

На правах рукописи

Скородумов Сергей Валериевич

СОПОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ВЯЗКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Специальность – 05.16.01

«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2011

Работа выполнена на кафедре металловедения и физики прочности
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Научный руководитель: профессор, д.т.н. А.В. Кудря

Официальные оппоненты: д.т.н. Г.А. Филиппов
(ЦНИИЧЕРМет им. И.П. Бардина)

к.т.н. М.М. Кантор
(ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова)

Ведущая организация: ОАО «Выксунский металлургический завод»

Защита состоится « 23 » июня 2011 года в 15.30 часов на заседании Диссертационного совета Д.212.132.08 при НИТУ «МИСиС» по адресу: 119049, Москва, Ленинский проспект, д.4, в аудитории Б-1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Автореферат разослан « 23 » мая 2011 года

Учёный секретарь диссертационного совета Д.212.132.08

доктор физ.-мат. наук



С.И.Мухин

Актуальность работы

Интенсивное развитие энергетики: строительство транспортных систем высокой производительности, работающих в неблагоприятных климатических условиях; обеспечение безопасности атомных электростанций предъявляет повышенные требования к конструкционным сталям.

Их отличительная особенность – развитая структурная неоднородность. Исследование механизмов разрушения разнородных структур необходимо для оценки критических параметров их геометрии, лимитирующих запас вязкости металла, что существенно как для управления качеством стали, так и при определении остаточного ресурса изделий. Однако преимущественно качественный характер ранжировки структур и вязкости затрудняют оценку механизмов разрушения разномасштабных структур, закономерностей их эволюции (и дефектов) в рамках технологической цепочки. Для проведения массовых, документированных измерений морфологии структур и изломов перспективна разработка соответствующих компьютеризированных процедур.

Цель работы

На основе развитых компьютеризированных процедур измерения неоднородности структур и вязкости оценить закономерности разрушения разнородных структур конструкционных сталей в различном состоянии поставки, особенности их эволюции и дефектов в ходе технологического передела с целью выявления структурных и металлургических факторов, определяющих разброс пластичности и вязкости металла.

Научная новизна

Развиты компьютеризированные процедуры количественной оценки неоднородности структур и изломов в масштабе образца («склежкой» панорам из множества кадров – до 10^3) для сталей в различном состоянии поставки.

Для сопоставления хладноломкости трубных сталей категории К65 и корпусной стали 15Х2НМФА использован принцип максимума правдоподобия при обработке серийных кривых ударной вязкости, дополненный измерением геометрии изломов в интервале температур испытаний от +20 до – 196 °С.

Массовые измерения геометрии изломов ударных образцов выявили их информативные параметры: уширение ударного образца в месте выбега трещины, линейные размеры расслоев «в плане» и морфология размещения хрупкой составляющей в изломе.

Из сопоставления структурных и металлургических факторов вязкости трубных сталей класса прочности К65 выделен определяющий – разрушение по границам раздела полосчатой структуры различной природы.

Практическая ценность

Измерена и количественно оценена неоднородность строения структур и изломов для сталей в различном состоянии поставки.

Оценена эффективность восстановительных отжигов стали 15Х2НМФА при продлении эксплуатационного ресурса корпусов атомных реакторов.

Сопоставлена сопротивляемость разрушению трубных сталей класса прочности К65, полученных у четырех ведущих производителей.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы представлены: на IV и V -ой евразийских научно-практических конференциях «Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2008 и 2010» Москва, 2008, 2010 гг; 64 – 66-х научно-практических конференциях студентов и молодых ученых МИСиС Москва, 2009 – 2010 гг.; 48-й конференции «Актуальные проблемы прочности» и IV-й Международной школе «Физическое материаловедение» Тольятти, 2009 г.; Бернштейновских чтениях по термомеханической обработке металлических материалов, Москва, 2009 г.; VI-й Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов» Черноголовка, 2010 г.;

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, аналитического обзора литературы, четырех глав с описанием методики и результатов исследований, выводов и списка использованных источников из 82 наименований. Работа изложена на 180 страницах, содержит 145 рисунков и 37 таблиц.

1. Материал и методики исследования

В качестве объекта исследования использовали конструкционные стали для труб большого диаметра (ТБД) классов прочности К52 (16Г2АФ), К60 (09Г2ФБЮ), К65 (08Г2ФБ, 08Г2МБ, 07Г2МБ, 06Г2НДБ, 06Г2МФБ), корпусов атомных реакторов (15Х2НМФА); крупных поковок и сорта (38ХНЗМФА и 40Х2Н2МА соответственно) (табл.1).

Структуру (в плоскости излома) и изломы стали 16Г2АФ, полученной по принятой технологии, исследовали на поперечных ударных образцах (тип 11, ГОСТ 9454), сталей 09Г2ФБЮ, 08Г2ФБ на темплетях после испытания падающим грузом (ИПГ). Из четырех темплетов размерами 450 × 330 × 27,7 мм сталей 08Г2МБ, 07Г2МБ, 06Г2МФБ и 550 × 330 × 23 мм из стали 06Г2МФБ были вырезаны (рис. 1а) по 18 поперечных образцов Шарпи для сериальных испытаний и по 2 полнотолщинных темплетя для структурных исследований. Каждый квадратный темплет разрезался на 13 образцов (рис. 1б).

Таблица 1 – Исследуемые конструкционные стали

№	Сталь	Обработка	Состояние поставки	Структура*
1	K52	Контролируемая прокатка	штрипс	Ф+П (полосчатость)
2	K60	Контролируемая прокатка и		Ф (полосчатость по зерну)
3	K65 (X80)	ускоренное охлаждение		Ф+Б+М, (полосчатость)
4	15X2НМФА	улучшение	крупная поковка	Б
5	38ХНЗМФА	улучшение		С
6	40X2H2MA	Закалка + низкий / высокий отпуск	сорт	С или МО

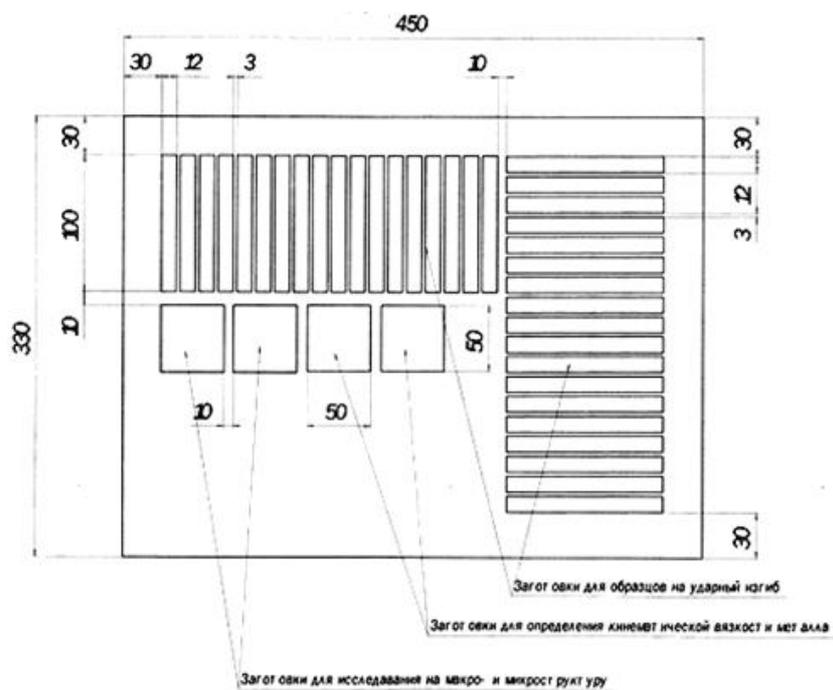
*Ф – феррит, П – перлит, М (МО) – мартенсит (отпуска), Б - бейнит, С – сорбит

Из необлученного металла обечайки корпуса (сталь 15X2НМФА) реактора типа ВВЭР-1000 и металла сварного шва марки 12X2H2MA, изготовленного по принятой технологии, вырезали тангенциальные ударные образцы типа Менаже (ГОСТ 9454). Дополнительная термическая обработка образцов (табл. 2) основного металла (ОМ) и сварного шва (СШ) проводили в вакууме в запаянных колбах. Температура контролировалась термопарами с точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

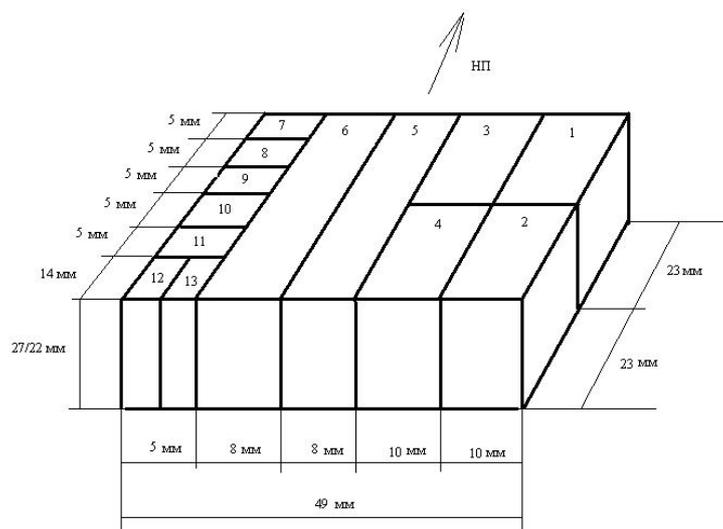
Из проката (сталь 40X2H2MA) были изготовлены ударные образцы типа Шарпи по ГОСТ 9454, термически обработанные по нижеприведенным режимам (табл. 3).

Ударную вязкость измеряли на маятниковом копре Roell Amsler RKP-450 (Zwick Roell) с запасом энергии 450 Дж (трубные стали K65) и 300 Дж в интервале температур испытаний от плюс 20 °C до минус 196 °C, сериальная кривая аппроксимировалась методом максимума правдоподобия [1].

Испытания образцов из трубных сталей класса прочности K65 на растяжение в Z - направлении проводились на универсальной испытательной машине Z250 фирмы ZWICK с механическими зажимами, запись в файл значений силы велась с интервалом 0,2 секунды с погрешностью не более 1% в диапазоне нагрузок 0 - 5000Н. Скорость растяжения -1 мм/мин. Одновременно от кварцевого датчика (резонансный Global Test Gt-301 либо широкополосный ЧТ-100 производства Physical Acoustic Corp.с полосой пропускания 100кГц- 1 МГц) регистрировалась акустическая эмиссия (АЭ).



а)



б)

Рисунок 1 - Схема раскроя темплетов из феррито - бейнитной стали класса прочности К65 (а) и полнотолщинных квадратных заготовок (б): 1,2- образцы для исследования микроструктуры и EBSD- анализа, 3, 4 - образцы для исследования неметаллических включений, 5- образец для травления на макроструктуру, 6 – образец для получения серного отпечатка, 7,8,9,10,11 –образцы на растяжение в Z – направлении с одновременным измерением акустической эмиссии, 12-13 – единый образец для исследования текстуры

Таблица 2 – Режимы термической обработки и ударная вязкость основного металла (ОМ) и металла сварного шва (СШ)

№ режима	Термическая обработка	Ударная вязкость, (ОМ) МДж/м ²	Ударная вязкость (СШ), МДж/м ²
0 (исходный)	Закалка: 920°C (вода), Отпуск: 620°C (25ч)→650°C (20ч)	2,50	1,50
1	Режим №0 + Отжиг: 530°C (10ч)→400°C (87ч)	2,24	1,26
2	Режим №0 + Отжиг: 500°C (10ч)→400°C (67ч)	2,12	1,27
3	Режим №0 + Отжиг: 500°C (100ч)→400°C (67ч)	2,15	1,20
4	Режим №0 + Отжиг: 470°C (100ч)→400°C (47ч)	2,08	1,30

Таблица 3 – Ударная вязкость (МДж/м²) образцов из стали 40Х2Н2МА после различной термической обработки и при разной температуре испытаний (Т_{исп})

Закалка, °С / Отпуск, °С	200 °С	200 °С	600 °С	600 °С
	Т _{исп} = 20 °С	Т _{исп} = -196°С	Т _{исп} = 20 °С	Т _{исп} = -196 °С
850	0,61	0,11	1,20	0,50
1100	0,51	0,09	-	0,49
1200	0,53	0,13	-	0,23

Фрактография проводилась с использованием макросъемки - цифровой фотоаппарат CANON (× 5 - 10) и на микроуровне при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) HITACHI S-800 (× 40 -1000), микроанализ – приставки INCA x-act.

Шлифовку и полировку образцов для исследования структур проводили на станке Buehler Vector Phoenix Beta. Макроструктуру контролировали травлением в подогретом до температуры 80 °С 50 % водном р-ре соляной кислоты в течение 20 минут. Микроструктуру в низкоуглеродистых сталях - после травления в 3% р-ре азотной кислоты в этиловом спирте, зерно аустенита - в пересыщенном р-ре пикриновой кислоты с добавками ПВА.

Микротвердость отдельных структурных составляющих измеряли на микротвердомере Buehler MicroMet 5100 по методу восстановленного отпечатка, диагонали которого измеряли на оптическом микроскопе AxioVert 200MAT.

Загрязненность неметаллическими включениями оценивалась по панорамам изображений шлифа в соответствии с ГОСТ 1778 с использованием программных продуктов Adobe Photoshop и Image Expert 3, сульфидов – по серным отпечаткам ГОСТ 10243.

В трубных сталях класса прочности К65 в трех областях штрипса по толщине (осевой промежуточной и внешней) измеряли с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 600 FEG с полевой эмиссией и приставкой EBSD дифракцию обратно рассеянных электронов. Была получена карта распределения ориентировок кристаллитов (относительно системы координат, привязанной к исследуемому образцу), с раскраской в цвета, соответствующие стереографическому треугольнику обратной полюсной фигуры, статистика их размеров, отображение текстурных компонент на полюсных фигурах.

2. Масштабы структурной неоднородности в конструкционных сталях и их роль в появлении разброса качества сталей

Неоднородность структуры нередко есть следствие ликвации. Её макропризнаки (зональная ликвация) были наиболее характерны для крупных поковок из стали 38ХНЗМФА с сохранившейся литой структурой (рис. 2), мезонеоднородность структуры (дендритный рисунок) была также и в стали 15Х2НМФА, осевая ликвация присутствовала в листе.

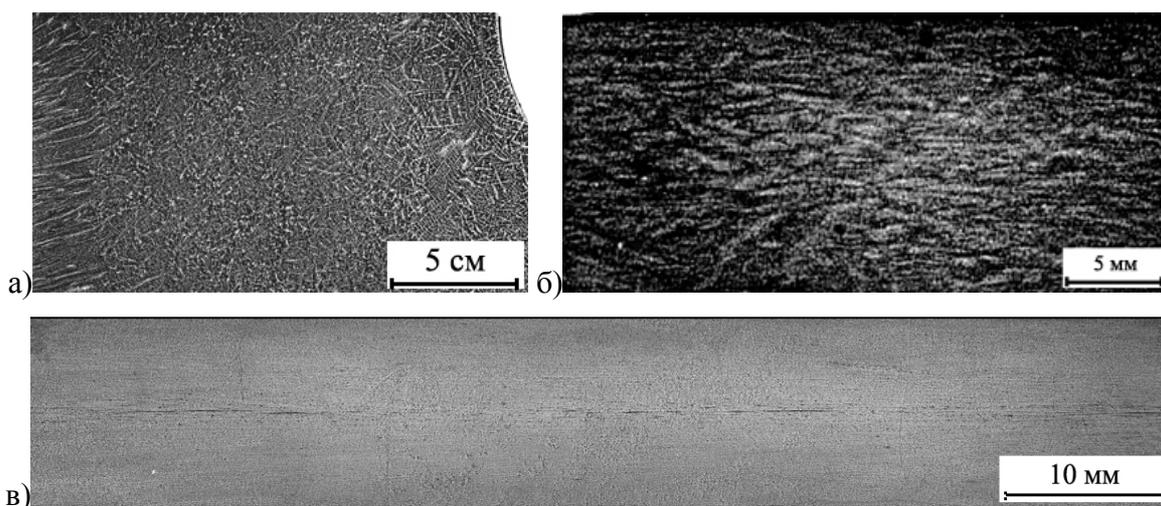


Рисунок 2 – Зональная и дендритная ликвация в поковках из стали 38ХНЗМФА (а), дендритный рисунок (б) в стали 15Х2НМФА и осевая ликвация в трубных сталях класса прочности К60

Дальние последствия ликвации неизбежны даже при достаточно хорошо отлаженной технологии из-за существования пучка траекторий процесса, в рамках широкого поля допуска, что приводит к развитой структурной неоднородности. Например, в производстве листа наряду с существенным измельчением (фрагментацией) зерна до 12-14 балла и структурной полосчатости наблюдаются разнообразные по типу, морфологии и составу микроструктуры (рис. 3).

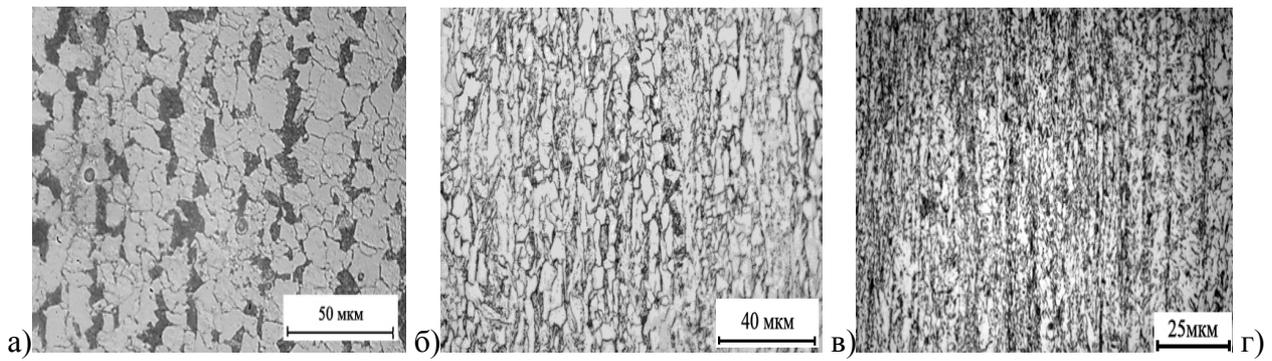


Рисунок 3– Типы неоднородности микроструктур в трубных сталях К52 (а), К60 (б), К65 (в)

Различная геометрия микроструктур – причина неоднородности пластичности и вязкости, например, размах ударной вязкости ($\Delta = KCU_{\max} - KCU_{\min}$) для стали категории прочности К52 составил в условиях действующей технологии 175 Дж/см².

Развитие средств и методов наблюдения и измерения неоднородностей структур и разрушений

Для повышения объективности оценки температуры вязко-хрупкого перехода (ТВХП) в сталях с развитой структурной неоднородностью при построении серийных кривых был использован принцип максимума правдоподобия. Это позволило получить однозначные значения в условиях широкого разброса работы разрушения, типичного для такого типа материала (рис. 4а, б).

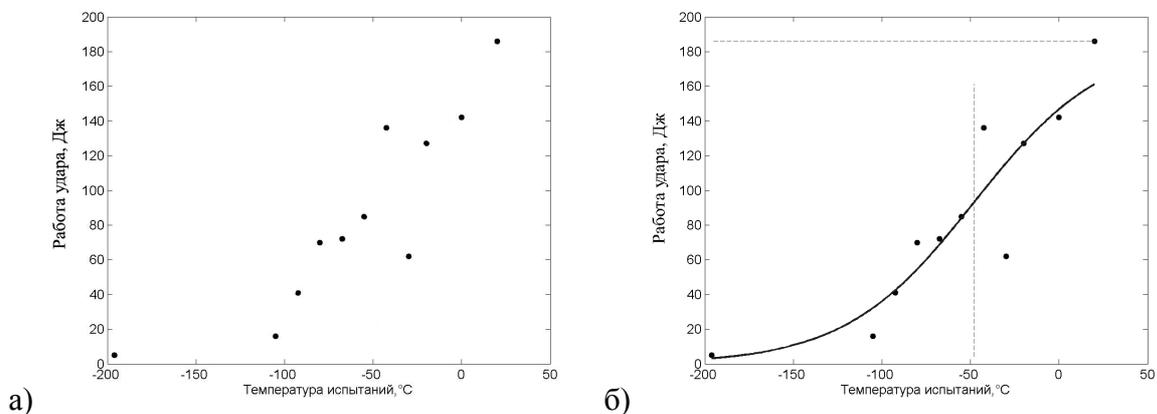


Рисунок 4 - Кривые хладноломкости стали 15X2NMFA: а – экспериментальные значения, б – аппроксимация методом максимума правдоподобия

Для стали 15X2NMFA такой подход в сопоставлении с результатами фрактографии позволил показать, что температурная зависимость доли зернограницной составляющей в изломе с одной стороны имеет немонотонный характер, с другой - прямо не отражает падение ударной вязкости с температурой испытания (рис.5 , табл. 4).

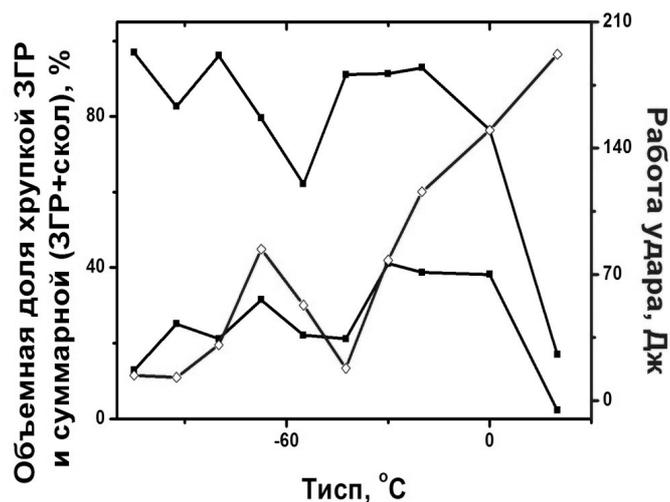


Рисунок 5 - Изменение работы разрушения и доли хрупкой составляющей в изломе с понижением температуры испытания

Таблица 4 – Температура вязко- хрупкого перехода корпусной стали при разных режимах ТО

ТВХП	1режим	2режим	3режим	4режим
Основной металл	-52±17 °С	-20±12 °С	-19±13 °С	-48±18 °С
Сварной шов	-16±5 °С	-22±5 °С	-18±8 °С	-35±9 °С

Для трубных сталей класса прочности К65 с одной стороны дал возможности определить температуры хрупкости в принципе (таблица 5), так и сопоставить стали четырех производителей по хладноломкости (рис. 6).

Таблица 5 – Температуры хрупкости сталей класса прочности К65

Сталь	ТВХП
08Г2МБ	-73±6 °С
07Г2МБ	-142±23 °С
06Г2НДБ	-70±13 °С
06Г2МФБ	-142±15 °С

Отсюда был сделан важный вывод о том, что для прогноза склонности современных трубных материалов к хрупкому разрушению необходимо понижение температур испытания (в сравнении с существующими нормами до -60 С).

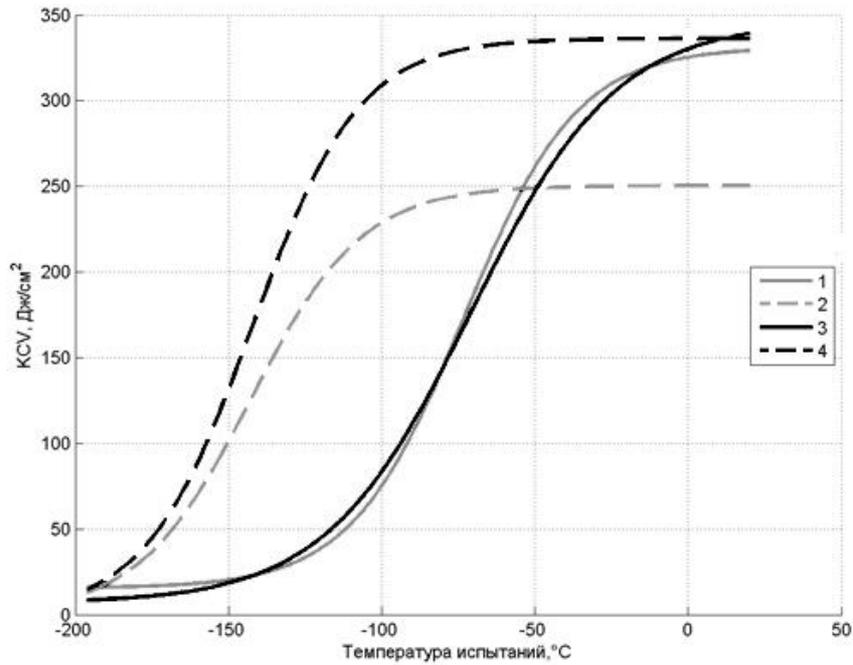


Рисунок 6 - Кривые хладноломкости сталей класса прочности К65:
1-08Г2МБ, 2-07Г2МБ, 3-06Г2НДБ; 4-06Г2МФБ

Для толстого высокопрочного листа с учетом наблюдаемой повсеместно разнообразной структурной полосчатостью были испытаны Z – образцы на растяжение, где разрушение самоорганизуется по самому «грязному» слою. Одновременно производились измерения сигналов АЭ, что в сочетании с диаграммой напряжение- деформация обеспечивало бы возможность реконструкции сценария развития разрушения (рис. 7а, б).

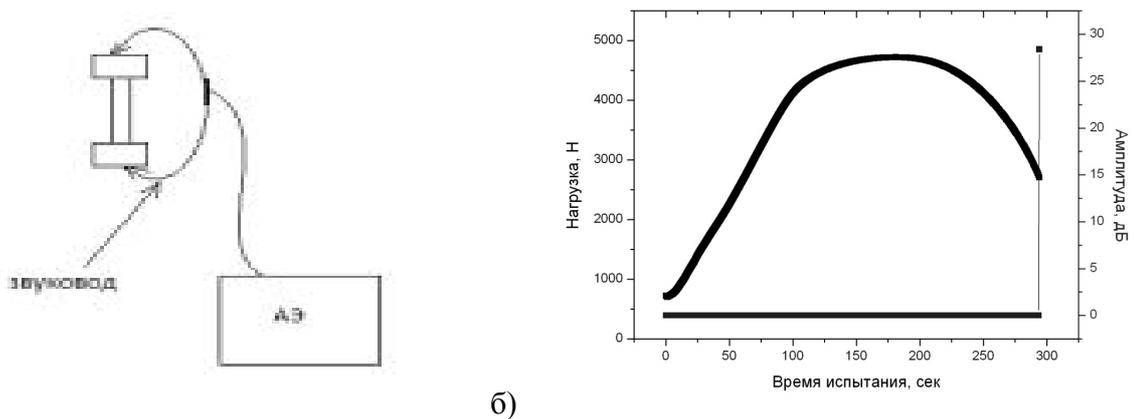


Рисунок 7 - Испытания Z-образцов на растяжение с применением АЭ: а) схема измерения, б) сопоставление диаграммы растяжения с сигналами АЭ

Такие испытания на растяжение (в сочетании с фрактографией) показали, что после сужения в шейку разрушение идет либо по «слабым» поверхностям с образованием хрупких площадок с дальнейшим расслоением листа на пучок лент, разрушающихся вязким срезом, либо по типу «чашечка- конус» без значимых сигналов АЭ до окончательного разделения

образца. При этом была обнаружена вытянутость изломов ряда образцов в направлении прокатки, что является признаком анизотропии структуры (рис. 8а) и группы включений различной морфологии, не всегда наблюдаемых металлографически (рис. 8 б).

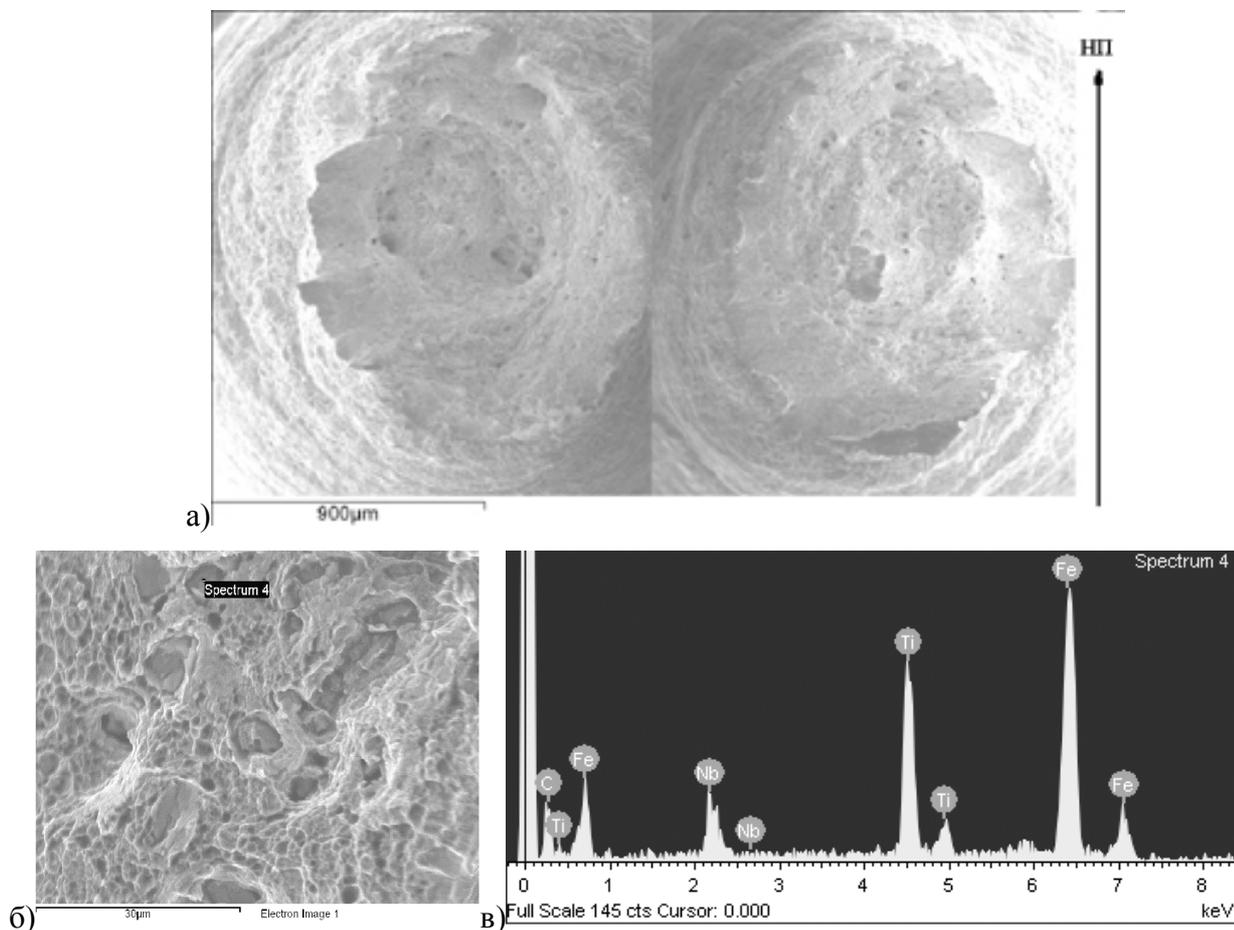


Рисунок 8 - Изломы Z-образцов на растяжение (а), скопления включений (б) и их состав (в)

Это справедливо и для таких сталей, как 16Г2АФ, где при 0,012%S серный отпечаток не всегда выявляет морфологию неметаллических включений, и только в изломе можно обнаружить причину снижения ударной вязкости - отстой по границе раздела ниток сульфида марганца и примыкающих к ним полосок перлита.

Поверхность разрушения дает существенно больше информации, чем это предусматривается нормативными документами. Например, для изломов ударных образцов из стали 15Х2НМФА построение карт распределения зернограницной (ЗГР) составляющей по панорамам, покрывающих всю площадь излома, выявило природу несоответствия ТВХП и доли ЗГР (рис.9) в изломе.

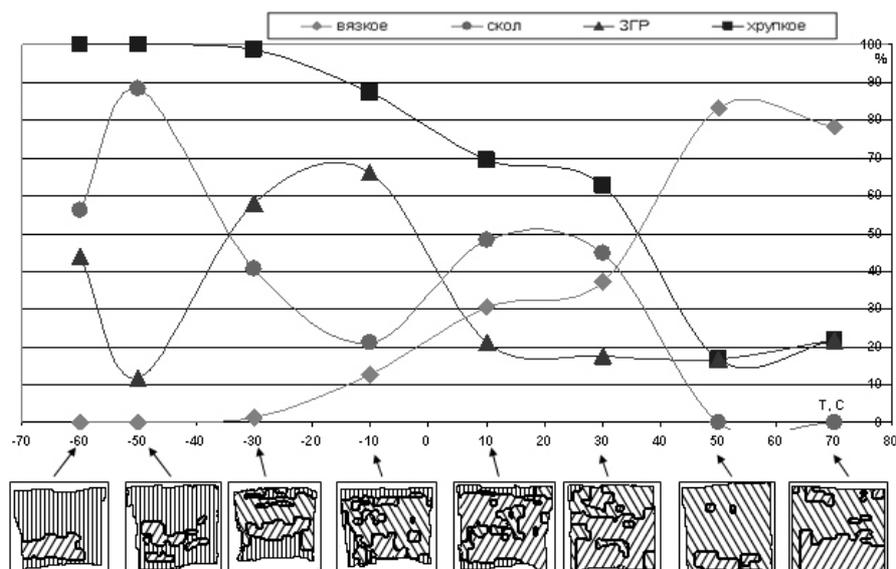


Рисунок 9 - Соотношение различных механизмов разрушения на дне макрорупкого квадрата при вариации температур испытания, сталь 15X2NMФА: - вязкий излом, - хрупкий излом по типу скола, - хрупкий излом по типу ЗГР

Истинная природа – в различной морфологии ЗГР составляющей. При равной доле это могут быть либо отдельно рассыпанные ЗГР фасетки (рис. 10а), либо их кластеры (рис. 10б), или зернограничные полосы ликвации (рис. 10в). В последнем случае это смещает ТВХП в область более высоких значений. Такие различия в морфологии составляющих в изломе приводит к широким колебаниям вязкости в целом.

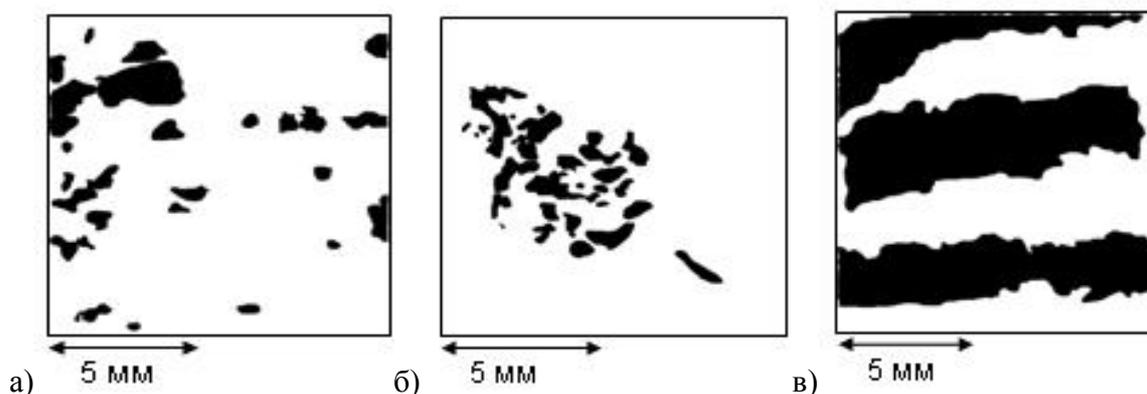


Рисунок 10 - Морфология ЗГР составляющей в изломе, сталь 15X2NMФА

В этой связи существенно больше информации несет в себе и макрогеометрия изломов. Например, оказалось, что в трубных сталях класса прочности К65 наиболее информативен не размер «хрупкого» квадрата, что предписывает обмерять ГОСТ, а величина поперечного уширения при выбеге трещины (рис. 11), дающая прогноз вязкости в стали.

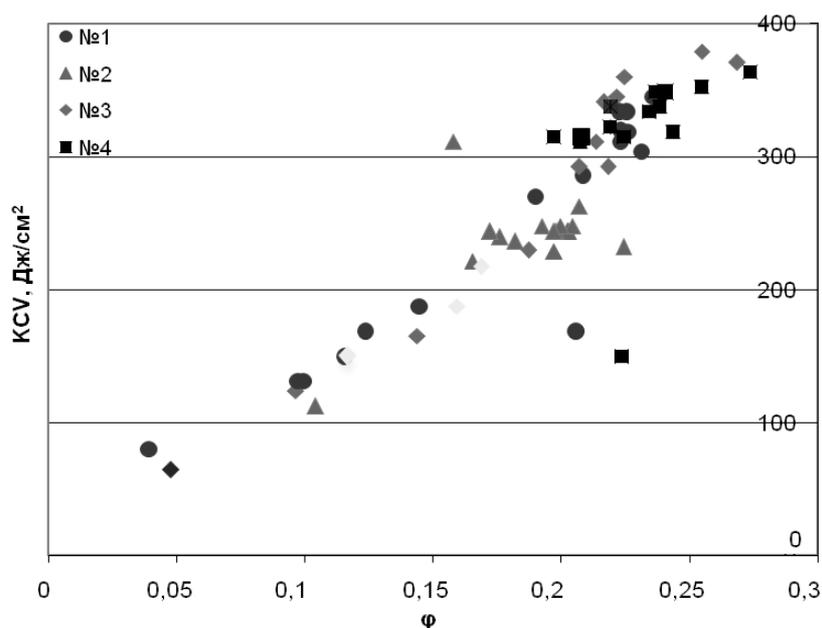


Рисунок 11 - Информативность параметра макрогеометрии – уширения при выбеге - при прогнозе ударной вязкости: 1-08Г2МБ, 2-07Г2МБ, 3-06Г2НДБ; 4-06Г2МФБ

Для выделения более тонких различий в строении изломов необходимо привлечение иных подходов. Например, для стали 40Х2Н2МА в улучшенном состоянии причина разброса ударной вязкости была в неоднородности распределения ямок по дну «хрупкого» квадрата. Ее можно описать с использованием разбиения на полиэдры Вороного. Скопления ямок при этом соответствуют области с близкорасположенными мелкими полиэдрами (рис. 12).

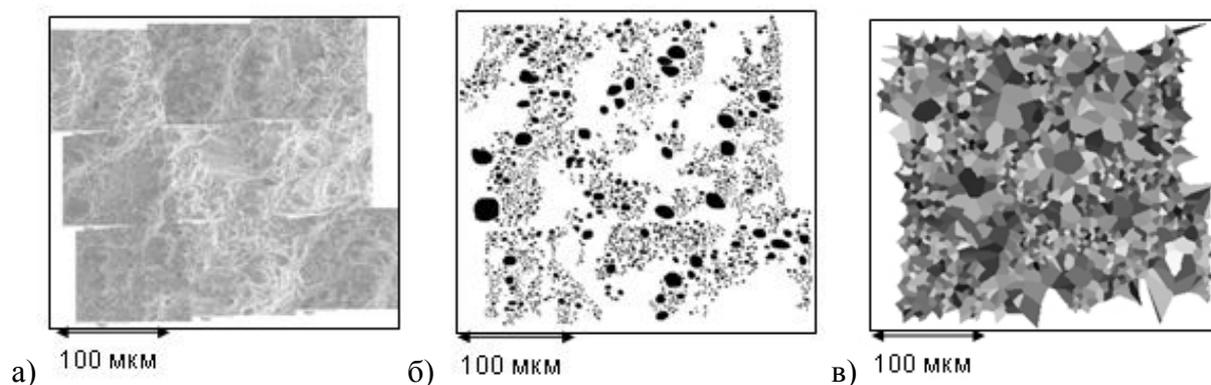


Рисунок 12 – Методика полиэдров Вороного для микропанорам вязких изломов, сталь 40Х2Н2МА

Два хвоста распределения "количества соседей" описывают "пустыри" (где течение легче) и "гнезда" (где легче вязкое разрушение). Их размер и кучность определяют сопротивление малым пластическим деформациям и разрушению. С помощью полиэдров гарантированно выбираются из всех объектов на изображении непосредственные соседи.

Закономерности в расположении объектов на изображении имеют под собой статистическую природу и требуют соответствующих подходов для их описания.

Поиск скоплений включает в себя оптимальную локализацию компактных групп объектов. Для двумерных точечных объектов она основана на построении связного графа – минимального остовного дерева, вершинами которого являются центры масс объектов, а ребрами – соединяющие их отрезки. После разрушения всех ребер минимального дерева, которые нельзя с заданной вероятностью отнести к группе с повышенной плотностью объектов, связный граф распадается на несколько несвязанных подграфов (рис. 13а,б).

В связи с этим локализация основана на обнаружении ребра оптимальной длины r_0 этого дерева и разрушения всех ребер с длиной больше чем r_0 . По критерию Неймана – Пирсона вычислялась величина оптимального порога обнаружения, с риском 1%.

Каждый объект в скоплении является источником потенциального поля, убывающего по силе с удалением от источника. Форма суммарного поля в окрестности любого объекта связана с взаимным положением его ближайших соседей. Граница скопления задается линией уровня поля (рис. 13 в).

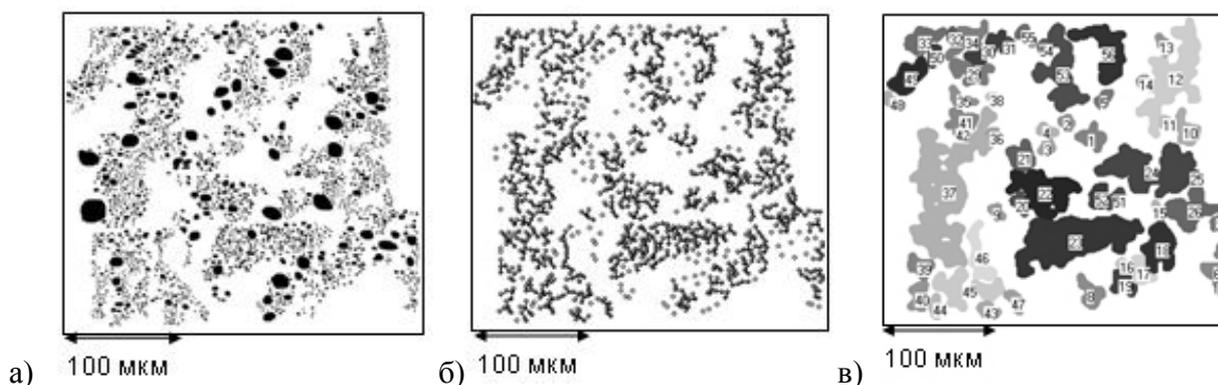


Рисунок 13 – Методика кластеров для панорам вязких изломов, сталь 40Х2Н2МА: а) оконтуренные ямки вязкого излома, б) локализованные группы, в) выделенные кластеры

Таким образом, любое изображение можно описать количеством кластеров, средним расстоянием между ними, средней площадью и средним количеством объектов в кластере, что в целом характеризует неоднородность объектов на изображении.

Для обнаружения природы расслоя (локальных аномалий разрушения, характерных для трубных сталей) весьма полезным оказалась вырезка фрагмента излома с расслоем и последующий его долом для фрактографического анализа в СЭМ (рис. 14). Такой прием позволил показать, что фасетки квазискола имеют определенную ориентацию по отношению к направлению прокатки и месту остановки трещины в расслоем, в их формировании участвует полосчатая структура различной природы (а не строчки неметаллических включений или ЗГР).

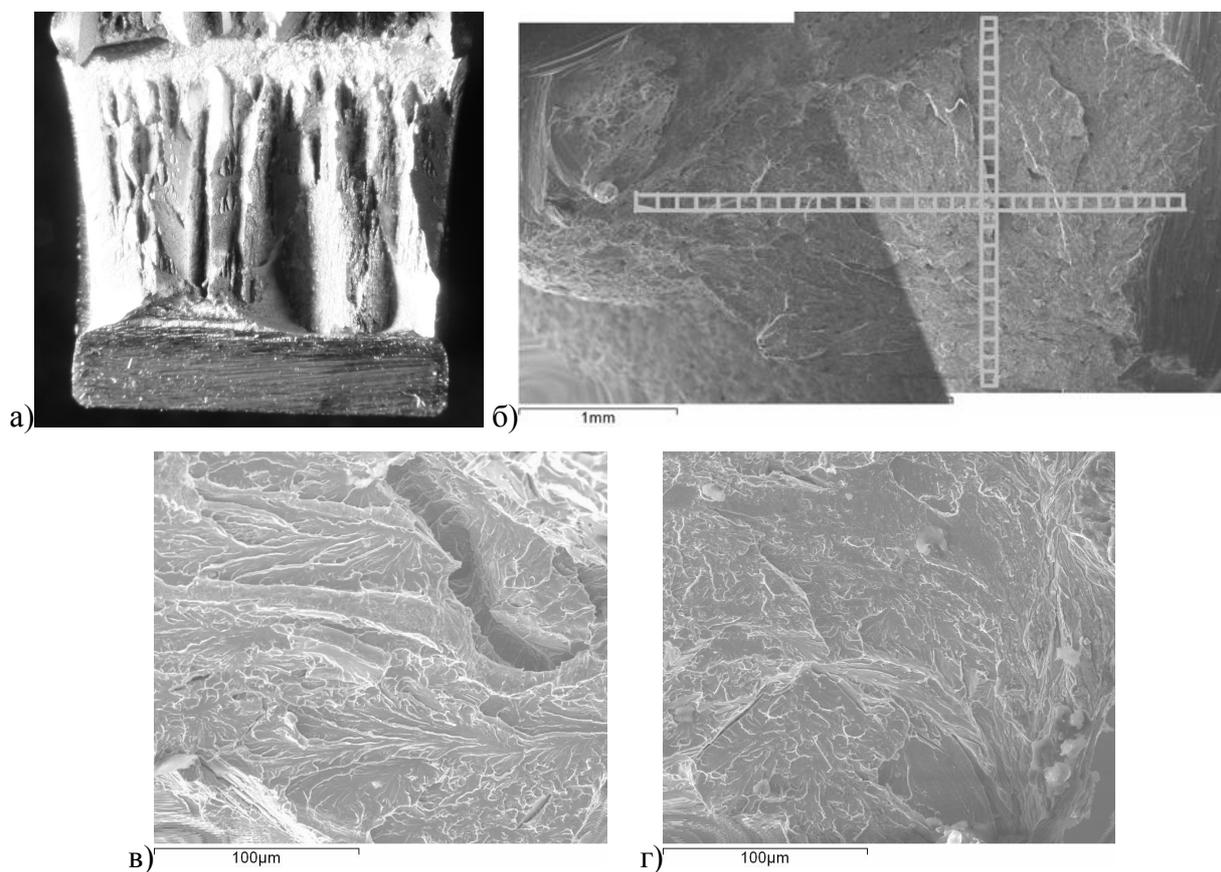


Рисунок 14 – Исследование природы расслоя: а) ударный образец с расслоями; б) схема наблюдения; в) вытянутые фасетки вдоль НП в центральной части расслоя; г) фасетки квазискола вблизи остановки трещины

Такое многообразие механизмов разрушения определяется наличием широкого спектра разнородных структур. Очевидно, что для описания последних, необходимы иные масштабы обработки изображения и использование нестандартных алгоритмов. Для этого получены панорамные изображения макроструктуры, серного отпечатка, размещения неметаллических включений на металлографическом шлифе и микроструктуры в масштабах образца применимо к каждой стали при увеличениях до 1000 крат. Для их обработки использовали компьютерные продукты типа Photoshop, Image Expert и др. Отдельные решения были реализованы в виде программ.

Склейка отдельных кадров с включениями в панораму дала статистику их распределения (на металлографическом шлифе), а микрорентгеноспектральный анализ - их природу (алюминаты, нитриды, силикаты, сульфиды).

Панорамы, полученные на случайном поле шлифа, в ряде случаев выявили строчки включений (длиной до 10 мм), ориентированные вдоль направления прокатки, что не всегда находит свое отражение при статочных испытаниях, но может проявить себя с отрицательной стороны при проведении полигонных пневматических испытаний, где оценивается сопротивляемость металла протяженному вязкому разрушению (рис. 15).

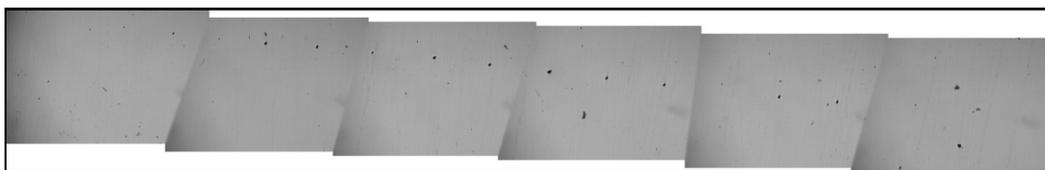


Рисунок 15 – Строчки неметаллических включений в высокопрочных сталях

Неоднородность проявила себя и в микроструктуре. Например, в виде полосчатости, где две смежные полосы представляли собой группы зерен разного размера (рис. 16).

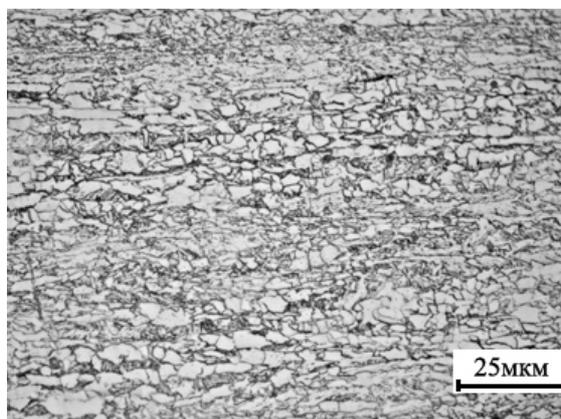


Рисунок 16 – Полосы мелких и крупных зерен феррита в стали класса прочности К60

При номинально однотипной технологии наблюдались и другие формы структурной полосчатости. Например, вытянутые вдоль прокатки полосы полигонального феррита. Для сопоставления географии расположения полос в масштабе образца и неоднородности строения изломов отдельные кадры были сшиты в панораму (рис. 17).

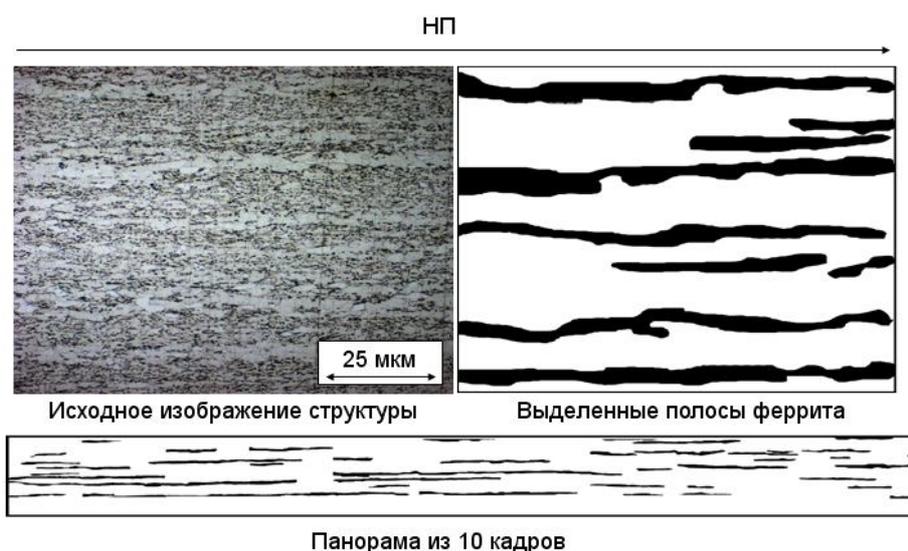


Рисунок 17 – Выделение полос полигонального феррита на изображениях микроструктуры

Такая же процедура была проведена и с целью изучения вариации объемной доли феррита по толщине листа. Это позволило показать, что для однотипных сталей четырех

производителей объемная доля может отличаться до 25 раз, а также наблюдаться различие объемной доли во внутренней и внешней сторонах штрипса более чем в 2 раза (рис. 18), что может быть, в частности, признаком неравномерного охлаждения заготовки.

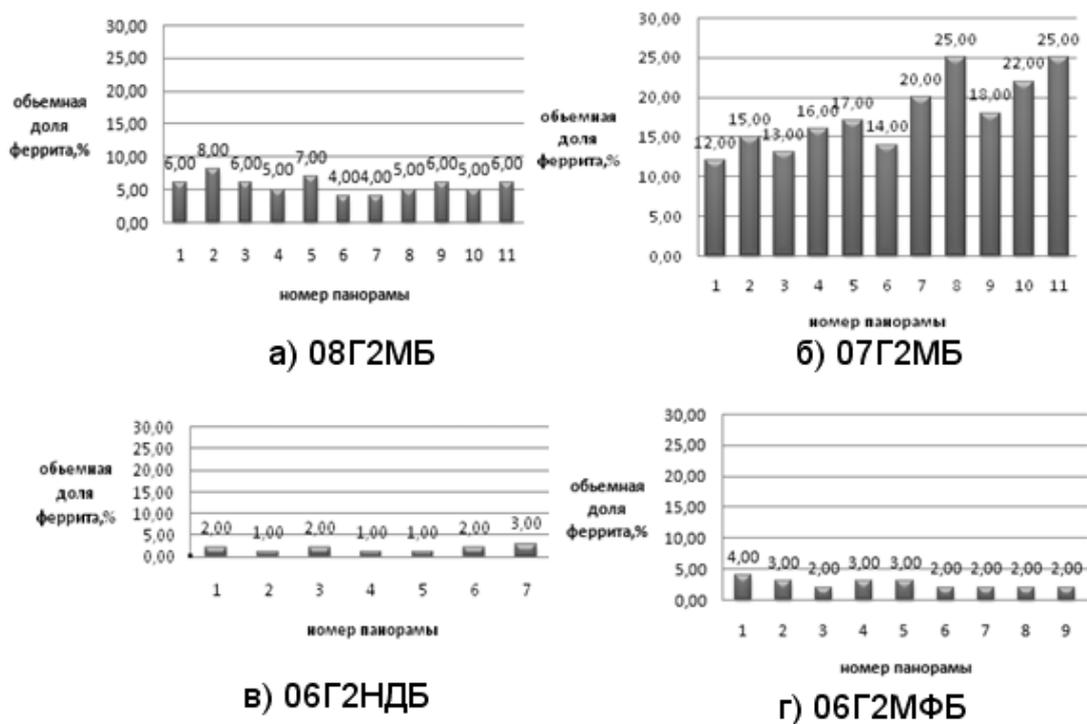


Рисунок 18 – Изменение объемной доли полигонального феррита по толщине листа

Измерение микротвердости с привязкой к полосчатости показало, что ее составляющие - игольчатый бейнит и низкоуглеродистый мартенсит (рис. 19).

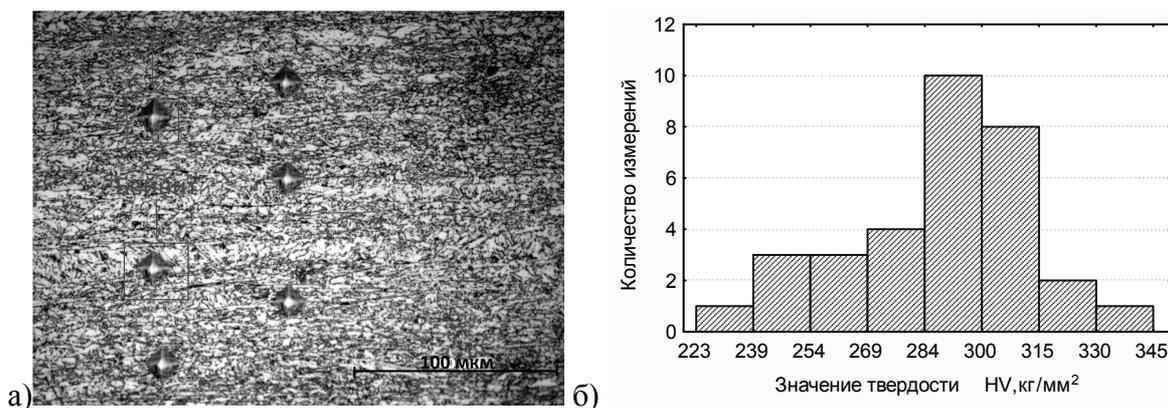


Рисунок 19 – Структурные составляющие (а) и статистика измерений микротвердости (б)

Стали класса прочности К65 отличались мелким зерном (≤ 5 мкм). Это с одной стороны вносит погрешности при их измерении в оптическом микроскопе, с другой обуславливает необходимость анализа их «текстуры». С этой целью проводился EBSD – анализ структуры (рис. 20).

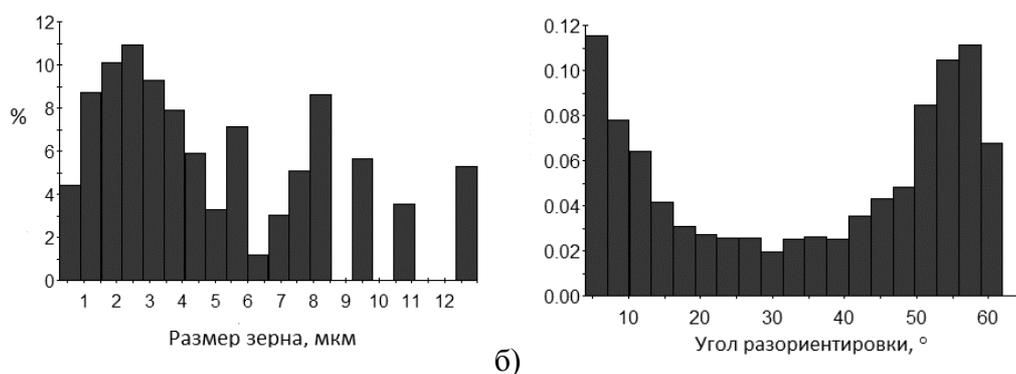


Рисунок 20 – Статистика размеров зерна (а) и углов разориентировки (б) (EBSD – анализ)

Он показал, что даже такие мелкие зерна на качественном шлифе и предельном увеличении $\times 1000$ крат позволяют получить достоверную статистику данных. Выделение текстурных компонент выявило не только соотношение между ними, но и наличие областей одинаковой природы, ориентированных вдоль направления прокатки (рис. 21).

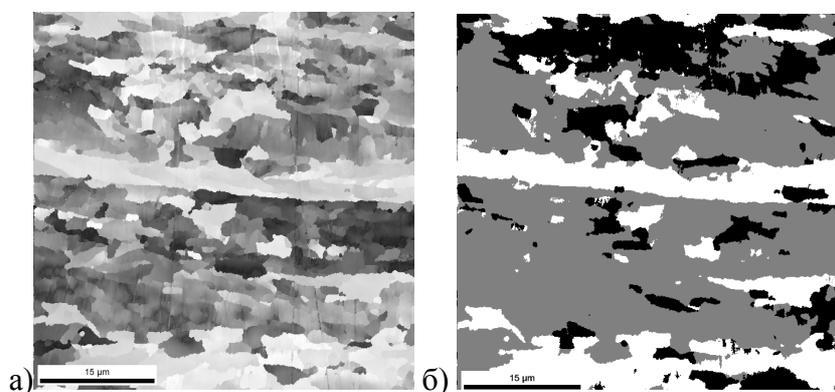


Рисунок 21 – Текстурные полосы: белый –(101), серый– (111), черный - (001)

Развитие методик позволило получить представительные оценки меры неоднородности структур, проследить их эволюцию (и дефектов) в ходе технологической цепочки и описать их коллективное влияние на процессы деформации и разрушения.

Оценка критических параметров разномасштабных структур, определяющих разброс качества однородной металлопродукции

Это может быть (как для стали 15X2НМФА) спектр разномасштабных структур (рис. 22): от слабо выраженной дендритной и серного отпечатка до бывшего зерна аустенита (где две случайные выборки дали различие в среднем размере зерна и его размахе в 2 раза), что в целом формирует различие в строении изломов при переходе от одного образца к другому.

Неоднородность разномасштабных структур (ликвация в центральной части слитка, очевидно, вследствие особенностей кристаллизации при разливке стали) наблюдалась и в поперечном сечении штрипса (К60) с содержанием серы 0,003 % масс (рис. 23).

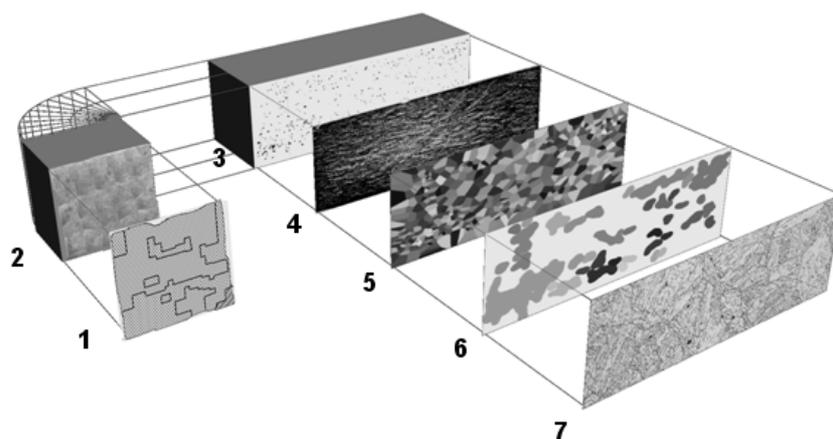


Рисунок 22 - Спектр разномасштабных структур в стали 15X2HMФА: 1) составляющие «хрупкого» квадрата, 2) панорама «хрупкого» квадрата в СЭМ, х40, 3) серный отпечаток боковой поверхности ударного образца, 4) макроструктура боковой поверхности ударного образца, 5) полиэдры Вороного по пятнам серы боковой поверхности ударного образца, 6) кластеры по пятнам серы боковой поверхности ударного образца, 7) микроструктура

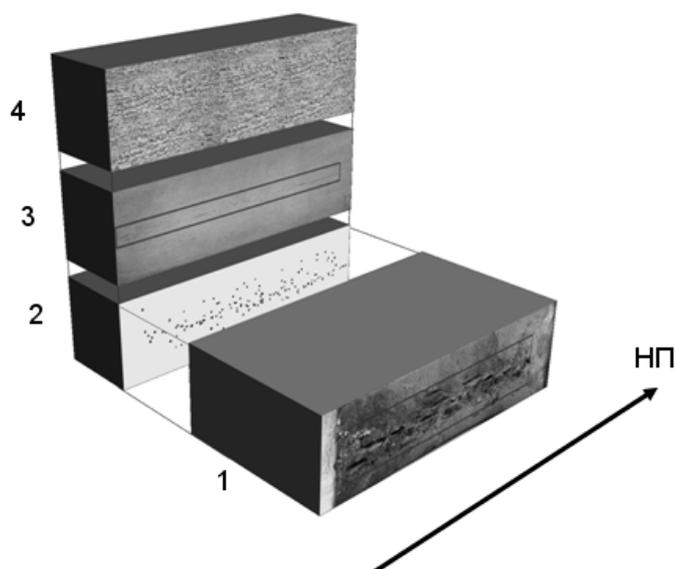


Рисунок 23 – Неоднородности разномасштабных структур, обнаруженных в сталях после ИПГ, сталь класса прочности К60

В трубных сталях совместные сочетания разномасштабных факторов таких, как вытянутые вдоль направления прокатки цепочки неметаллических включений, полосчатая структура различной природы, где отдельные элементы структуры объединены в мезообласти с близкой кристаллографической ориентировкой в сочетании с макроструктурной неоднородностью приводят к массовому появлению расслоев как при ударных испытаниях, так и при испытаниях падающим грузом (рис. 24).

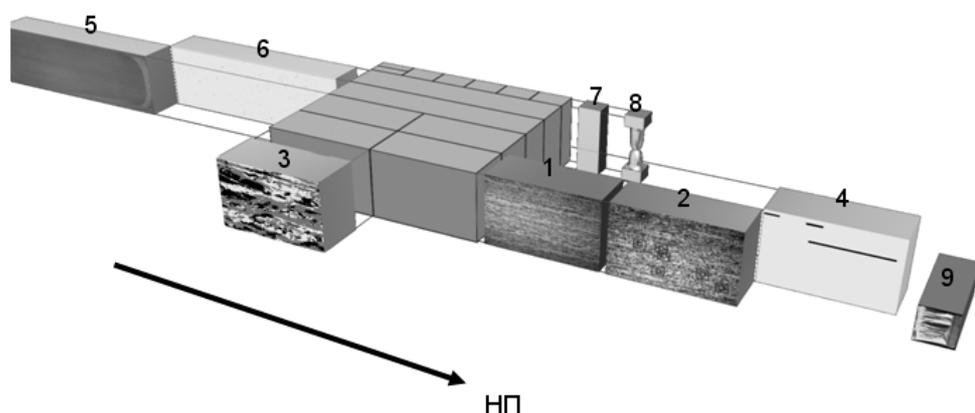


Рисунок 24 - Сочетания разномасштабных факторов в высокопрочных сталях К65:

1) микроструктурная полосчатость, 2) микротвердость структурных составляющих, 3) текстурные полосы, 4) строчки неметаллических включений, 5) макроструктура, 6) серный отпечаток, 7-8) заготовка и Z-образец на растяжение, 9) излом с расслоениями поперечного ударного образца с V надрезом

В этой связи очевидно, что традиционные методы оценки штрипса, например, по доле вязкой составляющей в изломе не всегда могут объективно оценить его качество. Отсюда необходимость привлечения широкого спектра, как методов оценки механических свойств, так и количественных методов измерения неоднородности структур и разрушения, что и было предпринято в рамках настоящей работы. Такой подход является универсальным при оценке качества широкого спектра металлопродукции.

Выводы

1. Для оценки хладноломкости крупных поковок из сталей типа 15Х2НМФА и трубных сталей типа 06Г2МФБ (класса прочности К65) построены сериальные кривые ударной вязкости. Их обработка с предельным извлечением информации (по алгоритмам максимума правдоподобия) показала, что для обнаружения статистически значимых различий и прогнозов хладноломкости необходимо расширение температуры сдаточных испытаний до $-60...-80$ °С, а также «контрольная точка» при -196^0 С.
2. Систематические измерения изломов ударных образцов трубных сталей (класса прочности К65) в интервале температур испытаний от $+20$ до -196^0 показали информативность параметров их макрогеометрии. В частности, уширение ударного образца в месте выбега трещины является хорошо воспроизводимой дополнительной оценкой работы разрушения в интервале хладноломкости.

3. Измерения морфологии изломов ударных образцов показали отсутствие прямой связи между долей хрупкой составляющей и уровнем ударной вязкости в интервале хладноломкости. Работа разрушения сталей типа 15Х2НМФА зависит от размещения хрупкой составляющей (рассеянные зернограничные фасетки, их скопления, ликвационные цепочки), а трубных сталей типа 06Г2МФБ - от появления расслоев.
4. Для количественного анализа структур, текстур и неметаллических включений систематически использован метод «сшивки полей» из множества кадров (до 10^3 снимков). Последовательным переходом от масштаба микроструктур при увеличениях до $\times 1000$ к макрокартине по всей толщине листа (до 30 мм) прослежены различия в ферритной полосчатости и в сульфидной строчечности при разных технологиях производства трубной стали.
5. Методом обратного рассеяния электронов (EBSD-анализ) построены карты распределения ориентировки решетки в зернах размером 2...5 мкм и выявлены различия в текстурной макрополосчатости трубных сталей от разных производителей.
6. Для трубных сталей сопоставлены макро- и микроструктуры и изломы при растяжении образцов «в третьем направлении» и после сериальных испытаний на ударную вязкость. При чистоте стали, достигнутой у четырех производителей, в изломах нет неметаллических включений и зернограничных фасеток. Оставшийся фактор разрушения (и расслоя) - продольные границы раздела между структурными составляющими (полоски феррита, «текстурные полосы»).
7. Предложен метод выделения кластеров однородных объектов из разбиений на полиэдры Вороного. Метод использован для оценки кучности ямок вязкого излома и неоднородности в распределениях включений. Анализом серных отпечатков крупных поковок из сталей 38ХНЗМФА и 15Х2НМФА продемонстрированы различия в ликвации серы в исходном слитке.

Основные результаты диссертационной работы представлены в следующих публикациях:

1. А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, С.В.Скородумов, В.Г. Сухова Границы применения классической статистики при аттестации и управлении качеством конструкционной стали // Известия вузов. Черная металлургия. №11 2010, с. 43-47
2. А.М.Арсенкин, Э.А.Соколовская, С.В.Скородумов, Н.С. Теплухина, Е.Г. Хорева. Оценка риска неоднородности структур в конструкционной стали по наблюдениям изломов// Изв. Вузов.Черн.металл.2009..№11.С.38-41
3. А.В. Кудря, С.А. Никулин, Ю.А. Николаев, А.М. Арсенкин, Э.А. Соколовская, С.В. Скородумов, А.А. Чернобаева, Е.И. Кузько, Е.Г. Хорева. «Факторы неоднородности вязкости

низколегированной стали 15X2НМФА». Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. №9. 2009. С 23-29

4. А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, Т.Ш. Салихов, Д.В. Кудрявцев, С.В. Скородумов. "Совместное измерение разномасштабных структур при оценке причин неоднородности вязкости" // Изв. вузов. Черная металлургия 2009. № 5. С. 41-44

5. А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, Т.Ш. Салихов, М.В. Пономарёва, С.В. Скородумов, М.Г. Глухов. Оценка неоднородности качества листовых сталей // Изв. вузов. Черная металлургия. 2008. № 11. С. 30-36.

6. А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, Т.Ш. Салихов, С.В. Скородумов. Факторы прочности и вязкости трубных сталей // 48-я конференция «Актуальные проблемы прочности». Труды конференции. Тольятти. - 2009. С. 250 – 252

7. Э.А. Соколовская, С.В. Скородумов. Информативность статистических процедур для прогноза свойств материалов при ретроспективном анализе технологии // IV Международная школа «Физическое материаловедение». Сборник трудов. Тольятти. - 2009. - С. 23-25

8. Э.А. Соколовская, Т.Ш. Салихов, А.М. Арсенкин, С.В. Скородумов, Н.С. Теплухина, Е.Г. Хорева. Измерение структур и изломов для прогноза свойств конструкционных материалов // 48-я конференция «Актуальные проблемы прочности». Труды конференции. Тольятти. - 2009. С. – 247 – 249

9. С.В. Скородумов, Е.А. Тепина. Оценка роли неоднородных структур в разрушении высокопрочной трубной стали. // 66-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. Москва. Апрель - 2011. с.39

10. С.В. Скородумов, К.Б. Папина. Структурные факторы вязкости высокопрочных трубных сталей. // 66-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. Москва. Апрель - 2011. с.35

11. С.В. Скородумов, А.В. Калашникова. Оценка роли аномалий структур в формировании разброса вязкости трубных высокопрочных сталей. // 66-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. Москва. Апрель - 2011. с.30

12. Э.А. Соколовская, С.В. Скородумов, И.А. Василенко, Е.Н. Стасюкевич, В.В. Автаев. Наблюдение разнообразных структур компьютеризированными методами. Тезисы VI- ой международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов», 16-19 ноября 2010 года, Черногоровка, с.65

13. А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, С.В. Скородумов, В.А. Траченко. Алгоритмы описания неоднородностей распределения объектов в структурах и изломах

конструкционных сталей. Тезисы докладов V-ой Евразийской научно-практической конференции "Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2010", 20-22 апреля 2010 года, Москва, МИСиС. С. 192.

14. Э.А. Соколовская, Т.Ш. Салихов, С.В. Скородумов, И.П. Котова. Опыт использования алгоритмов "Раскопок данных" заводского контроля для прогноза качества металла. Тезисы докладов V-ой Евразийской научно-практической конференции "Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2010", 20-22 апреля 2010 года, Москва, МИСиС. С. 207

15. А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, С.В. Скородумов, В.А. Траченко, Е.Н. Стасюкевич. Оценка неоднородности разномасштабных структур в конструкционной стали // 65-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. Москва. 2010. С. 58.

16. Э.А.Соколовская, Т.Ш. Салихов, С.В. Скородумов, Е.А. Конюшенко. Аномалии структур и разрушений трубных сталей. // Тезисы научно-технического семинара «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов», 27-29 октября 2009 года, Москва, МИСиС, С. 69

17. Э.А. Соколовская, А.М. Арсенкин, С.В. Скородумов, К.А. Удод, А.Г. Шумских. Методы измерения неоднородности структур и изломов для прогноза вязкости конструкционных сталей. // Тезисы научно-технического семинара «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов», 27-29 октября 2009 года, Москва, МИСиС. С. 68.

18. Э.А. Соколовская, С.В. Скородумов, И.П. Котова, Н.А. Сухарева, В.А. Акименкова. Границы применимости классической статистики при "раскопках данных" производственного контроля в черной металлургии // 64-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. Москва. - 2009. С. 198-199.

19. А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, Т.Ш. Салихов, Д.В. Кудрявцев, С.В. Скородумов. Сопоставление неоднородности структур и разрушения листовых сталей с использованием компьютеризированных методов наблюдения. В сб. тезисов докладов IV-ой Евразийской научно-практической конференции "Прочность неоднородных структур" - ПРОСТ 2008. Москва, 8-10 апреля 2008 года. Издательство "Учеба" МИСиС. С. 186.

Используемые источники литературы

1. М.А. Штремель Информативность измерений ударной вязкости // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 11. С. 37.