стереоизображений с тест – объектом. Для этой цели тест – объект (металлические гранулы размером около 200 мкм) был помещен на шлиф с нанесенными отпечатками индентора при измерении микротвердости, глубина которых была рассчитана из прямоугольного треугольника с известным углом при вершине (половина угла при вершине индентора - алмазной четырехгранной пирамиды) и катетом (половина длины диагонали). Съёмка стереопары отпечатков с тест – объектом проводилась при параметрах съёмки, указанных выше.



Было получено, что отклонение глубины отпечатка, полученного из 3D-изображения, от расчётной длины составляло не более чем 20%. Такая погрешность может быть связана с особенностями геометрии тест – объекта.

В стали 38ХНЗМФА-Ш была изучена поверхность вязкого излома площадью более 3 мм<sup>2</sup> и исследовано 10 зернограницных фасеток, размеры которых варьировались в диапазоне 300-1000 мкм, общей площадью более 4 мм<sup>2</sup> (в масштабе образца).

С целью декорирования переднего фронта трещины ударный образец был частично разрушен на маятниковом копре МК-30 при комнатной температуре испытания и угле подъема маятника 15°. Далее образец был охлаждён в жидком азоте и окончательно разрушен (по хрупкому механизму) на копре при угле подъема маятника 150°.

#### 2.4 Измерение фрактальной размерности поверхности разрушения

В работе была оценена информативность фрактальной размерности поверхности изломов для ранжировки вязкого, хрупкого, камневидного и смешанного изломов. Фрактальную размерность (ФР), определяли по методу вертикальных сечений [4]. При этом ФР поверхности принималась равной  $D+1$ , где  $D$  – фрактальная размерность профиля.

ФР профиля измерялась по методу Ричардсона как тангенс угла наклона линейной зависимости  $\ln(L) = f(\ln(e))$ , где  $L$  и  $e$  – длина профиля и шаг измерения, соответственно. Шаг измерения варьировался в пределах от 0,46 до 58,9 мкм.

#### 2.5 Измерение критического раскрытия трещины по методу сопоставления ответных половинок излома

Для реконструкции сценария разрушения стали, в структуре которой присутствуют зернограницные скопления неметаллических включений (НВ), был применен метод стыковки двух ответных половинок излома (рис. 1).

Графическое построение профилей и их совмещение проводилось в программе Origin Pro.

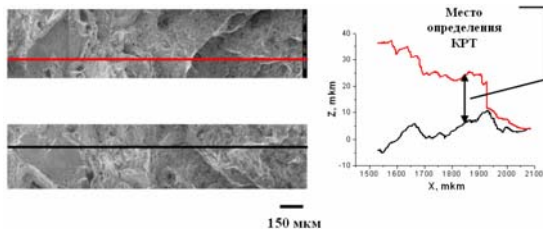


Рис. 1. Схема стыковки профилей ответных половинок излома с целью определения пластической невязки

Было оценено локальное раскрытие трещины на зернограницных фасетках и дефектах их строения (плена, плотное скопление и кратерообразное скопление субмикронных и микронных включений).

### 3. Результаты и их обсуждение

#### 3.1 Макро- и микроструктура сталей

Глубокое травление стали 38ХНЗМФА-Ш выявило дендритную структуру, обусловленную ликвацией. Ветви дендритов были равноосными. Различалась микротвердость областей дендрита:  $438 \pm 10$  HV в оси дендрита и  $491 \pm 16$  HV в межосевых участках. Размер зерна аустенита составил более 15-20 мкм.

Микроструктура стали 40Х2Н2МА представляла собой сорбит отпуска, средний размер зерна аустенита – около 14 мкм.

Сталь 15Х2НМФА отличалась более грубым строением макро- и микроструктуры (грубые дендриты) и большим (и неоднородным) размером зерна аустенита от 30 до 70 мкм.

В стали 16Г2АФ были обнаружены [5] дальние последствия ликвации – ориентация неметаллических включений (по серному отпечатку) вдоль направления прокатки и феррито-перлитная полосчатость в микроструктуре.

### 3.2 Исследование морфологии поверхности изломов конструкционных сталей средствами различной размерности

Можно выделить два основных методических подхода при измерении геометрии изломов на изображениях, снятых в СЭМ: экспресс-определение параметров геометрии на плоском (2D) кадре и на 3D-картине, полученной из нескольких 2D-кадров (стереофотограмметрия) [6]. В первом случае при простоте измерений, есть проблемы выделения и оконтуривания информативных элементов излома. Плоское изображение не учитывает наличие развитого, пилообразного мезорельефа поверхности разрушения, характерного для многих механизмов разрушения. Поэтому результаты линейных измерений элементов строения излома будут фактически соответствовать размеру проекций в плоскости кадра (рис.2). Чтобы получить истинный размер элемента излома необходимо знать угол наклона мезоступени, где он расположен (по отношению к плоскости кадра).

Применение 2D - кадра возможно для проведения сравнительных измерений элементов геометрии строения при сходной мезогеометрии рельефа. Если же мезоповрхности изломов сильно различаются, то перспективно использование техники стереофотограмметрии.

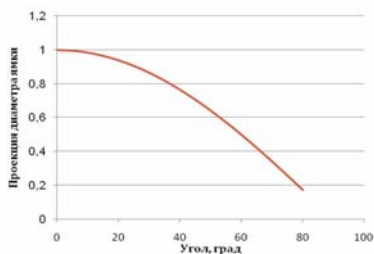


Рис. 2. Влияние угла наклона мезоступени пилообразного излома на результаты измерения диаметра ямки вязкого излома на плоском кадре

Проведенные систематические наблюдения поверхности изломов, в частности, показали, что поверхность разрушения ударного образца из стали 16Г2АФ состояла из мелких и крупных (размером 20 - 25 мкм) ямок и расслоев, присутствие которых связано с наличием в структуре стали феррито - перлитной полосчатости и нитевидных сульфидов марганца.

Вязкий излом стали 38ХНЗМФА-Ш имел мелкоямочное строение с размером ямок не более 7 мкм, на их дне которых наблюдались сульфиды марганца. Поверхность излома стали 40Х2Н2МА состояла из множества мелких ямок размером 1-8 мкм. На дне ямок в изломе были обнаружены неметаллические включения  $Al_2O_3$  и  $MnS$ .

Вязкий излом стали 15Х2НМФА отличался от изломов других сталей и представлял собой сочетание крупных ямок размером до 20-25 мкм в окружении мелких (1 - 5 мкм). Определяющее влияние на формирование такого излома оказывают общая загрязненность НВ, а также их случайное расположение в материале с достаточно большим межчастичным расстоянием (и отсутствием скоплений). Некоторые перемычки между крупными ямками дорывались по механизму образования и слияния мелких пор, о чем свидетельствует наличие микронных и субмикронных ямок на её поверхности, т.е. имела место неустойчивость течения микрообъемов металла между соседними порами.

Измерение диаметров ямок на исследованных поверхностях разрушения для всех марок сталей показало, что их распределение носит асимметричный характер и удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной функцией, что совпадает с формой распределения НВ (рис. 3). Зависимость диаметра ямки от диаметра включения для всех исследуемых сталей носила линейный характер, что также показано в [7].

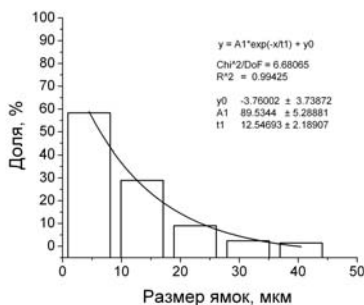


Рис.3. Распределение ямок вязкого излома по размерам (сталь 15Х2НМФА) и его аппроксимирующая функция

Показано, что глубина ямок прямо пропорциональна их диаметру. Для стали с большей вязкостью (вар.1) глубина ямок больше, чем в сходных по размерам ямках изломов сталей с меньшей вязкостью (вар.2, 3, 4) (рис. 4).

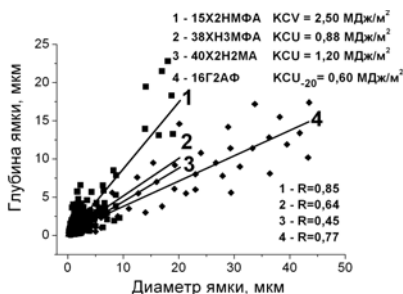


Рис. 4. Связь диаметра и глубины ямок вязких изломов исследуемых сталей

Для всех изломов исследованных сталей была реконструирована форма ямки. Показано, что ямки всех изломов имели параболическую форму, которая функционально описывалась выражением  $y = ax^2 + bx + c$ , где коэффициент «а» принимал значения, как правило,  $\leq 1$ . При этом с увеличением размера ямки значение коэффициента «а» уменьшалось.

Двумерные профили микрорельефа изломов сталей имели пилообразную форму (последовательное сочетание выступов и впадин). Каждый гребень профиля состоял из групп ямок различных размеров.

### 3.3 Анализ микрорельефа поверхности камневидной фасетки

В камневидном изломе вязкая межзеренная фасетка представляла собой искривленную или наклонную поверхность с диапазоном углов наклона от 15 до 60°. Для исследования отбирались фасетки с углом наклона не более 35°, чтобы избежать экранирования одних элементов излома другими. В связи с искривленностью фасетки, для дальнейшего изучения микрорельефа находили её линию тренда, которую далее вычитали. Таким образом, выделялся пилообразный профиль поверхности фасетки камневидного излома.

Очевидно, такая форма поверхности зернограницной фасетки отражает эволюцию границ зерен аустенита в процессе высокотемпературного нагрева под ковку. Металлографические исследования подтвердили, что в микроструктуре стали после выдержки при 1150°C в течение 7 часов, заковки в масло и последующего травления (теплый насыщенный водный раствор пикриновой кислоты + ПАВ) наблюдается кривизна границ зерна аустенита. Измерения показали, что кривизна границ зерен  $\kappa$  на шлифе соотносится с кривизной поверхности фасеток  $K$  как  $\langle K \rangle = (1,1 \pm 0,3) * \langle \kappa \rangle$ .

Таким образом, кривизна камневидных фасеток в основном обусловлена выпадением частиц по искривленным границам зерна аустенита при охлаждении с "ковочных" температур.

Исследование микрорельефа поверхности камневидной фасетки показало, что она состоит из ямок размером  $3,2 \pm 0,8$  мкм, образованных неметаллическими включениями средним размером  $1,1 \pm 0,4$  мкм. Рентгеновский микроанализ, проведенный на СЭМ HITACHI S-800 (микроанализатором INCA-X-act) выявил их природу - сульфиды MnS. Для сравнения, средний размер включений и ямок в классическом вязком изломе той же стали составил  $1,8 \pm 1,1$  мкм и  $5,7 \pm 1,9$  мкм, соответственно.

Очевидно, такое различие в размерах ямок связано с разным межчастичным расстоянием в стали. Среднее расстояние между частицами составляет  $3,1 \pm 0,6$  мкм на поверхности камневидного излома, что почти в 2 раза ( $5,5 \pm 0,9$  мкм) меньше этого параметра для классического вязкого излома. Плотность НВ в кластерах составляет  $10^9$ - $10^{11}$  шт/см<sup>2</sup>, что на 5 порядков выше плотности частиц, наблюдаемых в обычном вязком изломе.

Микропластическая деформация ( $D_{\text{ямки}}/D_{\text{НВ}}$ ), реализуемая при росте пор вокруг НВ на зернограницной фасетке, составила  $2,9 \pm 0,7$ , по данным для вязкого излома эта величина составляет  $3,2 \pm 1,1$ , она прямо пропорциональна расстоянию между частицами.

Расстояния между центрами ямок (частицами) были получены следующим образом: от некоторой ямки в центральной части скопления

последовательно измерялись в радиальном направлении (к периферии фасетки) расстояния до ближайших "соседей" ямок (рис.5а). Построенная гистограмма (рис. 5б) дала не только шаг ямок (расстояние между пиками), но и выявила закономерный (периодический) характер их размещения в направлении «центр - периферия».

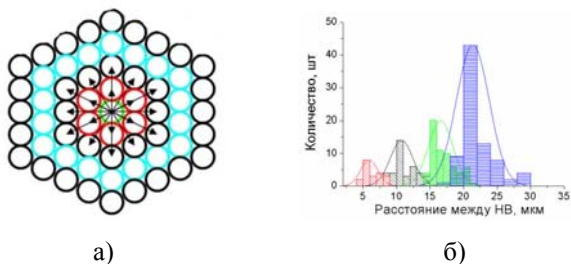


Рис. 5. Схема определения расстояния между центрами ямок (а) и гистограмма распределения их значений (б)

Пилообразная форма рельефа поверхности камневидной фасетки - результат слияния групп ямок (т. е. образование своего рода мезоперемычек между группами ямок) (рис. 6).

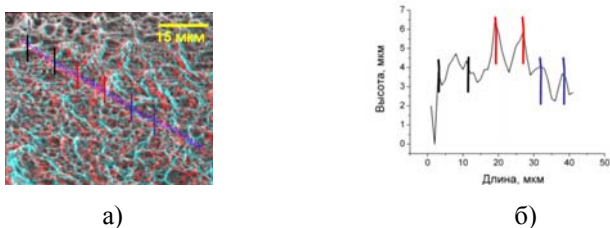


Рис.6. Поверхность камневидной фасетки (а) и профиль в её сечении (б)

Наблюдаемые [7] при малых увеличениях гребни, не что иное, как ступеньки перехода от одной группы ямок к другой с расстоянием между гребнями 10-25 мкм.

В центральной части фасетки ямки более равноосные, чем на краях, где их вытянутость увеличивается. Прямые измерения геометрии ямок

подтвердили это: анизотропия ямок варьировалась от ~1 в центральной части фасетки до 2,5 на её периферии. Это признак зарождения микротрещины в центральной части зернограничного кластера частиц и последующего её скачкообразного распространения к его границам.

Необходимо также отметить изменение формы ямки в зависимости от ориентации поверхности фасетки: обычно ямка имеет искаженную вытянутую форму в направлении наклона фасетки. В перпендикулярном направлении вытянутость ямки отсутствует (рис. 7).

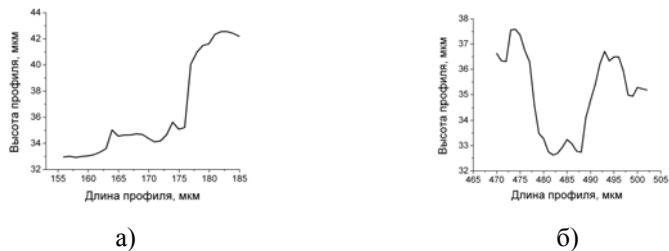


Рис. 7. Типичные профили ямок камневидного излома параллельно (а) и перпендикулярно (б) направлению развития макротрещины

Профили ямок камневидного и вязкого излома (рис.8а) удовлетворительно аппроксимировались параболическим уравнением (в пакете Origin Pro 8.0) с коэффициентом корреляции 0,7-0,9. Величина коэффициента при квадратичном члене в уравнении параболы возрастала с уменьшением размера ямки (рис. 8б). Видимо при малом межчастичном расстоянии на поверхности камневидной фасетки, рост поры в направлениях «х-у» ограничен, при этом существует запас для роста поры в z-направлении.

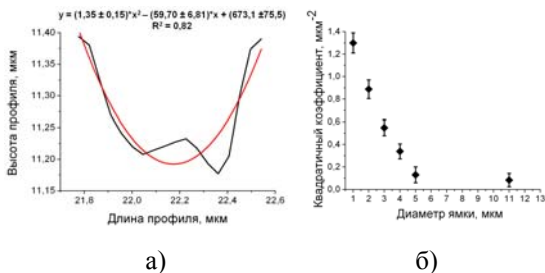


Рис. 8. Вертикальное сечение ямки камневидного излома поперечником 0,7 мкм (а) и зависимость формы ямки от её размера (б)



Для того, чтобы выяснить причины отсутствия различий в ударной вязкости стали, в тех случаях, когда разрушение приводит к появлению камневидного и вязкого изломов, был сопоставлен их рельеф - по измерениям перепадов высот профилей (ГОСТ 2789). В результате было установлено, что для камневидного излома характерна относительная однородность рельефа. Основное отличие профиля вязкого излома - это наличие мезосоставляющей, т.е. микрорельеф вязкого излома «существует» на фоне более грубого рельефа. Без учета мезосоставляющей перепады высот микропрофиля вязкого излома сопоставимы с профилем камневидного излома. Отношение перепадов высот микропрофилей двух изломов  $\Delta_{ки} / \Delta_{ви}$  составляет 0,6-0,9.

Для выявления вклада пластической деформации при распространении магистральной трещины в материале, содержащем кластеры частиц, был проведен сравнительный анализ формы фронта классической вязкой и вязкой межзеренной трещин. В результате панорамной съемки «внахлест» кадров поверхности излома, захватывающих границу двух механизмов разрушения и располагающихся перпендикулярно направлению распространения трещины, была выявлена форма фронта магистральной трещины.

Было показано, что фронт трещины стали с зернограницными скоплениями НВ, имеет волнообразную полуэллиптическую форму. Это признак участия пластической деформации в процессе развития трещины.

В вязком изломе ударного образца стали 40Х2Н2МА (в деформированном состоянии) трещина также растёт "языком", но передний фронт имеет гладкую форму.

### 3.4 Измерение раскрытия трещины методом стыковки ответных половинок излома

Как известно [1], на основе сопоставления двух ответных половинок излома можно воссоздать историю распространения трещины, а по величине пластической невязки оценить раскрытие трещины. В работе определили

пластическую невязку, образующуюся при вскрытии по зернограницным кластерам частиц, и оценили степень энергоёмкости разрушения различных неоднородностей структуры. Измерение невязки были проведено на 10 камневидных фасетках. Для каждой фасетки были построены цифровые модели ее поверхности на двух ответных половинках, откуда "извлекали" двумерные профили (в месте наибольшей невязки) для их совмещения. Всего на каждой фасетке проводилось два профиля параллельно и перпендикулярно распространению магистральной трещины. Нахождение реперных точек производилось визуально по изображениям ответных половинок изломов.

Профили хорошо совмещались в точке вершины тройного стыка и расходились к основанию (рис. 9). Таким образом, была измерена пластическая невязка из-за распространения трещины.

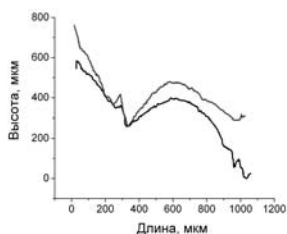


Рис. 9. Состыкованные профили участка камневидного излома

Средняя величина раскрытия трещины у основания "камня" составила 60-100 мкм. Значения пластической невязки в области камневидной фасетки и сходного участка вязкого излома были сопоставимы.

На поверхности камневидной фасетки были ямки размером около 1 - 3 мкм. Такие же по размеру ямки присутствуют и на поверхности вязкого излома. Значения пластической невязки ямок совпали.

Камневидные фасетки были неоднородны по своему строению и содержали более плотные скопления ямок (НВ), кратерообразные скопления ямок (НВ) и плены (рис. 10). Не исключено, что такие дефекты могут разрушаться иначе по отношению к остальной части фасетки.

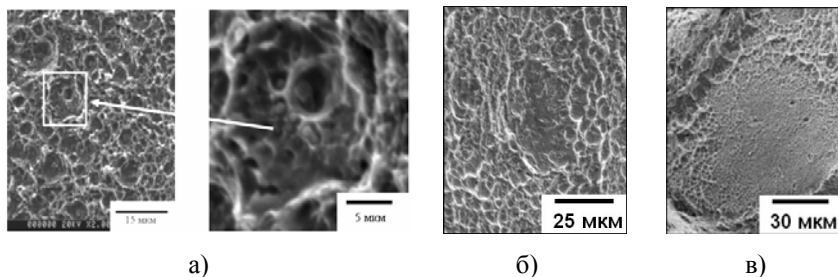


Рис. 10 - Характерные неоднородности строения

каменевидной фасетки: кратеры (а), плены (б), плотные скопления (в)

Для реконструкции развития трещины по таким неоднородностям структуры в изломе была применена методика стыковки двух ответных половинок изломов. Эта величина для плотных скоплений составила в среднем более 6 мкм, в области плен - 4,6 ... 11,9 мкм.

Однако абсолютные значения раскрытия не позволяют корректно сравнить данные особенности по энергоёмкости разрушения, поэтому в качестве сравнительной характеристики использовалось отношение пластической невязки к среднему размеру (хорде)  $v$  элемента строения излома. В результате было получено, что величина  $v$  для плен равно 0,24, для плотных скоплений - 0,21, для кратеров - 0,56. Для сравнения было получено  $v$  для ямки, которое составило 0,63 мкм.

Таким образом, по энергоёмкости разрушения дефекты можно расположить в следующий ряд: скопления, плены, кратеры. С ростом масштаба неоднородности степень его опасности возрастает.

### 3.5 Определение фрактальной размерности

В работе были оценены значения ФР камневидного, хрупкого, вязкого и смешанного (20% хрупкой, 5% камневидной, 75% вязкой составляющей) изломов.

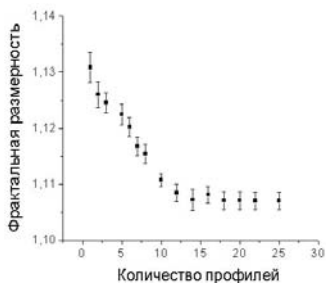
Обычно при измерении мезорельефа шаг измерения варьируется в диапазоне менее двух порядков [4,8]. Это приводит к увеличению ошибки

определения ФР. Очевидно, что для полной оценки явления диапазон измерений должен включать в себя все элементы строения излома (без опасений потери существенной информации).

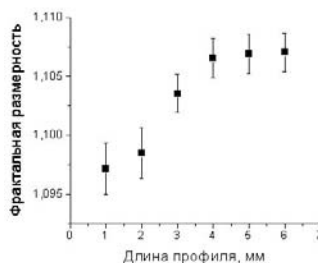
В этой связи, профили были получены из стереоизображений, сложенных в ленточную панораму длиной 7 мм и шириной 340 мкм, снятой в СЭМ при увеличении  $\times 300$ . На каждом изломе было снято 5 панорам, находящихся на расстоянии 680 мкм друг от друга, на которых реконструировано по 5 профилей, отстоявших друг от друга на расстоянии 50-80 мкм. Для каждой поверхности излома было реконструировано по 25 профилей длиной 5-7 мм, исследованы зависимости ФР от количества профилей, длины профиля и шага измерения для различных видов поверхности разрушения

Показано, что для достоверного (воспроизводимого) определения ФР необходимо не менее 10 профилей длиной более 4 мм (рис.11а,б). ФР поверхности разрушения, практически не отличалась для различных видов излома (рис. 11в). При этом значение ФР зависело от исходного шага дискретизации профиля.

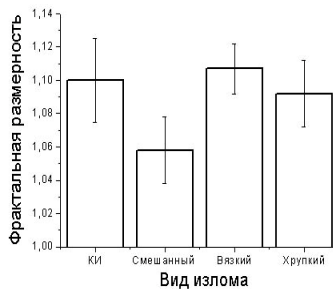
Маловероятно, что дополнительный положительный эффект даст дальнейшее уменьшение шага измерения ниже наблюдаемых на практике элементарных актов разрушения (ямка, фасетка), при исходно имеющемся ограничении шага сверху габаритами стандартного образца.



а)



б)



в)

Рис. 11. Зависимость ФР от количества профилей (а), длины профиля (б) и сравнение величины ФР для различных поверхностей разрушения (в)

Таким образом, фактически уже по способу регистрации излом измерим в диапазоне, как правило, менее двух порядков. Однако в таких узких пределах, по-видимому, невозможно получить объективную информацию о самоподобии. Поэтому нет объективных оснований для утверждения, что излом является фракталом, а величина  $D$  его размерностью.

### Выводы:

1. Сопоставлены возможности использования средств различной размерности для выявления различий в строении вязких изломов.
2. Развита методика реконструкции трехмерных изображений рельефа изломов (с использованием тест – объектов) на основе стереопар, полученных в сканирующем электронном микроскопе.
3. На основе массовых измерений геометрии ямок вязких изломов сталей 16Г2АФ, 15Х2МФА, 40Х2Н2МА и 38ХН3МФА-Ш, показано, что они представляет собой в простейшем (квадратичном) приближении параболоид вращения  $y = c(x^2 + z^2)$ , обрезанный «сверху» плоскостью мезоступени излома (или фасеткой камневидного излома) наклонённой под некоторым углом  $\alpha$  к макроплоскости излома. При увеличении поперечника ямок отношение глубины к диаметру уменьшается.

4. Экспериментально обоснованы условия определения воспроизводимых значений фрактальной размерности изломов по методу вертикальных сечений (не менее 10 профилей длиной не менее 4 мм каждый на вариант и вариации шага измерения от 0,46 до 58,9 мкм). Показано, что её величина практически неизменна для различных видов излома (транскристаллитный, смешанный, камневидный и вязкий).

5. Из измерений рельефа фасетки камневидного излома стали 38ХНЗМФА-Ш прослежена эволюция развития трещины по зернограничному кластеру включений: от его центра в радиальных направлениях.

6. С использованием развитых методов измерения изломов установлено, что траектория трещины в границах зернограничного кластера включений имеет периодический вид, а форма её переднего фронта (в виде полуэллипса) указывает на неоднородность напряжённого состояния в пределах скопления включений (от центра к периферии) и связанную с этим неравномерность пластической деформации.

7. Установлено, что на поверхности камневидной фасетки преимущественно наблюдаются три вида неоднородного ямочного строения: плотные скопления, кратеры, ямки от плён включений. Им соответствуют три вида размещения включений на границе: капельная россыпь дисперсных сульфидов марганца в её плоскости, скопление частиц сульфидов марганца сферической формы и зернограничные плёны силикатов.

8. Измерение пластической невязки неоднородностей строения камневидной фасетки позволило сопоставить уровень их вязкости: наиболее энергоёмким элементом являются кратеры, а наименее - плёны.

Список цитируемой литературы:

1. Маркелов В.А., Андреев Ю.Г., Штремель М.А., Калантаров Е.И.// Физика металлов и металловедение. 1988. Т. 66. №5. С.1010 – 1018.
2. Ходжер Т.А. Информационная система фотограмметрического моделирования микрообъектов для биологических исследований // Авт. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук, Иркутск, 2008, 8 с.
3. Мельник В.Н. Фотограмметрическая обработка снимков, полученных на растровом электронном микроскопе // Авт. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук, Москва, 1981, 14 с.
4. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 384 с.
5. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Салихов Т.Ш., Пономарёва М.В., Скородумов С.В., Глухов М.Г. // Изв. Вуз. Черн. металл. 2008. № 11. С. 30-36.
6. Штремель М.А. // МиТОМ. 2005. №5. С.35-43.
7. Горицкий В.М., Гусева И.А. Связь параметров ямочного излома с характеристиками структуры термоулучшенной стали // ФММ. 1983. №1. т.56. с.192-194.
8. Кудря А.В., Бочарова М.А., Лаговская Г.Ю. В сб. трудов XXXV семинара "Актуальные проблемы прочности" - Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов. Часть II. Псков. 1999. С.523-528.

Публикации по диссертационной работе:

1. Арсенкин А.М., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Теплухина Н.С. Хорева Е.Г. Оценка риска неоднородности структур в конструкционной стали по наблюдениям изломов// Изв. Вузов.Черн.металл.2009..№11.С.38-41.
2. Кудря А.В., Никулин С.А., Николаев Ю.А., Арсенкин А.М., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Чернобаева А.А., Кузько Е.И., Хорева Е.Г. Факторы неоднородности вязкости низколегированной стали 15Х2НМФА // Изв. Вузов. Черн. металл. 2009. №9. С. 23-28.

3. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Сухова В.Г., Марков Е.А., Арсенкин А.М., Салихов Т.Ш. Наблюдение и измерение характеристик структур, пластичности и вязкости в конструкционных сталях // МиТОМ. 2009. №5. С. 60-67.

4. Кудря А.В., Арсенкин А.М. Разрушение конструкционных сталей по кластерам частиц // IV Международная школа «Физическое материаловедение». Сборник трудов. Тольятти. 2009. С. 27-29.

5. Соколовская Э.А., Салихов Т.Ш., Арсенкин А.М., Скородумов С.В., Теплухина Н.С., Хорева Е.Г. Измерение структур и изломов для прогноза свойств конструкционных материалов // 48-я конференция «Актуальные проблемы прочности». Труды конференции. Тольятти. 2009. С. 89-91

6. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Арсенкин А.М., Салихов Т.Ш. Измерения морфологии вязкого излома средствами наблюдения различной размерности // 47-я конференция «Актуальные проблемы прочности». Труды конференции. Н.Новгород. 2008. С. 32-34.

7. Кудря А.В., Бочарова М.А., Арсенкин А.М. Измерения фрактальной размерности поверхности разрушения для классификации сталей по вязкости // 3-я Евразийская научно-практическая конференция "Прочность неоднородных структур". Тезисы конференции. М.: 2006. С. 48.

8. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Арсенкин А.М. Возможности измерения морфологии вязкого излома средствами наблюдения различной размерности // 4-я Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур». Тезисы конференции. М.: 2008. С. 72.