

СТРУКТУРНЫЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ РИСКА ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ И МЕТОДЫ ИХ ОЦЕНКИ

**Кудря А.В., профессор, д.т.н., Кузько Е.И., доцент, к.ф.-м.н.,
Соколовская Э.А., доцент, к.т.н.**

AVKudrya@misis.ru

*Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»*

Параметры качества конструкционных (трубных) сталей

■ ПРОЧНОСТЬ -

способность выдерживать заданные нагрузки в конструкции



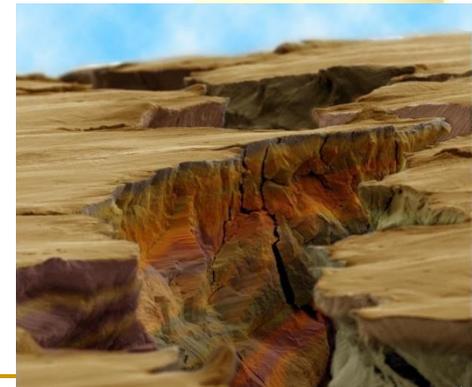
■ ПЛАСТИЧНОСТЬ –

способность выдерживать приемлемые деформации



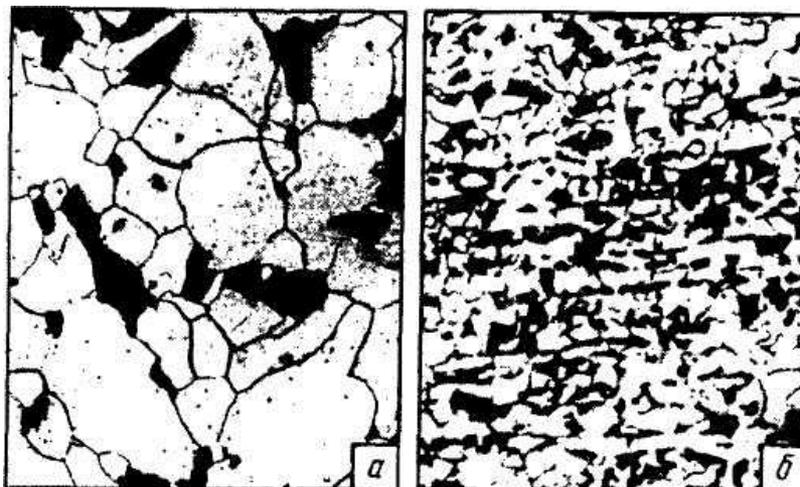
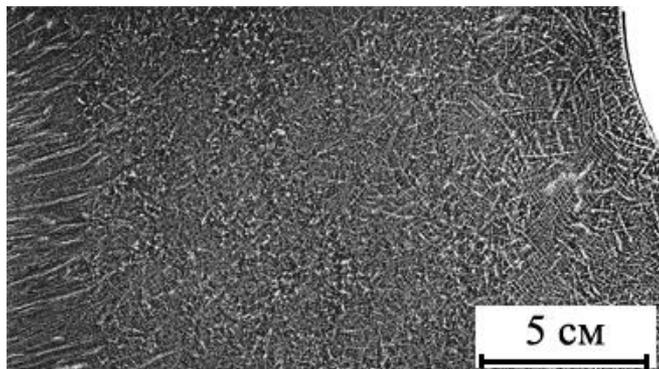
■ ВЯЗКОСТЬ -

способность сопротивляться разрушению



СОСТАВЛЯЮЩИЕ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ (ТРУБНЫХ) СТАЛЕЙ

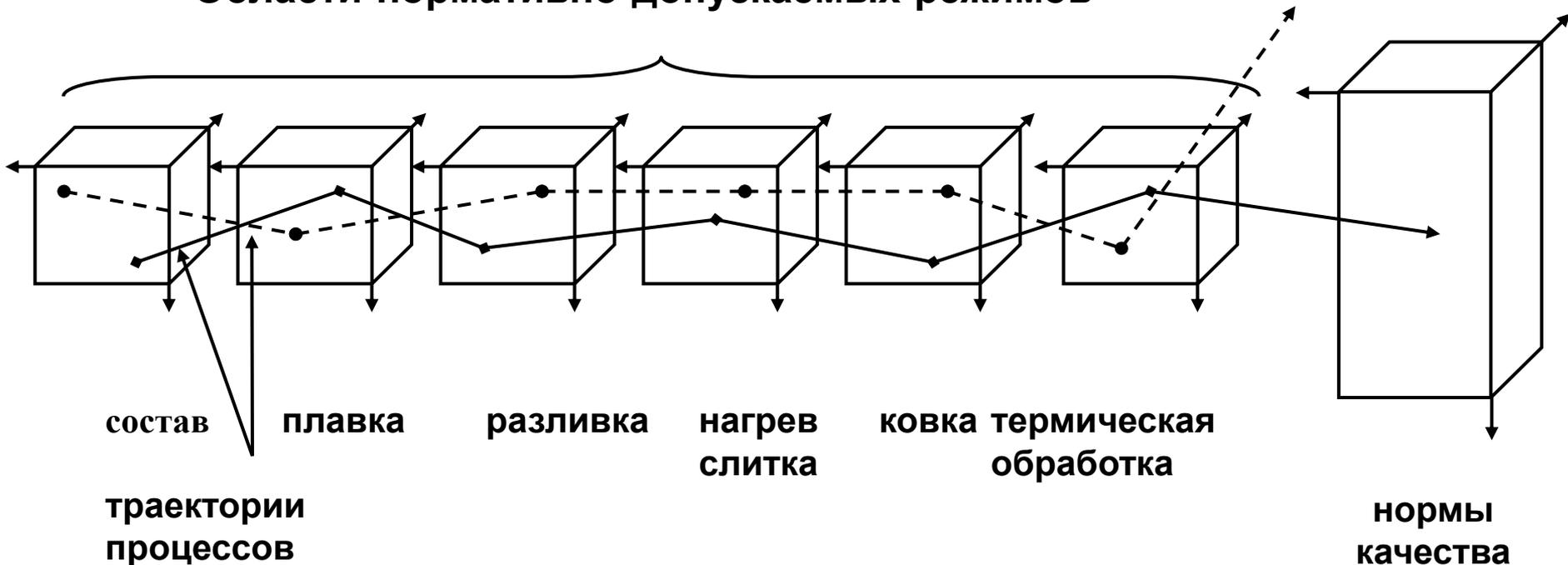
- Разномасштабные структуры стали



- Metallurgical quality: non-metallic inclusions, embrittling impurities, gases

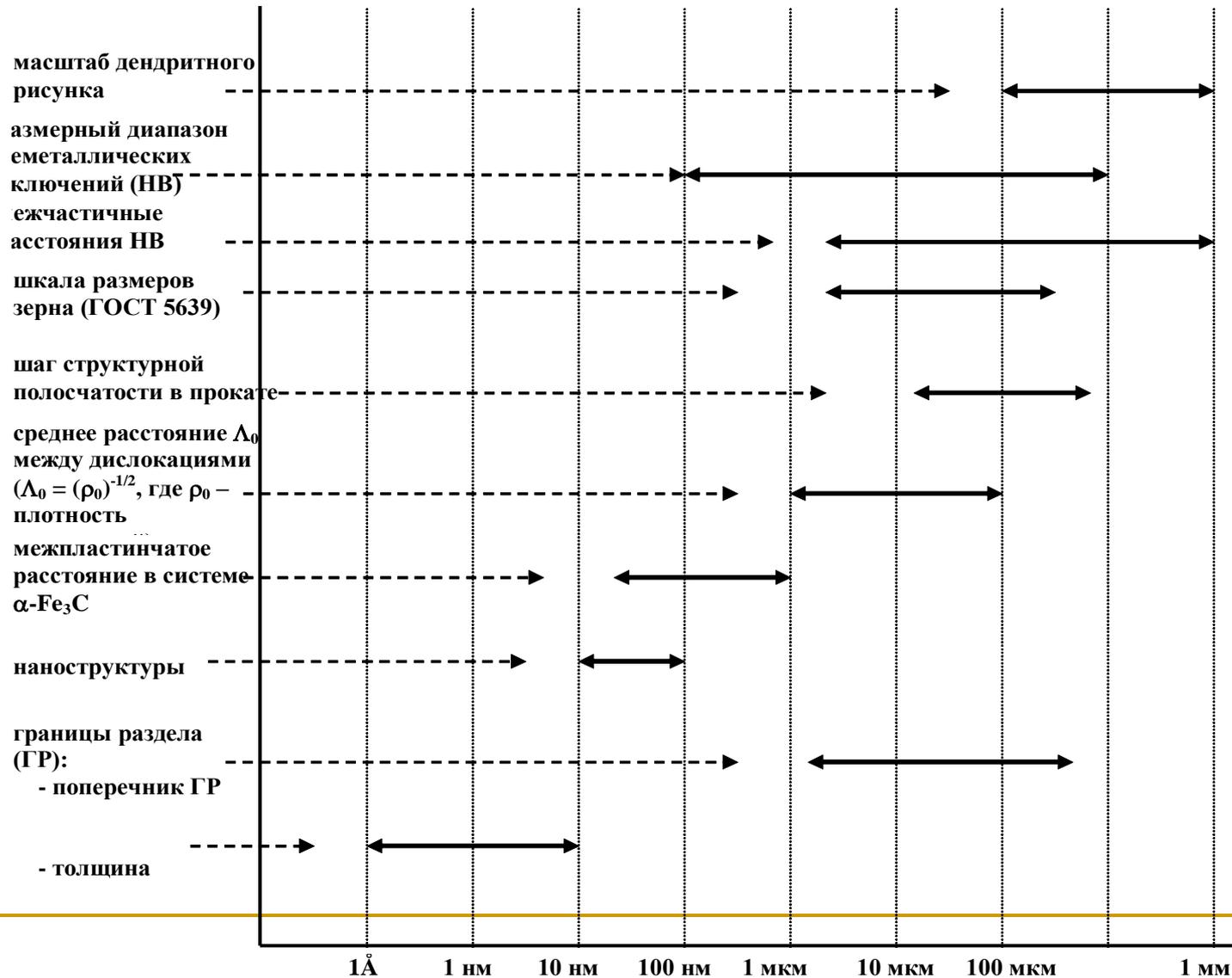
ПРИРОДА НЕОДНОРОДНОСТИ КАЧЕСТВА ПРИ СОБЛЮДЕНИИ ДИРЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Области нормативно допускаемых режимов



Отдельная траектория технологии определяет свой путь эволюции структур и дефектов в ходе технологического передела

МАСШТАБ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ



**Эволюция
структур и дефектов в ходе протяженной
технологической цепочки**



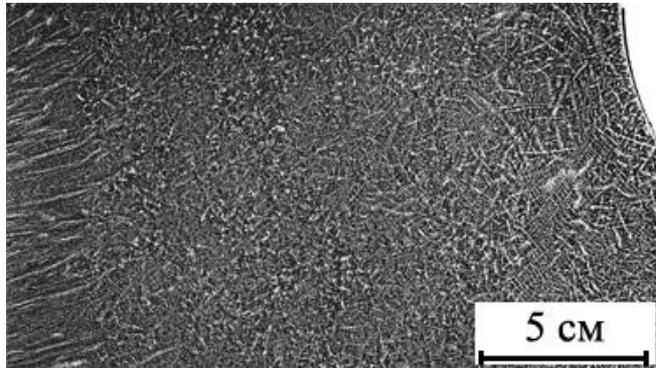
**Многообразии типов неоднородных
разномасштабных структур «на выходе»**



**Кооперативное влияние разномасштабных
структур на деформацию и разрушение**

РАЗНОРОДНЫЕ СТРУКТУРЫ В СТАЛЯХ

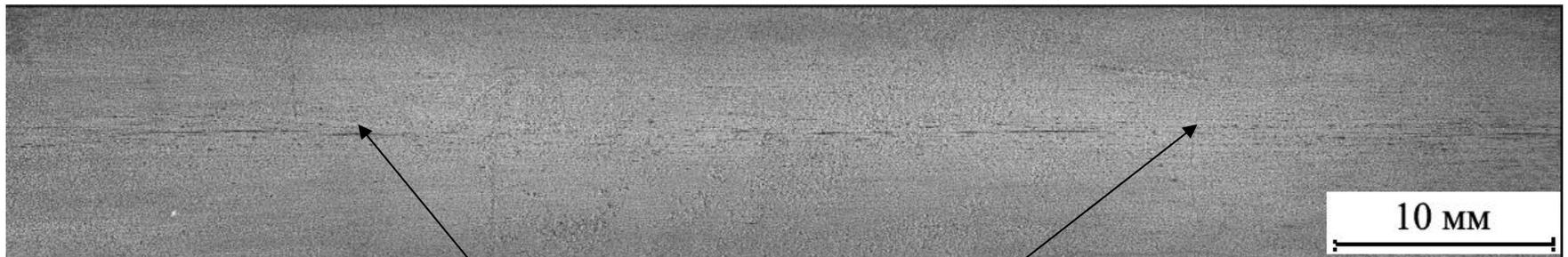
(в макро- и мезомасштабах)



38ХНЗМФА



15Х2НМФА



Осевая ликвация в трубных сталях К60-К65 ($<0,002\%S$)

НЕОДНОРОДНОСТЬ СВОЙСТВ ЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ

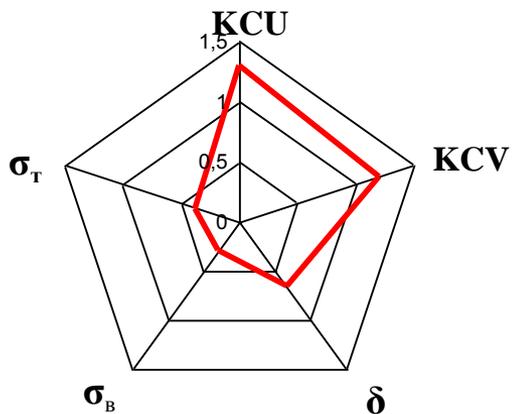
ИПГ



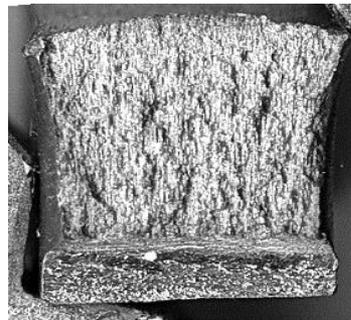
Испытание на растяжение



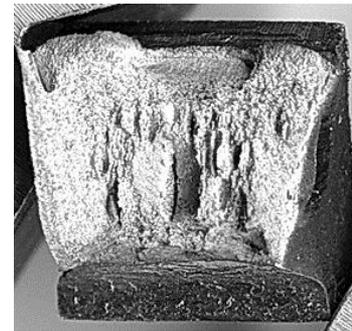
09Г2ФБ, 10Г2ФБЮ



— Вариация $(X_{\max} - X_{\min}) / X_{\text{ср}}$



16Г2АФ 17Г1С-У



12Г2СБ

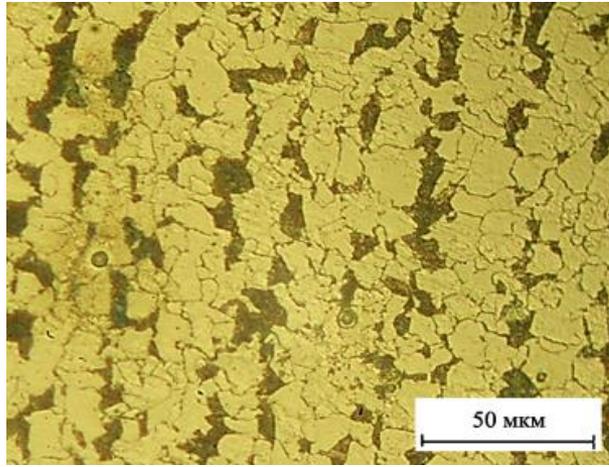


09Г2С

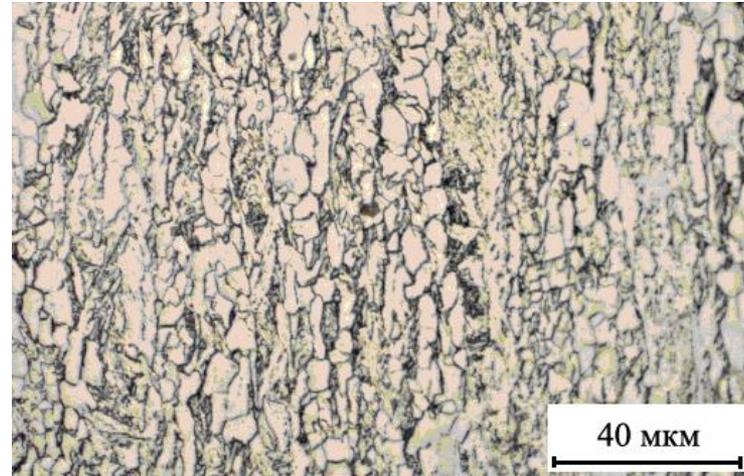
НЕОДНОРОДНОСТЬ СТРУКТУР В ТРУБНЫХ СТАЛЯХ

(в мезо- и микромасштабах)

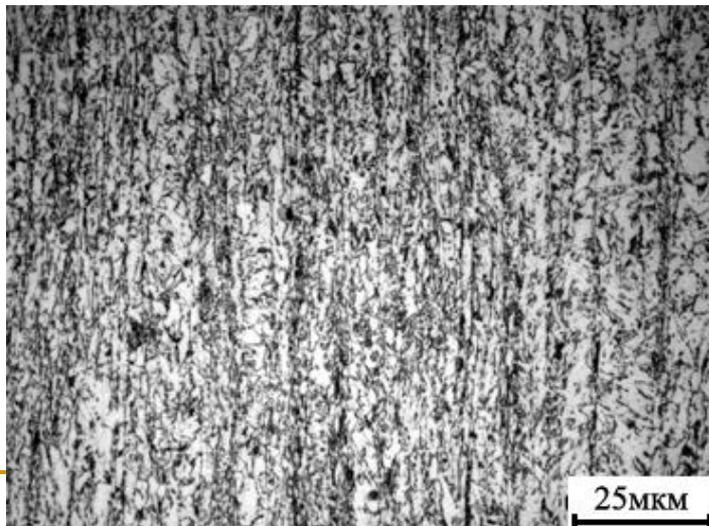
НП



Класс прочности K52 (X60)



Класс прочности K60(X70)



Класс прочности K65(X80)

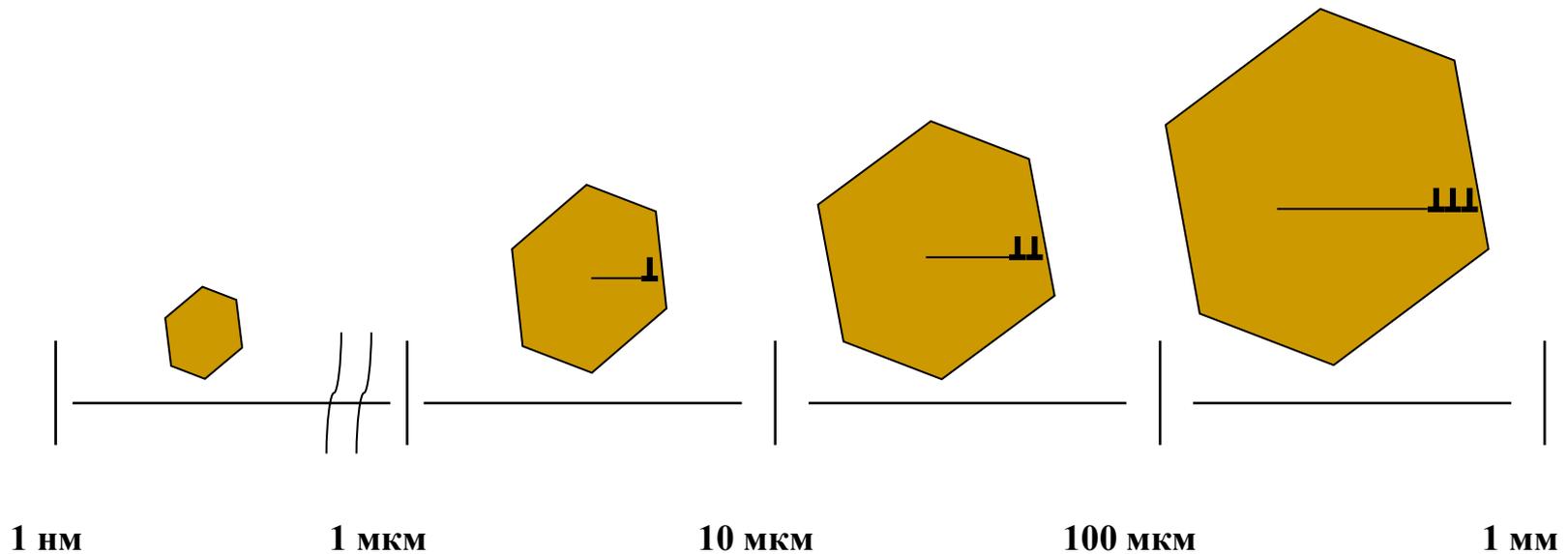


Класс прочности K70(X90)

ФАКТОРЫ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА РАЗРУШЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР

- Минимизация погрешности определения небольших смещений кривых хладноломкости
- Испытание образцов с привязкой к микроструктуре (на растяжение в третьем направлении)
- Извлечение максимальной информации при измерении геометрии изломов на разных масштабных уровнях наблюдения
- Прямое сопоставление неоднородности разномасштабных структур и строения изломов для выявления критических параметров структуры
- Получение количественных оценок неоднородности разнородных структур на основе документированных компьютеризированных, быстродействующих процедур

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА НА ОХРУПЧИВАНИЕ СТАЛИ

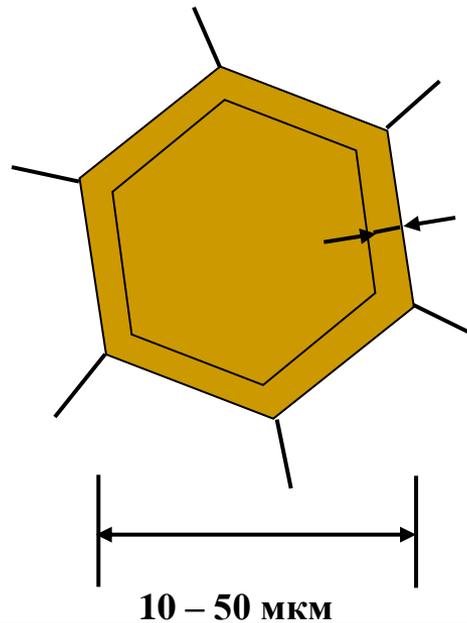


РОЛЬ ЗЕРНОГРАНИЧНЫХ ПРИМЕСЕЙ

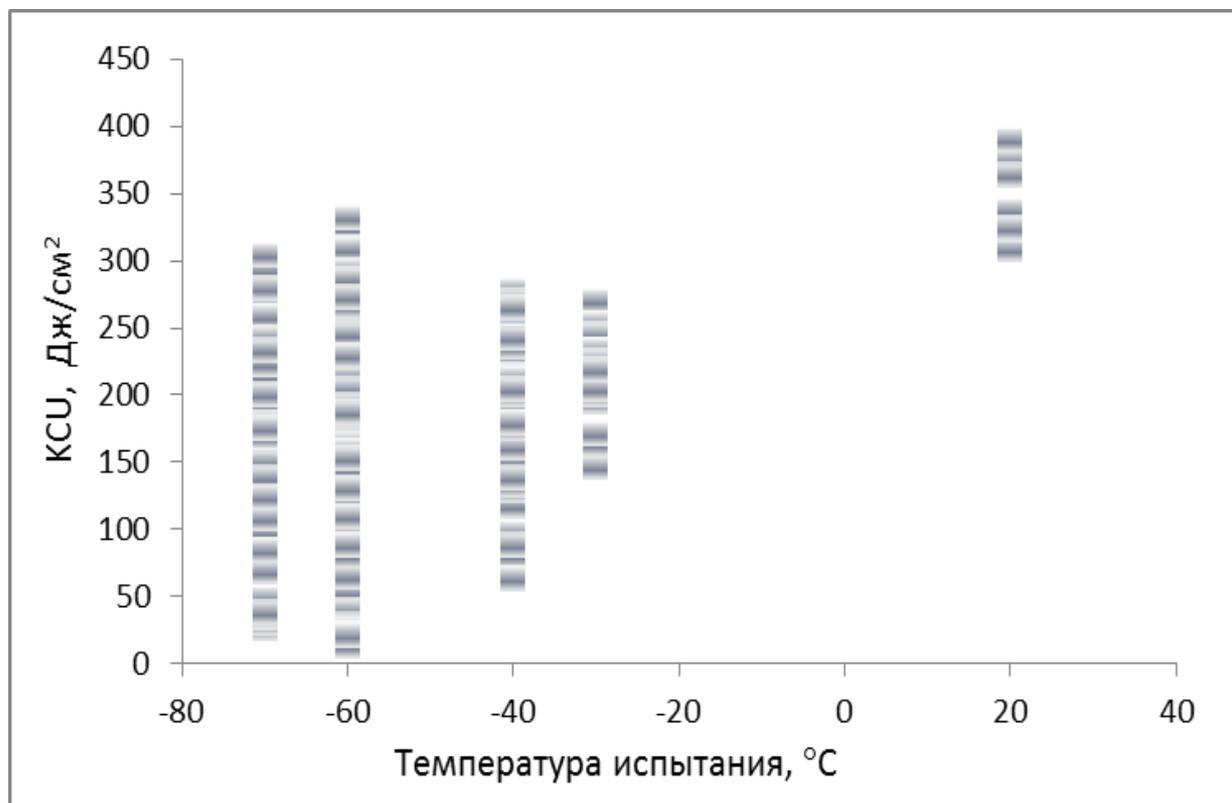
при ООХ повышение порога хладноломкости на
каждый 0,01 ат % составляет:

Sb,	Sn,	P,	As
216	115	113	
11			

°C



ПОЧЕМУ ВАЖНА ОБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА МАЛЫХ СМЕЩЕНИЙ СЕРИАЛЬНЫХ КРИВЫХ

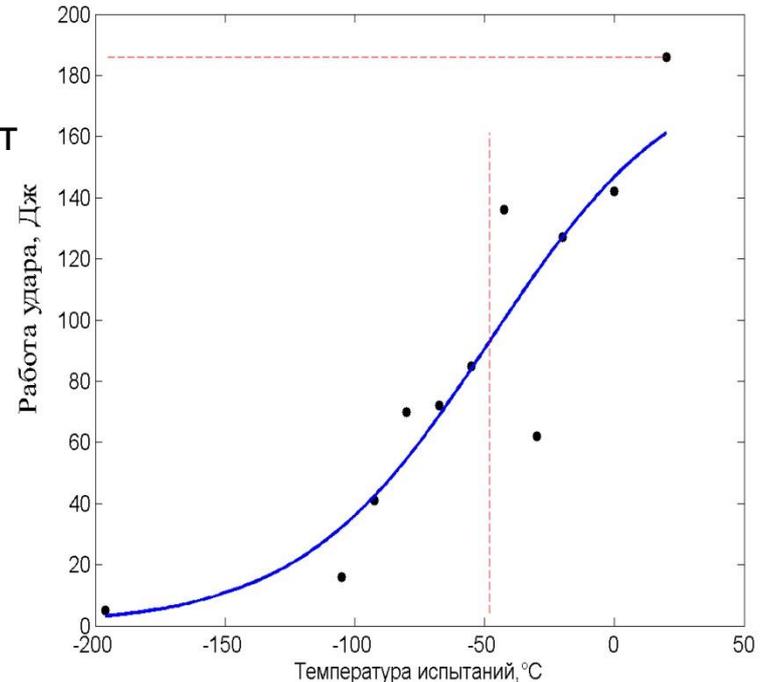


Сталь 09Г2С
(данные
сдаточного
контроля вязкости
634 плавок)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ХЛАДНОЛОМКОСТИ

При построении в общем виде зависимости $z(t_i)$, измеренной в n точках $i=1, 2, \dots, n$, её представляют кривой заданного вида $Z(\mathbf{a}, t)$ с m взаимно независимыми параметрами $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$. Определение вектора параметров \mathbf{a} из взаимно независимых и равноточных измерений $z(t_i)$ относится к задачам нелинейной регрессии. Её решение исходя из принципа максимума правдоподобия обеспечивается минимумом нормированной суммы квадратов отклонений $Z(\mathbf{a}, t_i)$ от измеренных $z(t_i)$:

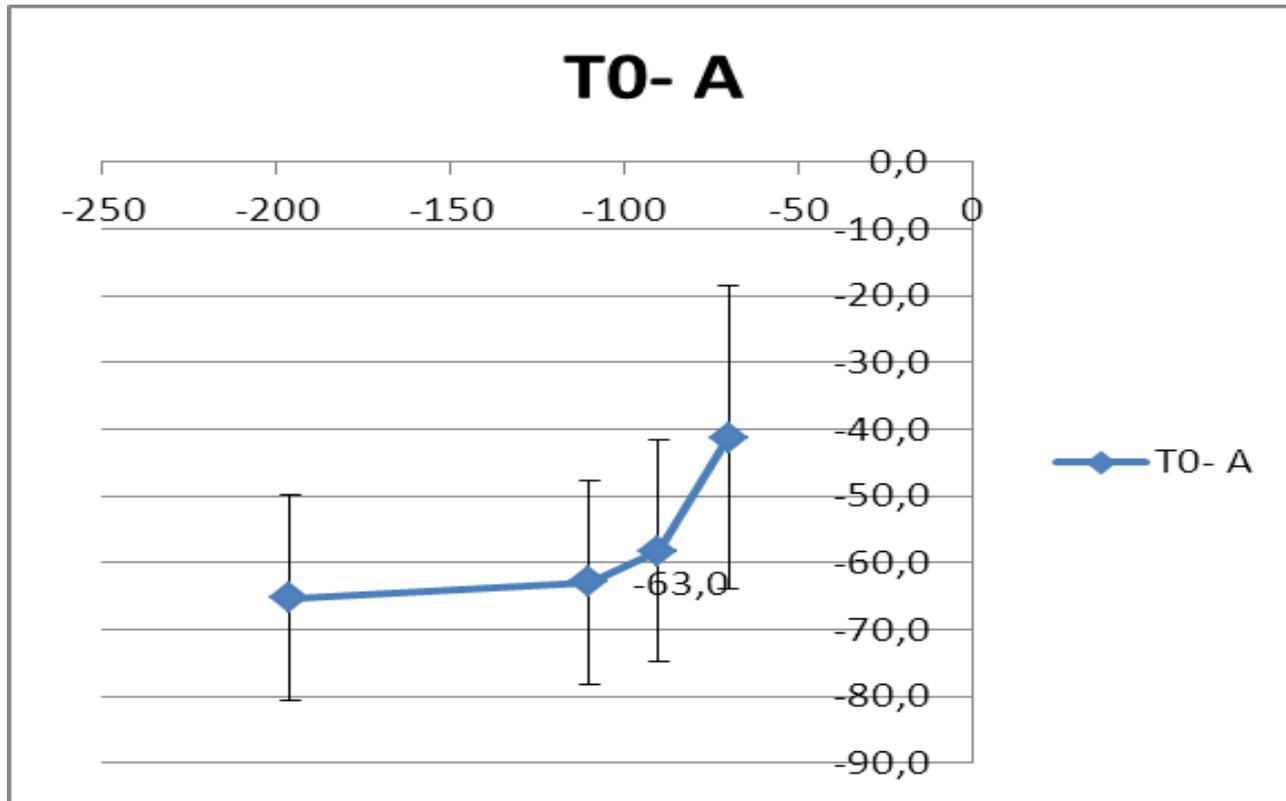
$$M(\mathbf{a}) = (1/n) \sum_{i=1}^n [Z(\mathbf{a}, t_i) - z(t_i)]^2.$$



Использование метода максимума правдоподобия позволяет однозначно построить сериальную кривую с объективным определением положения верхней и нижней полук и температуры вязко-хрупкого перехода

1. Клепиков Н.П., Соколов С.Н. Анализ и планирование экспериментов методом максимума правдоподобия. М., Наука, 1964, 184с; 2. Штремель М.А. // МиТОМ. 2008. № 11; 3. Кудря А.В., Кузько Е.И., Соколовская Э.А. // ДиРМ. 2013. № 12.

БИТЬ ИЛИ НЕ БИТЬ?



Температура испытания, °C

T₅₀

БИТЬ!!!
И до – 196 °C

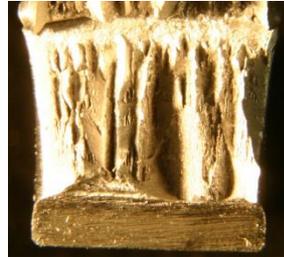
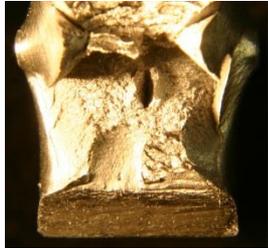
Это актуально оценке хладноломкости высокопрочных трубных сталей

Извлечение дополнительной информации при измерении макрогеометрии изломов ударных образцов

+20 °C

-80 °C

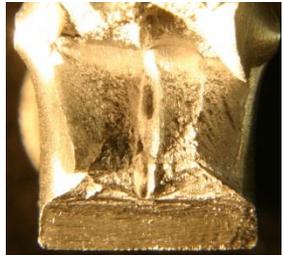
1



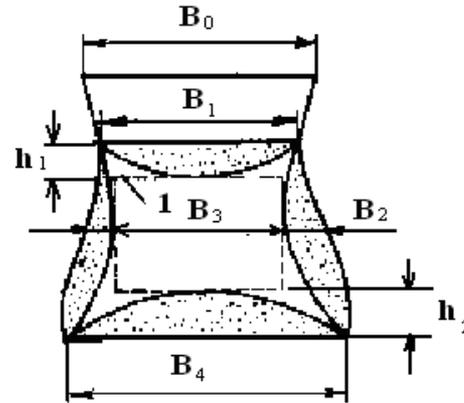
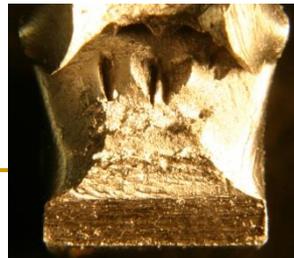
2



3

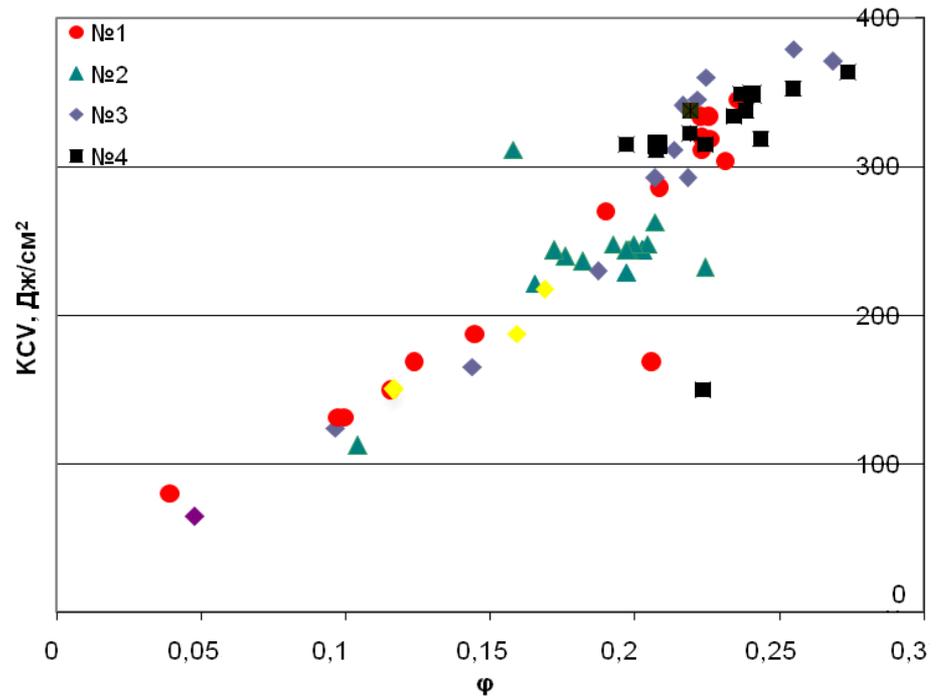


4

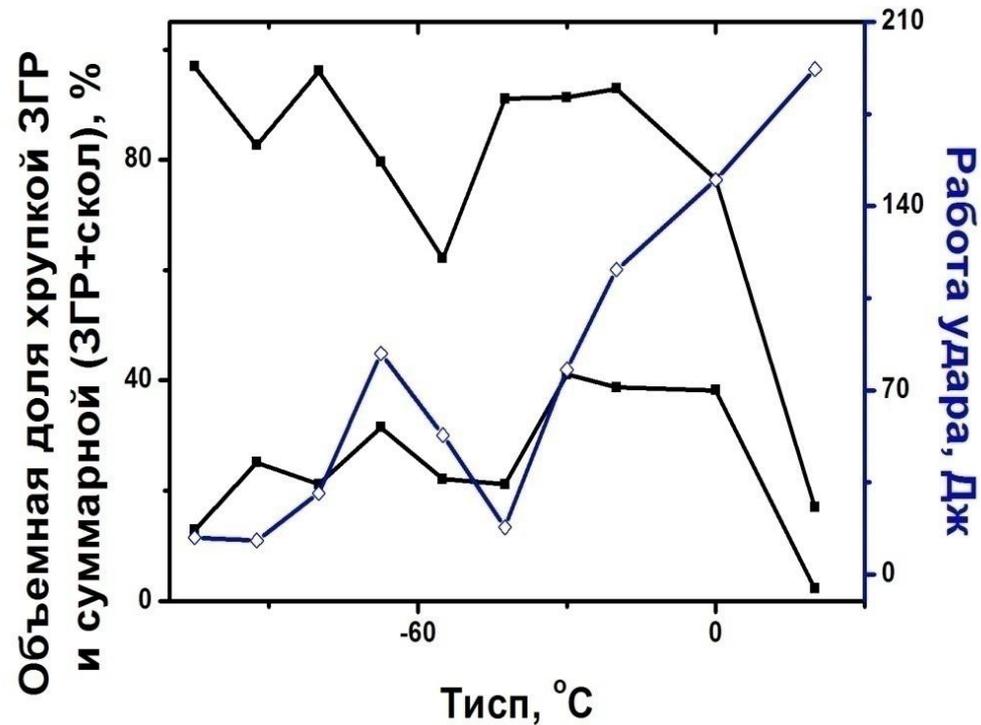


Уширение у выбега трещины:

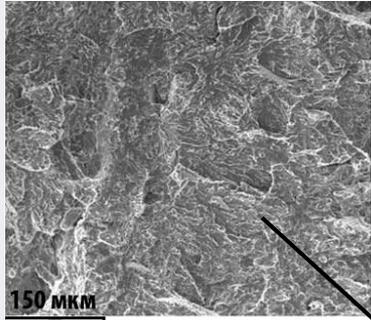
$$\varphi = \frac{B_4 - B_0}{B_0}$$



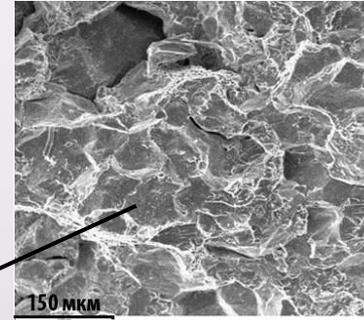
ИЗМЕНЕНИЕ ВЯЗКОСТИ СТАЛИ 15Х2НФМА И СООТНОШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЯ



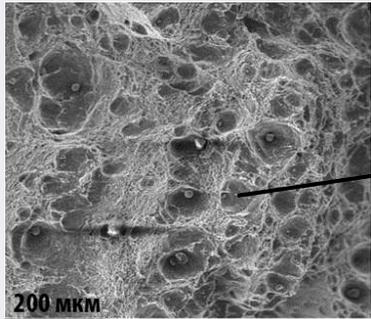
ГЕОГРАФИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИЗЛОМА (различная морфология зернограничной составляющей)



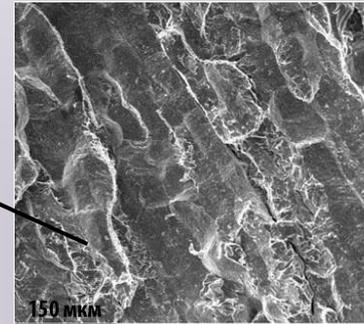
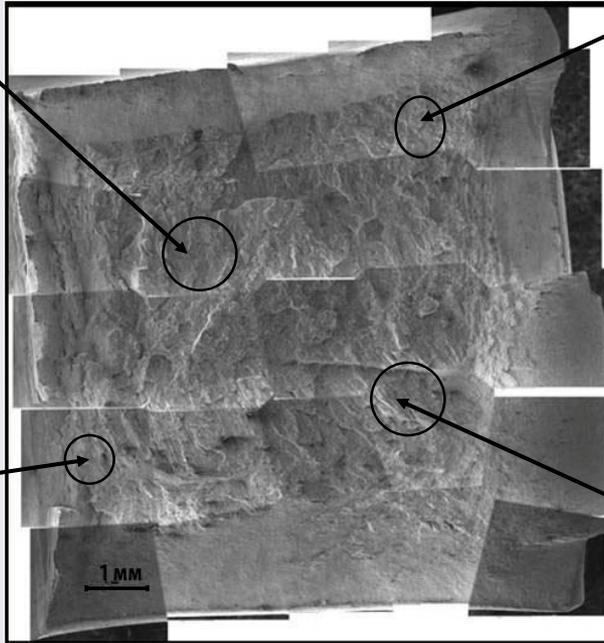
**Транскристаллитный
излом**



**Фасетки
зернограничного
излома**



Вязкий излом



**Полоски
зернограничного
излома**

Кудря А.В.,
Никулин С.А.,
Николаев Ю.А. и
др. // Изв. Вузов.
Черн. Мет. 2009.
№. 9

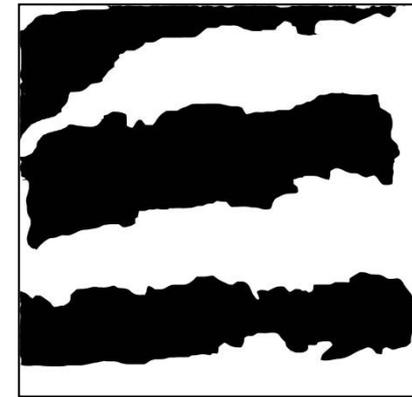
МОРФОЛОГИЯ ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ИЗЛОМАХ УДАРНЫХ ОБРАЗЦОВ, СТАЛЬ 15Х2НМФА



а) 5 мм

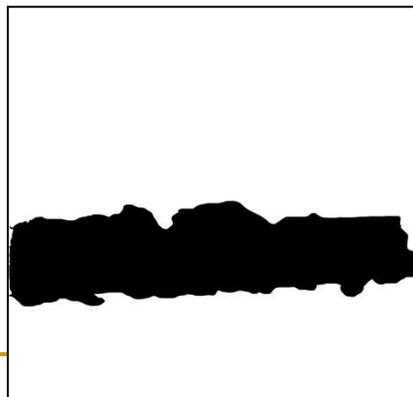


б) 5 мм



в) 5 мм

Виды ориентации зернограницных полосок ликвации: перпендикулярно (г) и параллельно (д) надрезу ударного образца



г)

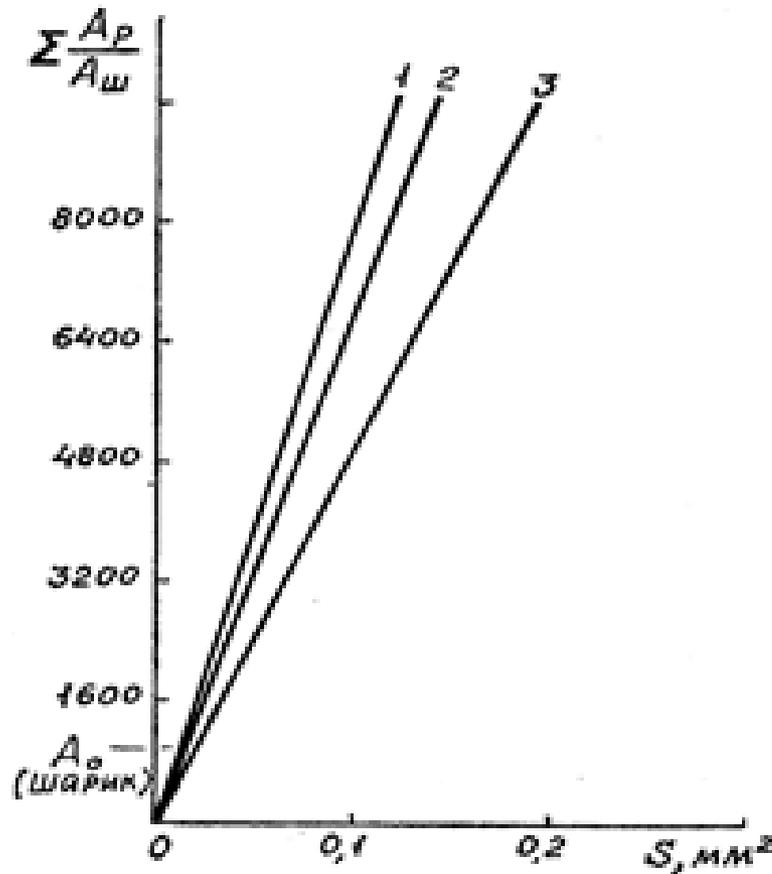
5 мм



д)

5 мм

Техника локальной оценки хладноломкости с привязкой к структуре (по измерениям акустической эмиссии)

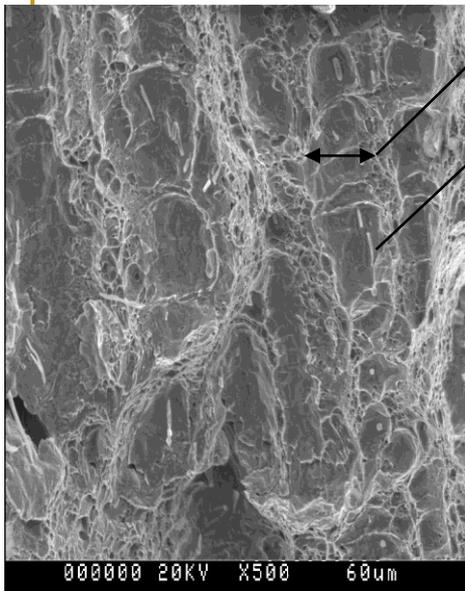


Соотношение между пиковой амплитудой АЭ и площадью хрупкой трещины, S

ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕОМЕТРИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУР И ИЗЛОМОВ, лист из стали Ст3сп

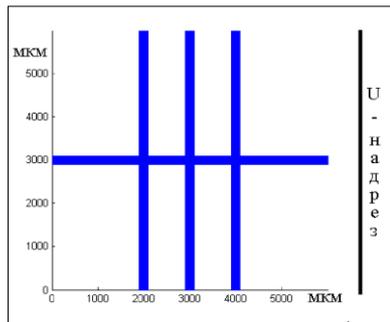
размер зерна, мкм	размер ямок, мкм	шаг полос перлита, мкм	периодичность строения изображения излома, мкм
$20,4 \pm 0,8$	$19,1 \pm 0,5$	$36,8 \pm 0,5$	$40,3 \pm 1,1$

МЕЗОГЕОМЕТРИЯ ИЗЛОМА



Ширина бороздки

Сульфид марганца



Направление прокатки

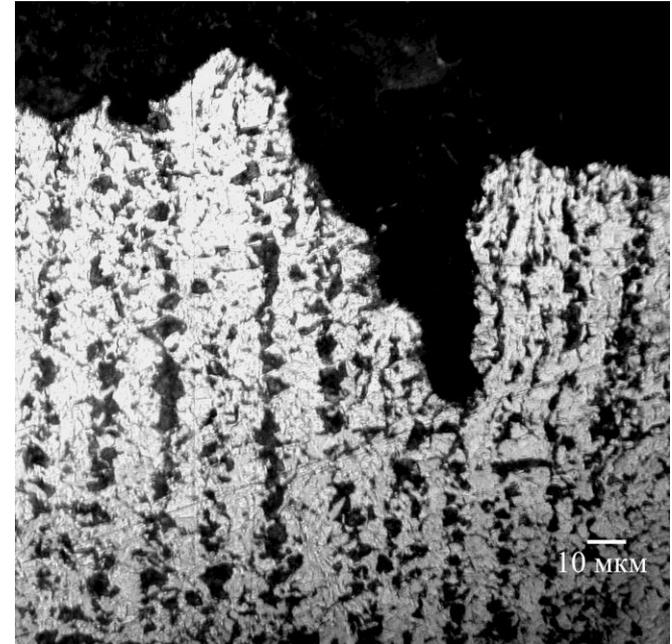
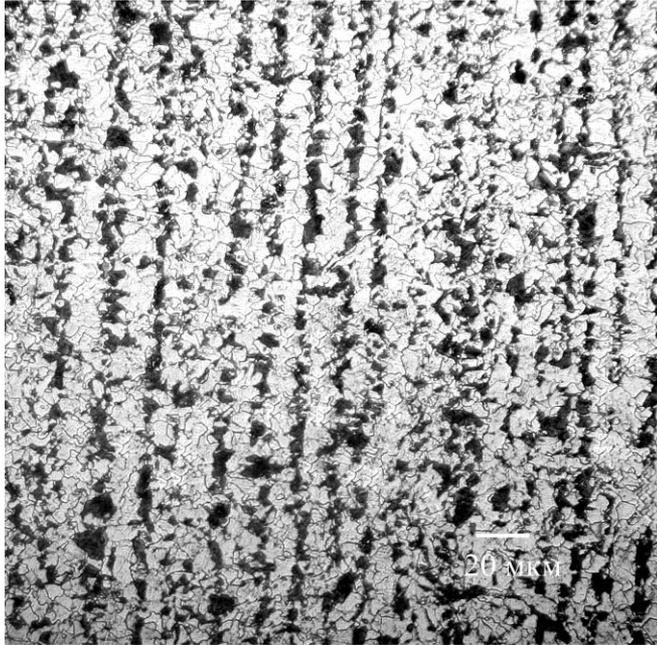
ТИПИЧНЫЙ ПРОФИЛЬ ИЗЛОМА В НАПРАВЛЕНИИ ПРОКАТКИ



СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЗОСТРУКТУРЫ

Параметр, мкм	Количество измерений	Среднее	Минимум	Максимум	Размах	Асимметрия	Эксцесс
Ширина бороздок	408	36±16	10	92	82	0,93	0,59
Длина неметаллических включений	71	18±10	3	47	44	0,98	0,57

ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНАЯ ПОЛОСЧАТОСТЬ

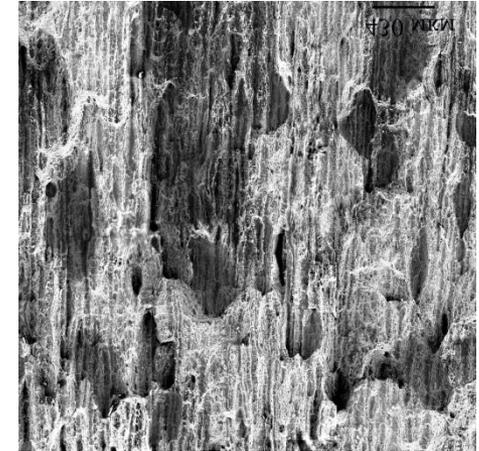
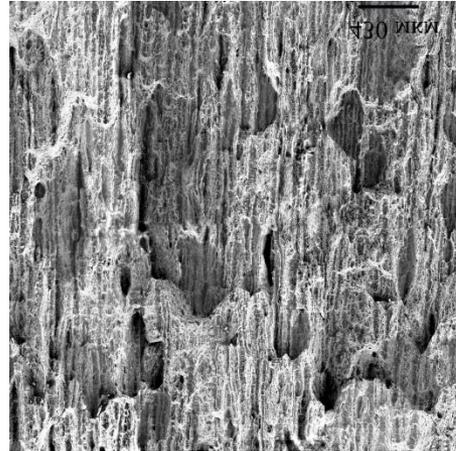
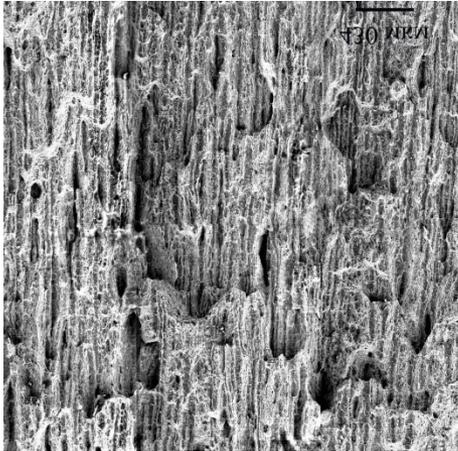


СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСЧАТОСТИ

Параметр, мкм	Количество измерений	Среднее, X_{cp}	Минимум, X_{min}	Максимум, X_{max}	Размах, $X_{max} - X_{min}$	Асимметрия	Эксцесс
Ширина полосы феррита	423	12 ± 6	5	30	25	0,42	-0,67
Ширина полосы перлита	423	8 ± 3	5	15	10	0,75	-0,46

ПЕРЕХОД ОТ МИКРО- К МЕЗОМАСШТАБАМ РАЗРУШЕНИЯ

(дилатированные изображения)



отслоение
сульфида
марганца от
матрицы

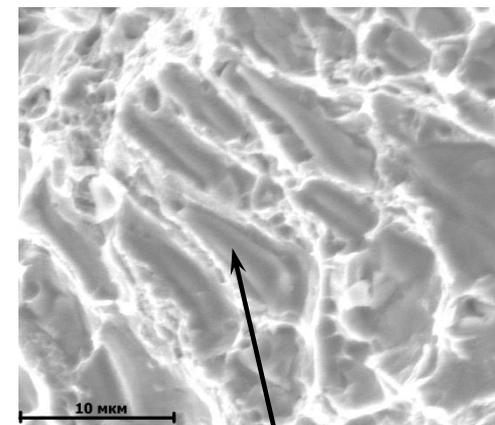
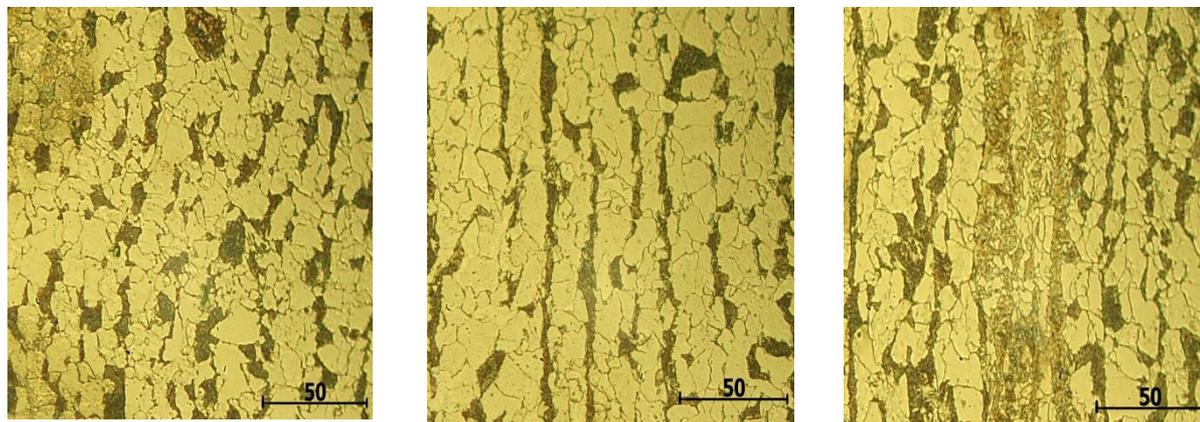
образование и
рост пор
(цилиндров) на
включениях

пластическое
течение
феррита

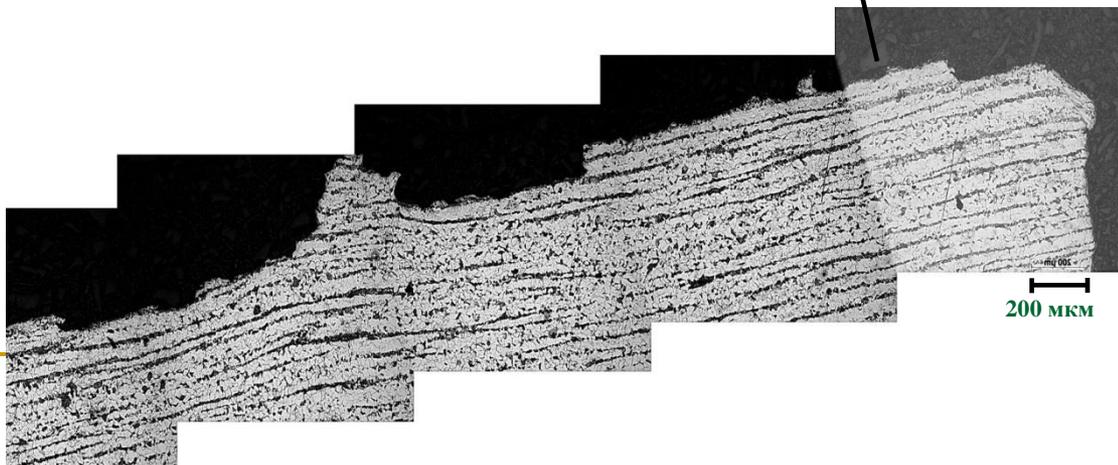
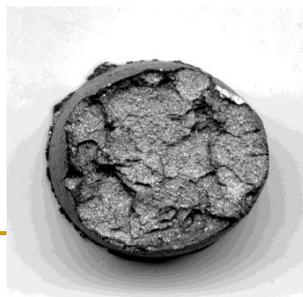
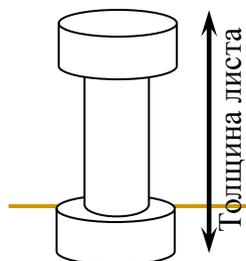
разрушение
перемычек
срезом

образование
шифрообразного
излома

МИКРОСТРУКТУРА, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЕ СТАЛИ 09Г2ФБ



Сталь 09Г2С испытания в Z направлении



Измерение геометрии различных структур для их количественной оценки

(различие в геометрии номинально однотипных структур определяет неоднородность пластичности и вязкости от изделия к изделию)

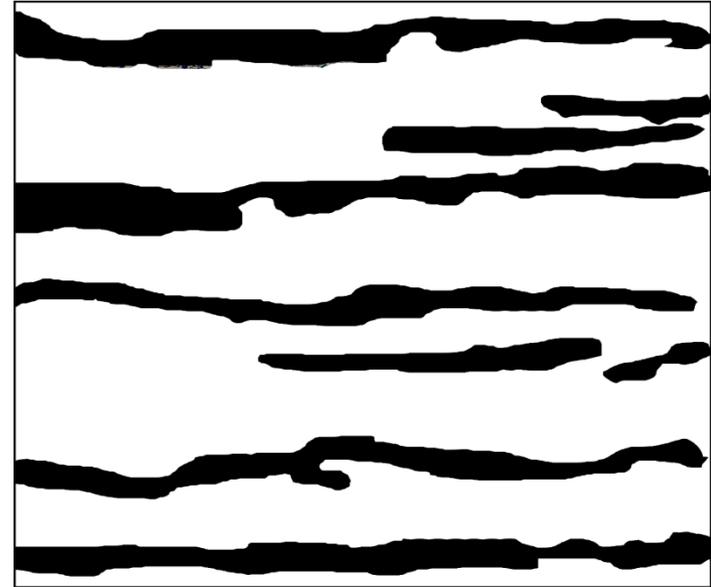
ВЫДЕЛЕНИЕ ПОЛОС ФЕРРИТА В МИКРОСТРУКТУРЕ

Направление прокатки →

Исходное изображение, x 500



Бинаризированное изображение



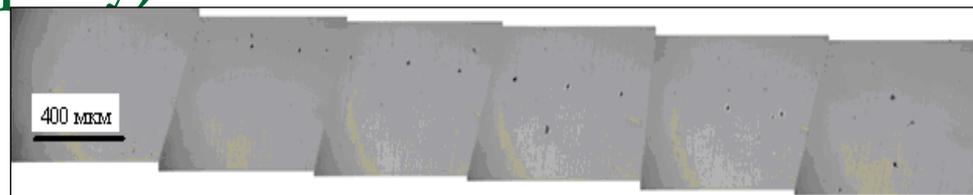
Панорама



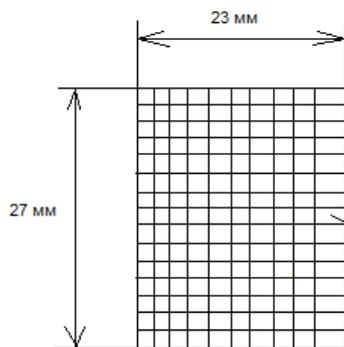
Панорама – «склейка» из 150 кадров (на каждый вариант - производитель), просмотренная площадь – 4...5 кв. мм, соответственно

С использованием программных продуктов измеряются длина ферритных полос, их ширина и угол наклона к направлению прокатки 27

Наблюдение неметаллических включений и микроструктуры (в масштабе образца, склейкой отдельных кадров в панораму)



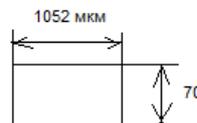
внутр.
часть
трубы



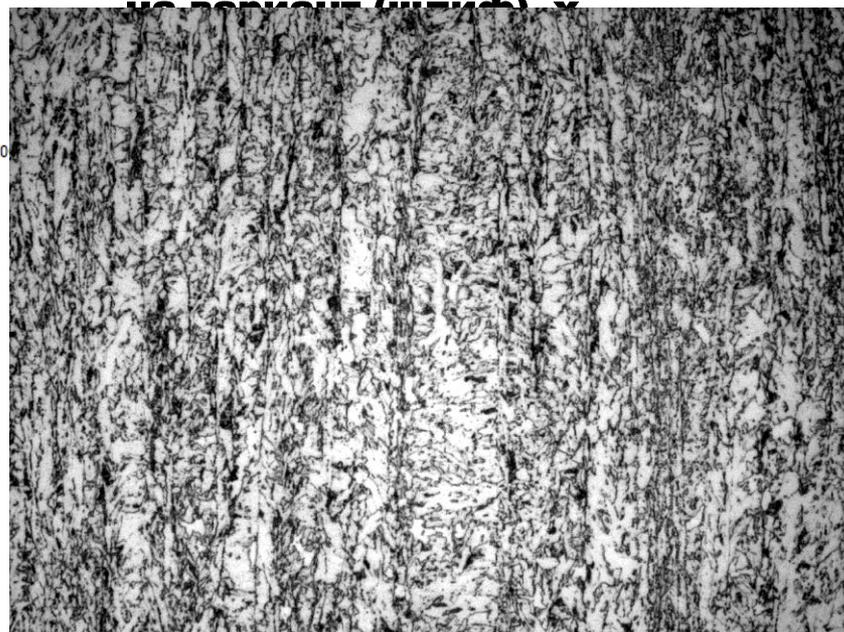
внеш.
часть
трубы

→ НП

Микроструктура

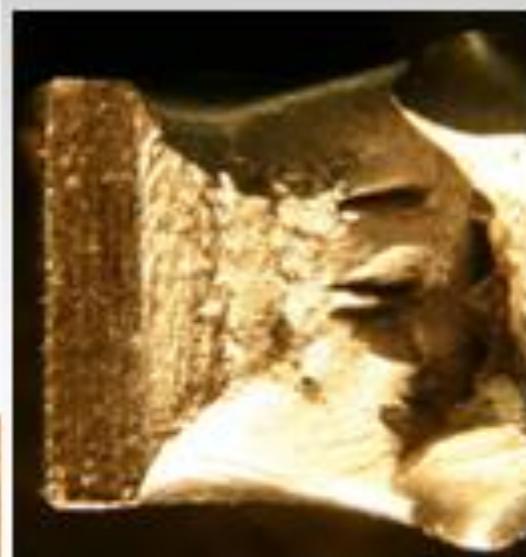
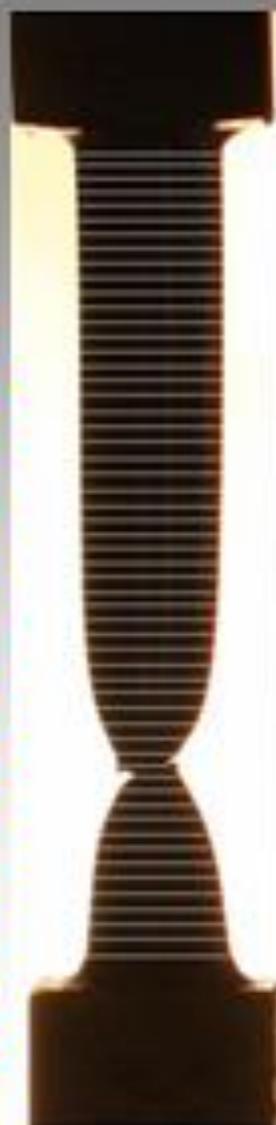
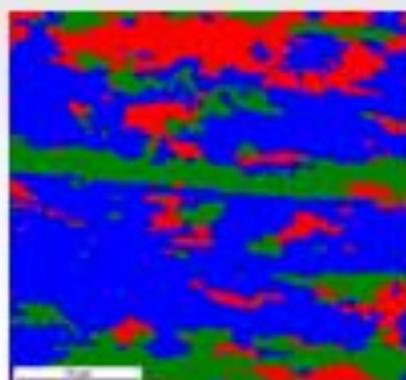
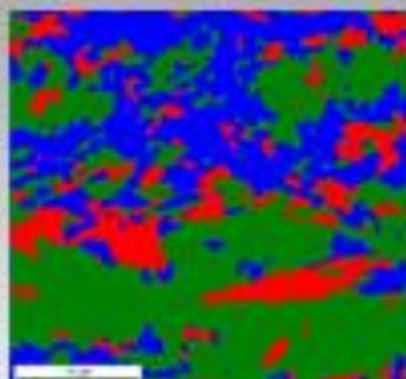
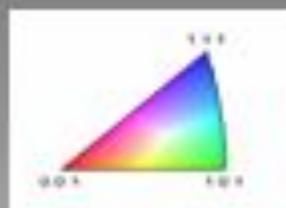


порядка 900-1000
кадров



↔
30 мкм

Прямое сопоставление неоднородности структур и разрушения, штрипс категории прочности К 65



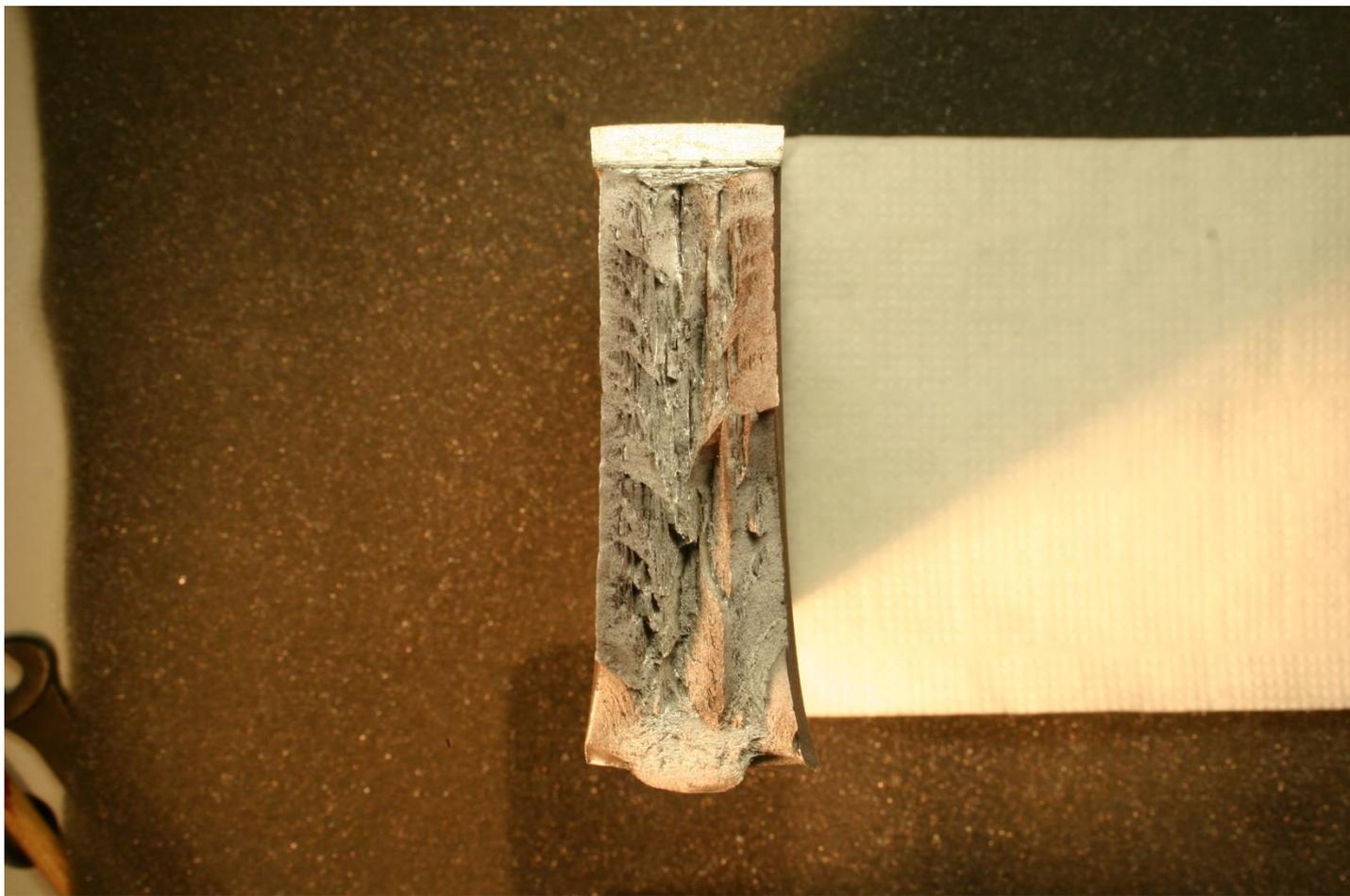
ВЯЗКОЕ ПРОТЯЖЕННОЕ РАЗРУШЕНИЕ (при полигонных пневматических испытаниях)



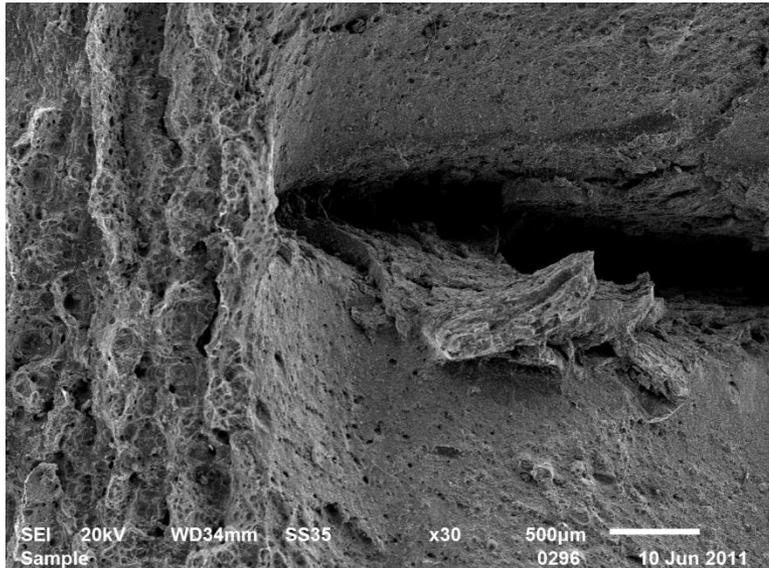
ШИФЕРНОСТЬ ИЗЛОМА



РАССЛОЕНИЯ В ИЗЛОМАХ ОБРАЗЦОВ ИПГ

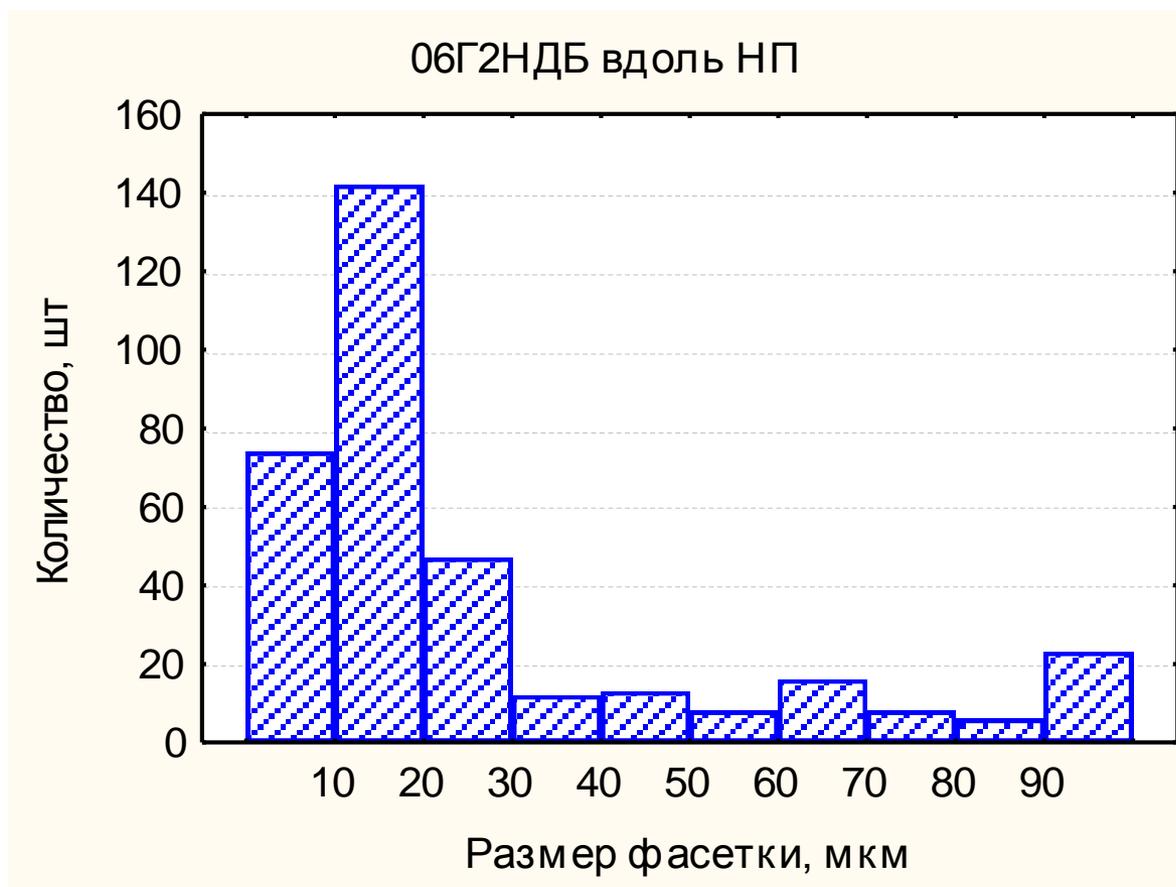


СТРОЕНИЕ РАССЛОЕВ

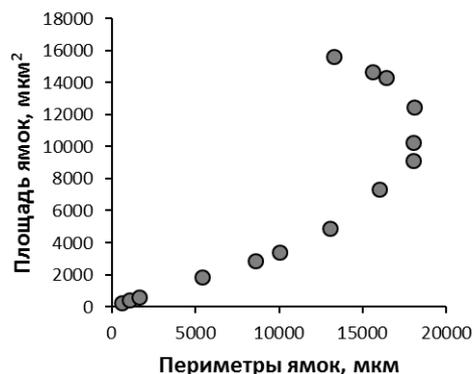
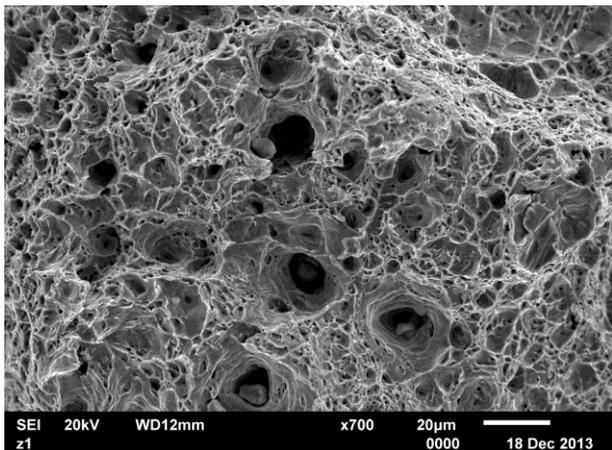


- Возникает в шейке образца при растяжении вдоль плоскости прокатки.
- Сила, растягивающая вдоль поверхности шейки, имеет составляющую по нормали к плоскости листа, которая приводит к продольным разрывам по некоторой «слабой поверхности» в структуре листа. Они расщепляют металл в шейке на стопку лент.
- Начало расслоев прекращает сужение шейки, что определяет полную величину относительного сужения образца ψ и всю суммарную работу его растяжения.
- Шиферность вязкого излома толстого листа - признак пониженной вязкости, и прогноз более резкого падения вязкости при ужесточении условий испытания (эксплуатации).

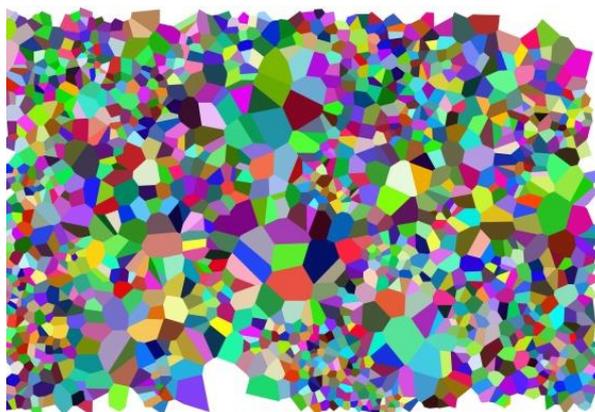
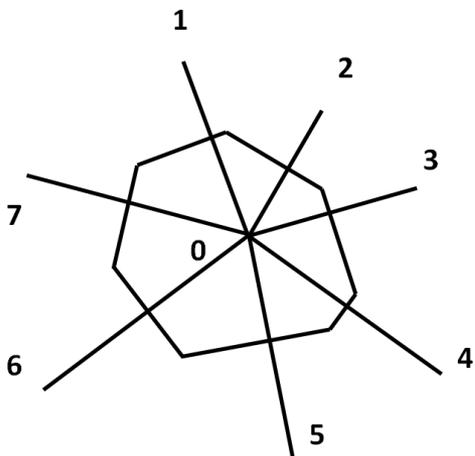
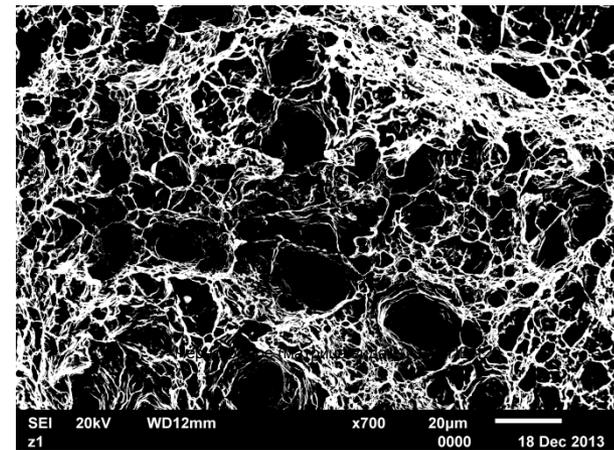
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФАСЕТОК ПО РАЗМЕРАМ В ИЗЛОМАХ УДАРНЫХ ОБРАЗЦОВ СТАЛЕЙ 06Г2НДБ, ВЫРЕЗАННЫХ ВДОЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОКАТКИ



Оценка неоднородности размещения ямок на 2D-изображении (на основе статистики полиэдров Вороного)



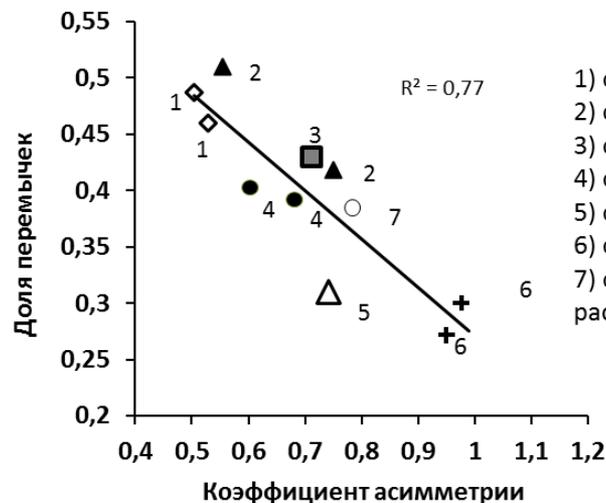
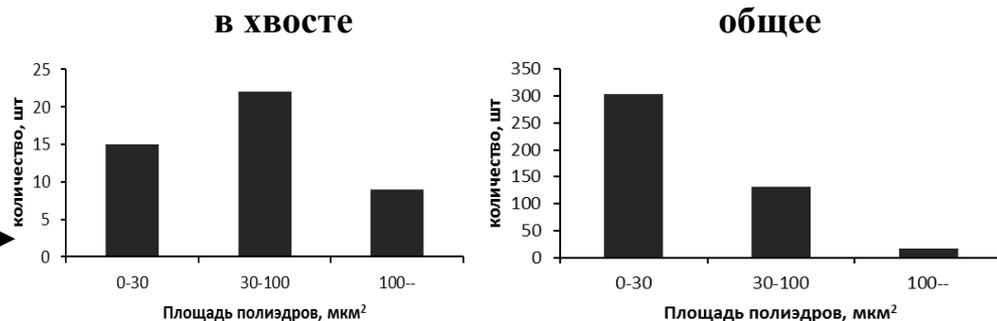
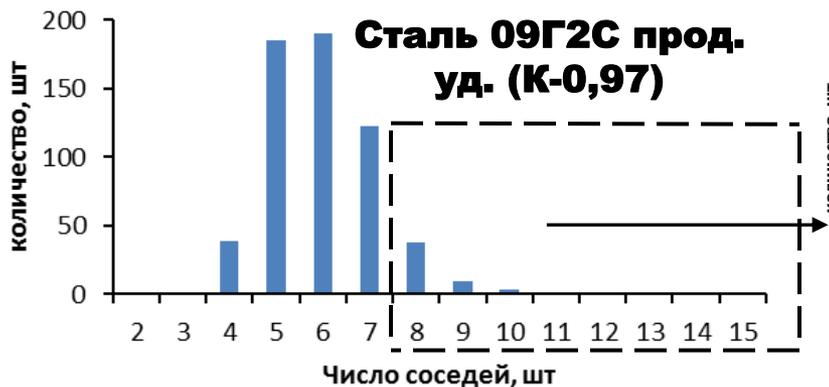
Порог бинаризации варьируется от 1 до 255
Нос кривой соответствует оптимуму изображения



Полиэдры Вороного

Построение осуществляется по центрам масс каждого объекта методом пересечения серединных перпендикуляров: если центры всех объектов 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»

Взаимосвязь кучности ямок и разброса значений ударной вязкости

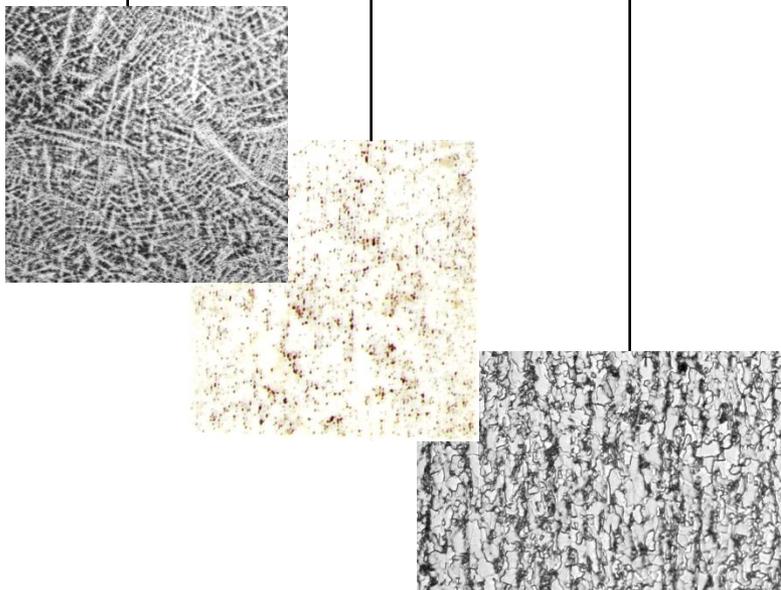


- 1) сталь 38ХНЗМФА-Ш
- 2) сталь 40Х2НМА
- 3) сталь 16Г2АФ
- 4) сталь 15Х2НМФА
- 5) сталь 09Г2С прод раст
- 6) сталь 09Г2С прод уд
- 7) сталь 09Г2С- Z-образец, раст

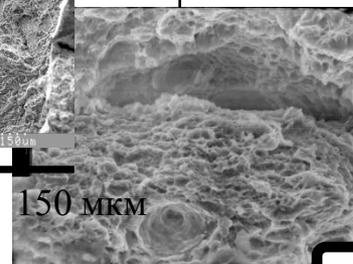
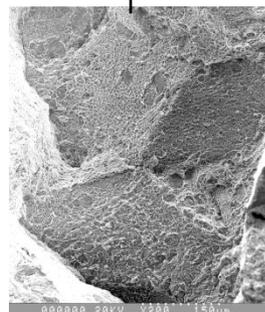
Асимметричность распределения ближайших соседей	Доля перемычек	Диапазон поперечник а ямок	Ударная вязкость
K от 0,53 до 0,97	от 0,53 до 0,28	от 8 до 25 мкм	от 0,58 до 2,8 МДж/м ²

НАБЛЮДЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУР, ПЛАСТИЧНОСТИ И ВЯЗКОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МАТЕРИАЛОВ

Измерение разномасштабных структур



Синтез результатов измерения топографии изломов на трех масштабных уровнях: макро-, мезо- и микро



Лазерный профилограф



Оценка хладноломкости с привязкой к структуре (по измерениям акустической эмиссии на малогабаритных образцах)
 2 см^3 – сериальная кривая

Понимание механизмов разрушения разнообразных структур, исходя из измеряемой статистики геометрии

Структурные и металлургические факторы, лимитирующие разброс пластичности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взаимодействие технологически «неизбежных» разномасштабных структур – причина провалов пластичности и вязкости конструкционных материалов. Только совместный анализ механизмов разрушения разнообразных структур и измерения их неоднородности могут выявить структурные и металлургические факторы, контролирующие различия в процессах разрушения конструкционных сталей при номинально однотипных структурах. Это обеспечит гарантии качества материалов.

Спасибо за внимание!
