

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(институт)

кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
(кафедра)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов
(код и наименование направления подготовки)

Материаловедение и технологии наноматериалов и покрытий
(наименование (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: «Конструктивная прочность стали 45 с ультрамелкозернистой структурой»

Студент	<u>А. В. Улюкин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>Г. В. Клевцов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Нормоконтроль	<u>В.Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель магистерской программы д.т.н., профессор, Г.В. Клевцов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____
(личная подпись)

« _____ » _____ 2017 г.

Допустить к защите

И.о.заведующего кафедрой, к.т.н., А.С. Селиванов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____
(личная подпись)

« _____ » _____ 2017г.

Тольятти 2017

Аннотация

Магистерская диссертация содержит: 91 страницу, в том числе 52 рисунка, 4 таблицы, 60 источников и 1 приложение.

Во введении дана общая характеристика проблем исследования, обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель исследования, сформулированы задачи исследования, определены объект и предмет исследования, научная новизна, практическая значимость, личный вклад, а также указаны структура и объем работы.

В первой главе «Аналитический обзор» проведён аналитический обзор литературных источников по теме диссертации. Описаны общие сведения о материалах с ультрамелкозернистой структурой, методы пластической деформации для получения материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Описаны механизмы и типы коррозии, рассмотрены работы, посвященные коррозионному исследованию УМЗ материалов. Рассмотрены механизмы разрушения металлических материалов при однократных видах нагружения. Описаны элементы механики разрушения при однократных видах нагружения и формирование УМЗ структуры в сталях.

Во второй главе «Материал и методика исследования» обоснован выбор материала, описаны режимы обработки КЗ стали 45 (закалка + высокий отпуск) и предложенные режимы РКУП для получения стали 45 с УМЗ структурой. Описаны методики исследования микроструктуры стали, определения механических свойств на растяжение, методики испытаний стали на ударную вязкость в широком интервале температур и фрактографических исследований изломов, а также методики определения скорости коррозии стали коррозионного повреждения поверхности образцов.

В третьей главе «Результаты исследования» приведены результаты экспериментов и их обсуждение.

В заключении сформулированы главные выводы по магистерской диссертации.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Аналитический обзор литературы.....	9
1.1 Методы интенсивной пластической деформации	9
1.1.1 Метод кручения под высоким давлением.....	10
1.1.2. Метод равноканального углового прессования	11
1.1.3 Метод всесторонней ковки.....	16
1.1.4 Метод "abc" деформации	17
1.1.5 Метод многократной прокатки	18
1.1.6 Метод винтовой экструзии.....	19
1.2 Механизмы и типы коррозии.....	20
1.3 Коррозия УМЗ сталей.....	24
1.4 Механизмы разрушения конструкционных металлических материалов	25
1.4.1 Механизм вязкого разрушения	25
1.4.2 Механизм хрупкого разрушения	29
1.4.3. Механизм квазихрупкого разрушения.....	32
1.4.4. Механизм вязко-хрупкого разрушения.....	34
1.4.5. Механизм смешанного разрушения	36
1.5 Элементы механики разрушения при однократных видах нагружения	38
1.5.1 Основные сведения о механике разрушения.....	38
1.5.2. Пластические зоны и локальное напряженное состояние материала у вершины трещины.....	40
1.5.3 Связь локального напряженного состояния с механизмом разрушения изделий и кинетикой развития пластических зон.....	48
1.6. Формирование УМЗ структуры в сталях.	57

2	Материал и методика исследования.....	63
2.1	Исследуемый материал и образцы.....	63
2.2	Методики исследования микроструктуры	63
2.3	Методики механических испытаний	64
2.4	Методика макро- и микрофрактографических исследований	65
2.5	Методика определения скорости коррозии	67
2.6	Методика исследования коррозионного повреждения поверхности образцов	69
3	Результаты исследования	71
3.1	Результаты исследования структуры и свойств стали 45 при растяжении ...	71
3.2	Ударная вязкость и механизмы ударного разрушения стали 45 после различных видов обработки	73
3.3	Закономерности коррозионного повреждения стали 45 в сероводородсодержащей среде после различных видов обработки	79
	Заключение	84
	Список использованной литературы.....	85
	Приложение А	91

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое распространение получили наноструктурированные материалы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, полученной путем интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности путем равноканального углового прессования (РКУП). Данный класс материалов обладает высокой прочностью и твердостью поэтому данные материалы связаны с производством изделий для работы в экстремальных условиях. Однако с позиции конструкционной прочности материалов, помимо высокой твердости и прочности при растяжении, необходимо чтобы материал обладал высоким значением ударной вязкости в широком интервале температур, усталостной прочностью, коррозионной стойкости и т.д.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных исследованию УМЗ материалов, недостаточно сведений об их конструктивной прочности и механизмах разрушения в широком интервале температур при разных маршрутах и режимах РКУП. Следовательно, этот фактор делает необходимым увеличение информации о прочности и механизмах разрушения при разных видах нагружения, а также о коррозионной стойкости УМЗ сталей, так как для конструкционных применений УМЗ материалов именно эти свойства будут становиться наиболее решаемыми.

Таким образом, актуальность данной работы заключается в исследовании механических и коррозионных свойств стали 45 с УМЗ структурой при новых режимах РКУП, разработанных в УГАТУ.

Цель исследования:

Определить твердость, прочность при растяжении, ударную вязкость в широком интервале температур и изучить механизм разрушения стали 45 с УМЗ структурой, полученной путем РКУП по заданным разработчиками материала режимам, а также исследовать скорость и механизм коррозии УМЗ стали в сравнении с крупнозернистым (КЗ) состоянием стали 45 после стандартной обработки (закалки + высокий отпуск).

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Провести литературный обзор по теме диссертации;
2. Произвести термическую обработку заготовок и изготовить образцы для испытания на ударную вязкость (KCV) и коррозионную стойкость;
3. Определить механические свойства стали 45 в КЗ состоянии после нормализации, закалки и высокого отпуска, а также после РКУП (в УМЗ состоянии);
4. Определить ударную вязкость (KCV) стали 45 с КЗ структурой после закалки и высокого отпуска и с УМЗ структурой (после РКУП) в интервале температур от -196 до 300 °С;
5. Исследовать макро- и микростроение полученных изломов;
6. Провести коррозионные испытания, согласно ГОСТ 9.913-90;
7. Сделать вывод о влиянии РКУП по предложенным режимам на положение вязко - хрупкого перехода и скорость коррозии стали 45 с УМЗ структурой, по сравнению с КЗ состоянием после закалки и высокого отпуска.

Объект исследования:

Сталь 45 с КЗ структурой после закалки и высокого отпуска и с УМЗ структурой, полученной путем РКУП.

Предметом исследования является твердость, прочность при растяжении, ударная вязкость в широком интервале температур, механизм разрушения и коррозионная стойкость стали 45 с УМЗ структурой после РКУП и с КЗ структурой после стандартной обработки.

Научная новизна:

1. Показано, что РКУП по предложенным режимам приводит к сужению интервала вязко - хрупкого перехода стали 45 с УМЗ структурой и смещению его в сторону низких температур, по сравнению с КЗ состоянием стали.
2. Изучен механизм коррозионного повреждения стали 45 с УМЗ структурой.

Практическая значимость:

1. Определены механические свойства стали 45 с УМЗ структурой, полученной путем РКУП по предложенным режимам.

2. Показано, что предложенные режимы РКУП приводят к смещению интервала вязко-хрупкого перехода стали 45 с УМЗ структурой в сторону низких температур на 70-80 °С по сравнению со сталью после стандартной обработки (закалка + высокий отпуск), что благоприятно для конструктивной прочности.

3. Определена скорость коррозии стали 45 с УМЗ структурой, полученной путем РКУП по предложенным режимам.

Положения, выносимые на защиту:

1. Механические свойства при растяжении, ударная вязкость в широком интервале температур и особенности макро- и микростроения ударных изломов стали 45 в УМЗ состоянии.

2. Скорость коррозии и особенности коррозионного повреждения стали 45 с УМЗ структурой.

Личный вклад автора:

Работы, выполненные лично автором:

Написание аналитического обзора. Термическая обработка заготовок для изготовления: а) ударных образцов на КСВ (закалка + высокий отпуск); образцов для коррозионных испытаний (нормализация, закалка + высокий отпуск). Определение размера зерна стали после нормализации на металлографическом микроскопе. Макрофрактографический анализ ударных изломов стали 45 после закалки и высокого отпуска и после РКУП (замер губ среза, утяжки). Изготовление, шлифовка и полировка образцов для коррозионных испытаний стали 45 после нормализации, закалки + высокий отпуск и после РКУП. Измерение твердости стали после различных видов термической обработки и после РКУП.

Работы, выполненные с операторами:

Испытание образцов на растяжение (машина Н50КТ). Испытание образцов на ударную вязкость (Маятниковый копер JB-W300). Микрофрактографический

анализ ударных изломов (Электронный микроскоп Sigma). Анализ поверхности образцов после коррозии (Конфокальный лазерный микроскоп LEXT OLS4000).

Работы, выполненные на стороне:

Получение УМЗ стали 45. Исследование тонкой структуры стали 45 после РКУП на ПЭМ. Проведение коррозионных испытаний образцов.

Апробация результатов исследования:

Результаты и положения, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

1. На девятой международной конференции "Фазовые превращения и прочность кристаллов" памяти академика Г.В. Курдюмова и Второй Всероссийской Молодежной Школы "Структура и свойства перспективных материалов" (г. Черноголовка, 7-11 ноября 2016 г.);

2. На научно-практической конференции "Студенческие Дни науки в ТГУ" (г. Тольятти, 1-25 апреля 2017 г.).

Публикации по результатам работы

В приложении указаны публикации по результатам темы исследования, среди них 1 работа опубликована и 1 работа принята в печать.

Структура и объем работы:

Магистерская диссертация изложена на 91 странице, включая 52 рисунка, 4 таблицы, 60 источников и 1 приложение.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы и приложения.

1 Аналитический обзор литературы

Получение материалов с УМЗ структурой путем ИПД, механизмы разрушения и коррозии металлических материалов

1.1 Методы интенсивной пластической деформации

Распространенными методами получения объемных УМЗ материалов являются [1-5]:

1. "Метод кристаллизации из аморфного состояния (КАС)" [1];
2. "Метод интенсивной пластической деформации (ИПД)" [1].

УМЗ структура в первом методе создается в аморфном сплаве при помощи его кристаллизации. Вторым методом материалы, имеющие УМЗ структуру, получают путем ИПД, таким как РКУП или кручение под давлением, таким образом измельчая зерно материала.

В настоящей работе мы будем рассматривать методы ИПД. При данных методах материалы подвергаются пластической деформации с большими степенями деформации, при относительно низких температурах и в условиях высокого давления [2,6]. В результате деформации при выбранных условиях происходит сильное измельчение микроструктуры до УМЗ состояния.

Для разработки методов ИПД соблюдают определенные критерии: главным образом формирование УМЗ структур с большими угловыми границами, однородность формирования УМЗ структур по общему объему материала, не присутствие механических повреждений и трещин в материале. Важно отметить, что размеры зерен материалов, получаемые при использовании для измельчения методы ИПД, обычно превышают 100 нм [3]. Структура, получаемая при ИПД, отличается большой неравновесностью из-за уменьшения плотности не занятых дислокаций и главным образом в большеугловом характере границ зерен. Из-за этого для таких изделий применяют дополнительные термообработки или пластическое деформирование при высоких температурах и высокой степени

деформации.

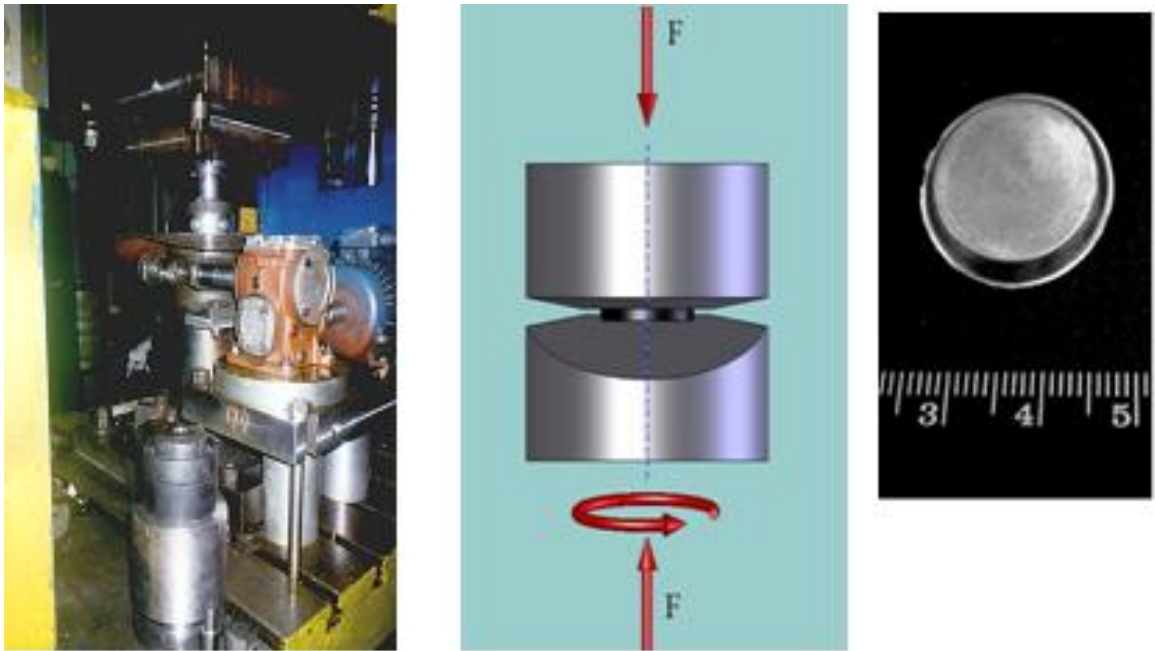
"В настоящее время применяются различные варианты ИПД: РКУП, кручение под гидростатическим давлением, винтовая экструзия, всесторонняя ковка, различные варианты глубокой деформации методом прокатки, комбинированные методы" [1].

"Основные используемые методы, которые измельчают структуру до УМЗ состояния - кручение под гидростатическим давлением (КГД), а также РКУП" [1].

1.1.1 Метод кручения под высоким давлением

"Рассмотрим использование метода кручение под высоким давлением, который основан на принципе наковален Бриджмена. Этот метод также называют кручением под гидростатическим давлением (КГД)" [8-11]. Образцы изготавливают круглой формы диаметром от 10 до 20 мм и толщиной не более 2 мм. Образец для получения УМЗ структуры располагают внутри полости, которая находится в нижнем бойке (рисунок 1.1, б), и прилагают гидростатическое давление величиной не более 10 ГПа. Процесс измельчения до УМЗ структуры с помощью пластической деформации кручением образца осуществляется вращением только одного из бойков. Разная степень деформации достигается путем поворота подвижной наковальни на нужный угол. Использование гидростатического давления позволяет достичь больших степеней деформации и предотвращает разрушение образца.

"Недостатком метода КГД является получение не одинаковой структуры по общему объему металла из-за того, что степени деформации на различном удалении от центра также различны. Это приводит к необходимости предварительно выбирать нужную область у образца для исследования его свойств, так как эти свойства будут существенно отличаться в центре образца и на периферии. Наиболее видимым недостатком метода является слишком уменьшенный размер получаемых заготовок" [7].



а - вид установки КГД; б - схема обработки КГД;
в - вид образца после обработки КГД [12]
Рисунок 1.1 – Обработка методом КГД

1.1.2. Метод равноканального углового прессования

С помощью метода РКУП есть возможность получать достаточно крупные изделия с УМЗ структурой диаметром не более 60 мм и длиной не более 200 мм. Суть метода заключается в использовании деформации сдвига. В результате такой деформации "образец продавливают через два пересекающихся под углом канала равного поперечного сечения" [13]. Для этого метода в основном берут угол 90° . Используемые поперечные заготовки не изменяются при деформации, благодаря этому проводят многократную обработку одного образца, что способствует формированию в материале однородной УМЗ структуры [1,14-16].

Схема процесса РКУП представлена на рисунке 1.2.

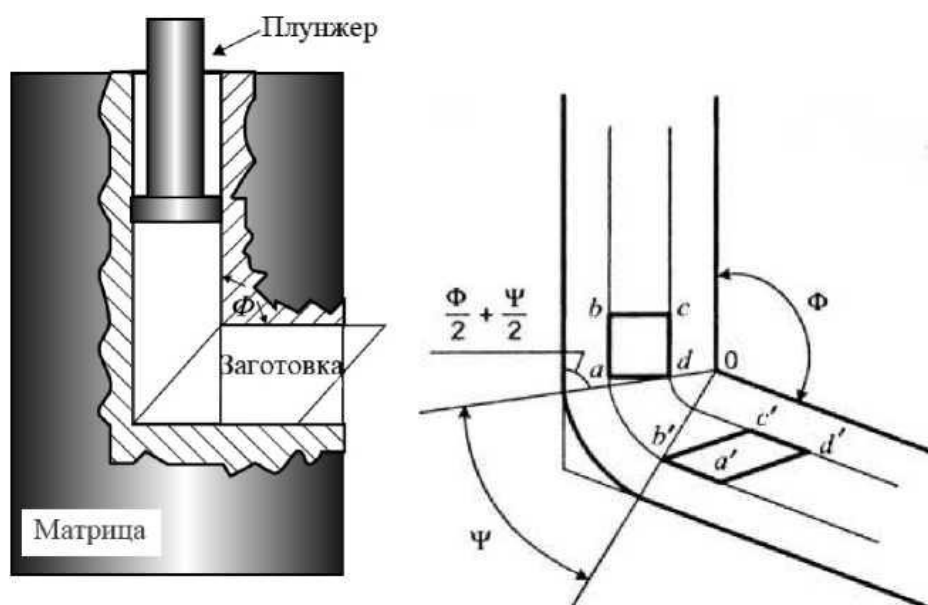


Рисунок 1.2 - Схема РКУП [17-18]

Немаловажное влияние на структурообразование оказывает угол пересечения Φ при РКУП и дополнительный внешний угол Ψ , который назначает кривизну между углом пересечения внешней поверхности каналов. "Степень эквивалентной деформации при РКУП рассчитывается по формуле 1.1" [17-18]:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{3} 2ctg \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} + \Psi cosec \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} , \quad (1.1)$$

"где N - количество проходов каналов прессования" [17-18];

" Φ - угол пересечения" [17-18];

" Ψ - внешний угол кривизны между каналами, рад" [17-18].

"Температура деформации берется ниже температуры рекристаллизации. Низкая температура деформации позволяет получить меньший конечный размер зерна, но имеет более неравновесные границы зерен" [18].

Существуют четыре основных маршрута прессования. Маршрут А -неоднократно повторяющееся прессование изделия без поворота вокруг оси изделия. Наиболее быстрое превращение образцов в УМЗ структуру с высокоугловыми границами происходит при прессовании по маршруту В, который делится на маршруты В_А и В_С. При прессования по маршруту В_А образец поворачивают по направлению часовой стрелки и в противоположную сторону на

90°, а по маршруту В_С образец вращается только по часовой стрелке на 90°. Маршрут С предполагает вращение на 180°.

Для уменьшения времени обработки одного образца была предложена схема РКУП с вращающейся оснасткой (рисунок 1.3).

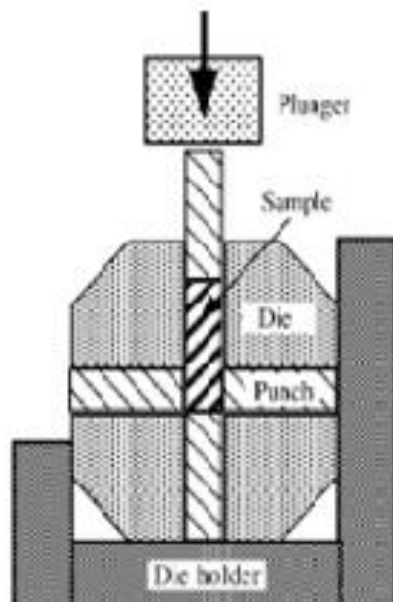


Рисунок 1.3 - Схема обработки РКУП с вращающейся оснасткой [12]

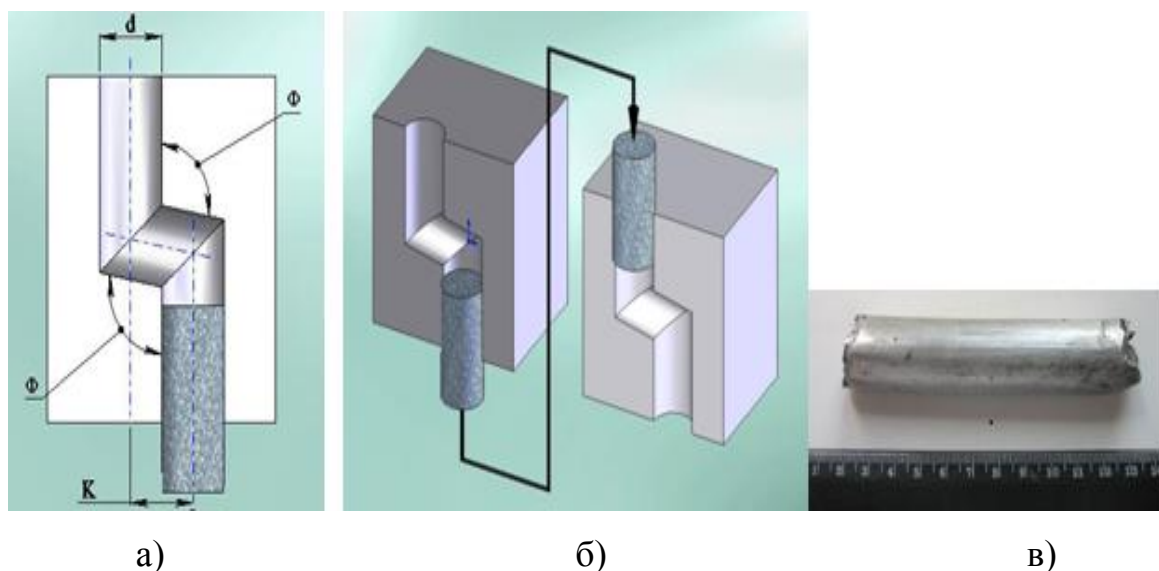
Оснастка состоит из четырех каналов, пересекающихся под прямым углом и имеющих одинаковые размеры поперечного сечения [19]. Вначале процесса РКУП заготовка помещается в верхний вертикальный канал оснастки и упирается в пуансон своим передним концом, который вставлен в нижний вертикальный канал до точки пересечения с горизонтальными каналами оснастки. В хвостовой части заготовки упирается пуансон, помещенный в верхний вертикальный канал. В правый горизонтальный канал оснастки также вставляется пуансон, который упирается в заготовку и в правую стенку оснастки, препятствуя ее продвижению в данном канале вправо. Таким образом, заготовка может продвигаться только из верхнего вертикального канала в левый горизонтальный канал. После первого цикла РКУ прессования оснастка вместе с заготовкой поворачивается на угол 90° по часовой стрелке и цикл РКУ прессования может быть повторен.

Данная схема позволяет значительно упростить процесс РКУП. Уходит

необходимость вынимать и вновь вставлять заготовку в оснастку между проходами. Время РКУП уменьшается более чем на 75%. Становится возможным точно контролировать температуру процесса.

Такая схема РКУП имеет ряд недостатков. "Отношение длины к поперечному размеру образцов при использовании данной схемы мало. Формирование относительно обширной зоны малой проработки материала в входной и выходной частей заготовки приводит к существенной неоднородности как ее структуры, так и механических свойств. В ходе осуществления этой схемы РКУП использование оснастки возможно реализовать только по маршруту А" [12].

"Для внедрения УМЗ материалов в промышленных масштабах метод РКУП развили в два более прогрессивных метода. Метод РКУП в параллельных каналах (РКУП-ПК) представляет собой прессование материала в двух параллельных каналах соединенных переходной зоной под определенным углом (рисунок 1.4)" [12].



"а - Схема РКУП-ПК; б - маршрут обработки РКУП-ПК;

в - образец алюминиевого сплава после обработки

Рисунок 1.4 – Равноканальное угловое прессование

с двумя параллельными каналами" [12]

"В результате использования данного метода ИПД можно в значительной степени повысить коэффициент использования материала и увеличить производительность процесса получения широкого спектра УМЗ конструкционных материалов" [20,21].

"Наиболее действенной модификацией непрерывного метода РКУП, позволяющей получать длинномерные заготовки с УМЗ структурой, является метод РКУП - «Конформ» (Рисунок 1.5)" [12].

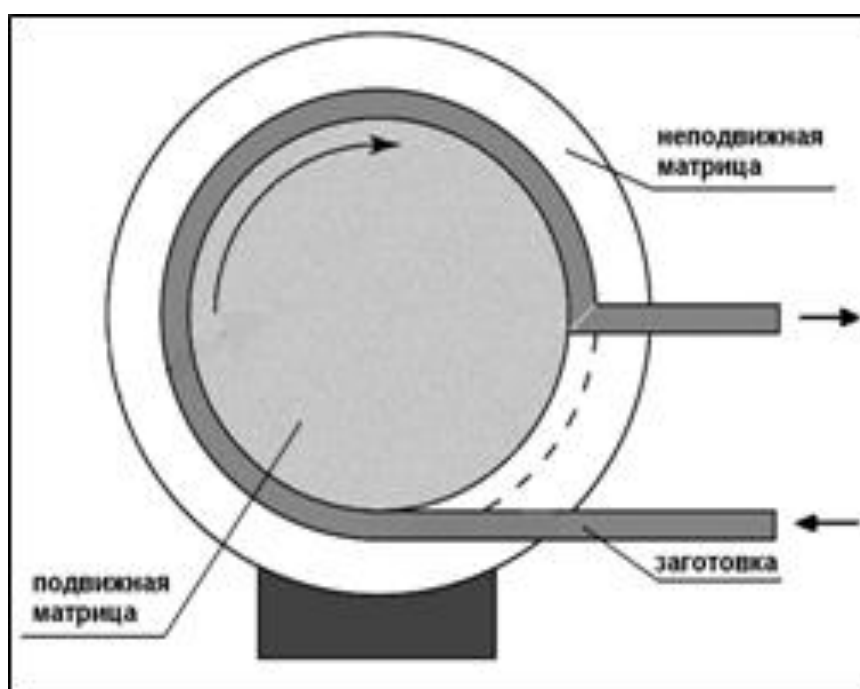


Рисунок 1.5 - Схема РКУП - Конформ [12]

"Это метод при котором материал продавливается не по двум пересекающимся каналам, а по круговой траектории, между подвижной и неподвижной матрицами. При реализации комбинированного процесса РКУП - Конформ сила трения, обеспечивающая проталкивание заготовки, создается с использованием того же принципа, что и в случае традиционного «Конформ»-процесса. Современные исследования демонстрируют, что создание в материале УМЗ структуры и уровень механических характеристик характерный для традиционного метода РКУП достигается и при реализации РКУП - «Конформ». Данный метод может применяться для увеличения прочностных свойств и

формирования УМЗ структуры в металлических заготовках в форме прутков или проволоки" [12].

1.1.3 Метод всестороннейковки

Достаточно известным методом является всесторонняяковка. Данный метод позволяет получать массивные заготовки с УМЗ структурой. Данный метод изначально был предложен Салищевым Г.А. [23-24]. Процессковки включает в себя несколько этапов деформации в изотермических условиях (рисунок 1.6).

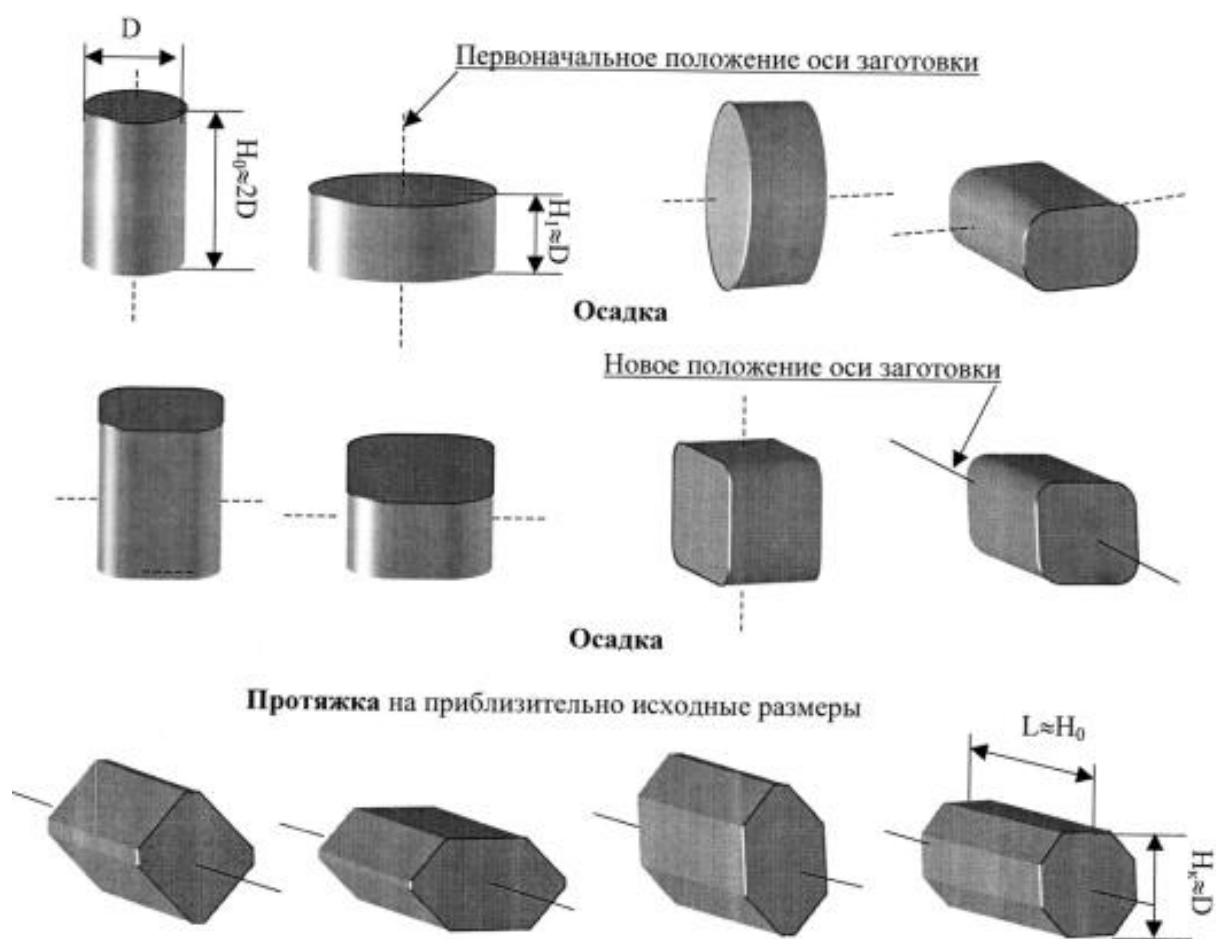


Рисунок 1.6 – Схема всесторонней изотермическойковки [12]

"Последовательность шагов обработки состоит из многократного повторения высотных осадок заготовки со степенью деформации от 40 до 60% и последующей ее протяжки на исходный размер" [25, 26]. "Поворот заготовки

после каждого цикла осадки осуществляется так, чтобы ось ее симметрии была повернута на 90° по отношению к оси предыдущего цикла" [25, 26]. Однородность деформации будет ниже чем при РКУП. Данный метод позволяет получить УМЗ состояние в достаточно хрупких материалах, так как температурно-скоростные условия деформации выбираются таким образом, чтобы обеспечить получение очень мелких зерен" [25, 26].

1.1.4 Метод "abc" деформации

Существует простой вариант многократной осадки так называемый метод «abc» деформация. В рассматриваемом методе используется многократная осадка с поворотом заготовки на 90° относительно оси приложенной нагрузки (рисунок 1.7). Образец изготовлен в соотношении размеров сторон $1,5 : 1,22 : 1,0$, что дает возможность не меняя геометрических размеров при обработке производить деформацию осадкой с поворотом образца на 90° [27, 28].

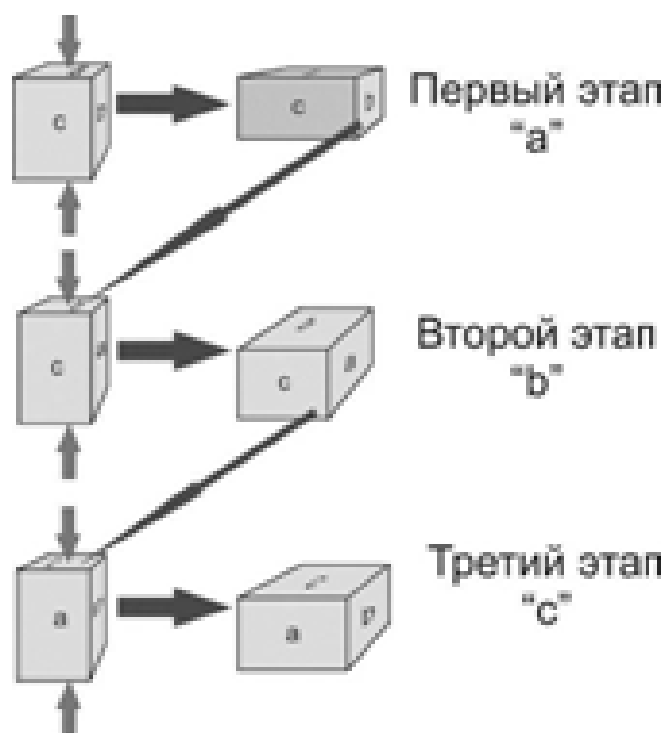


Рисунок 1.7 -3 Схема метода «abc» деформации [12]

Основные достоинства этой схемы состоят:

- в простом производстве, поскольку используется стандартное оборудование;
- есть возможность контролировать изменение механического поведения материала, а деформация может быть остановлена в любой момент времени для анализа микроструктуры.

1.1.5 Метод многократной прокатки

"Для производства длиномерных заготовок тонкого сечения с УМЗ структурой был разработан способ многократной прокатки Accumulative Roll-Bonding. При выполнении данной схемы два листа одинаковой толщины подвергают совместной прокатке (рисунок 1.8)" [29,30].

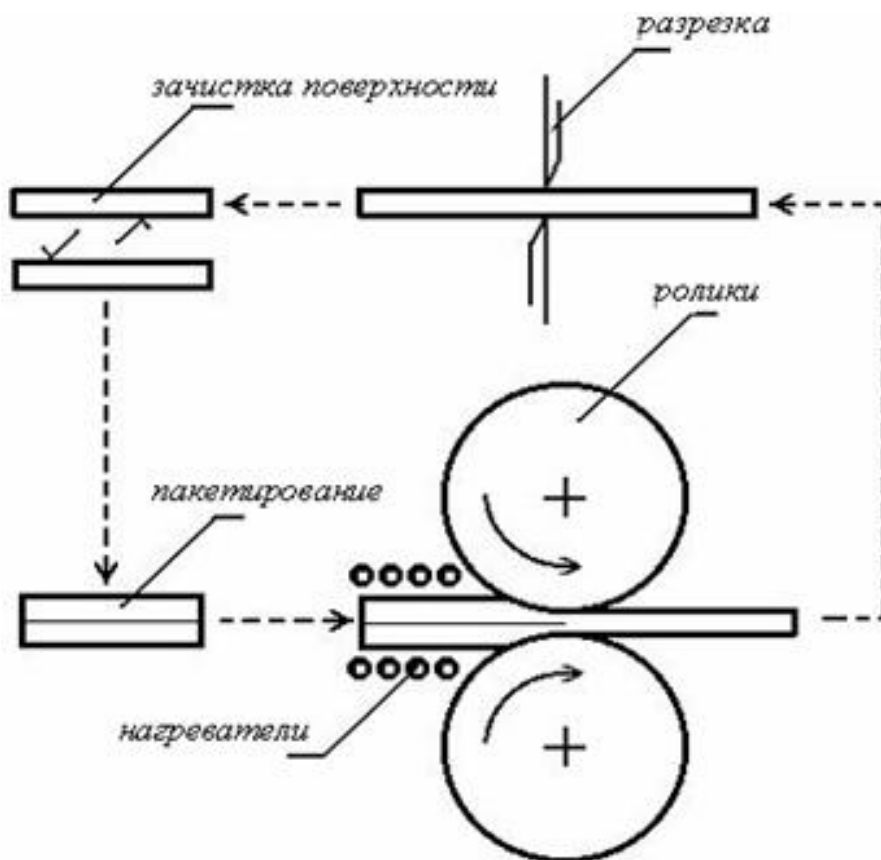


Рисунок 1.8 - Схема многократной прокатки

"После прокатки лист режут на две части, складывается в пакет и прокатывается. В результате многократного повторения этапа прокатки за счет диффузионного взаимодействия в твердой фазе происходит соединение листов между собой и образованием УМЗ структуры" [29,30].

1.1.6 Метод винтовой экструзии

"Метод винтовой экструзии (ВЭ) имеет напряженно-деформированное состояние в образце, а также технологические возможности применения (рисунок 1.9)" [12].

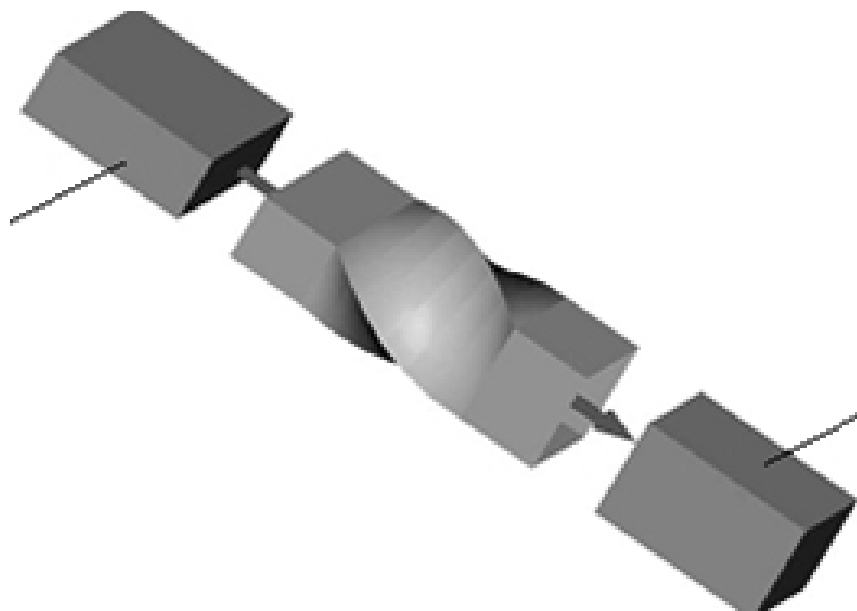


Рисунок 1.9 – Схема винтовой экструзии

"Метод позволяет аккумулировать большие деформации в металлах и заметно измельчать их микроструктуру. Однако ВЭ может приводить к появлению сильной нежелательной анизотропии, например в чистом титане" [31].

Перечисленные методы ИПД позволяют получать УМЗ структуру в различных материалах и сплавах. На сегодняшний день методы ИПД для формирования УМЗ структуры являются предметом активных исследований.

1.2 Механизмы и типы коррозии

Коррозия - это разрушение поверхностного слоя металла происходящее самопроизвольно в результате окислительного химического или электрохимического взаимодействия с компонентами окружающей среды.

"Коррозионные процессы проходят на границе металл - коррозионная (внешняя) среда. В большинстве случаев коррозионный процесс состоит как минимум из трех стадий:

- а) Перемещение корродирующих веществ к поверхности раздела фаз;
- б) Реакция в разделе фаз;
- в) Выход продуктов реакции" [32].

"Классификация коррозии проходит по следующим направлениям: условию протекания процесса коррозии, характеру разрушения и по механизму протекания процесса коррозии" [32].

Коррозионные процессы по механизму протекания делят на следующие виды:

1) Химическая коррозия - это коррозионное взаимодействие металлической поверхности и коррозионной среды. Такой вид коррозии не сопровождается возникновением электрохимических процессов на границе фаз. Процесс протекает равномерно, одновременно окисляя металл и восстанавливая коррозионную среду. Примером такой коррозии служит образование окалины при прокатке раскаленных кусков металла.

2) Электрохимическая коррозия - это коррозионное взаимодействие металла с электролитом в виде водного раствора, редко с неводными соединениями. "При таком виде коррозии, восстановление коррозионной среды происходит не сразу с ионизацией атомов металла и от электродного потенциала металла зависят их скорости" [32].

Условия протекания процессов коррозии делятся на:

1) "атмосферную коррозию - разрушение металлов в атмосфере воздуха, а также любого влажного газа" [32];

2) "газовую коррозию - не конденсирует влага на поверхности металла, который саморазрушается под воздействием газов при высоких температурах" [32];

3) "жидкостную коррозию - коррозия металла в жидкой среде, которая бывает в электролитах и неэлектролитах. В зависимости от варианта взаимодействия коррозионной среды с металлом различают коррозию при полном, неполном и переменном погружении" [32];

4) "подземная коррозия - коррозия металла при взаимодействии с влажной почвой или грунтом. Такая коррозия обусловлена несколькими факторами: коррозионной агрессивностью почв, блуждающими токами и жизнедеятельностью микроорганизмов" [32];

5) "биокоррозия - коррозионное разрушение под влиянием жизнедеятельности микроорганизмов" [32];

6) "структурная коррозия - связанная с неоднородностью структуры металлов" [32];

7) "коррозия блуждающими токами - электрохимическое разрушение металла под влиянием блуждающих токов" [32];

8) "коррозия внешним током - электрохимическое разрушение металла под действием тока от внешнего источника" [32];

9) "контактная коррозия - электрохимическое разрушение, вызванное контактом металлов, имеющих разные стационарные потенциалы в данном электролите" [32];

10) "щелевая коррозия - усиленное коррозионное разрушения в зазорах и щелях в металле, а также в местах неплотного контакта металла с неметаллическим материалом, имеющим коррозионную инерцию" [32];

11) коррозия под напряжением - разрушение при одновременном воздействия внешней среды и механических напряжений. Различный характер нагрузок может вызывать коррозию при постоянной нагрузке и коррозию при переменных;

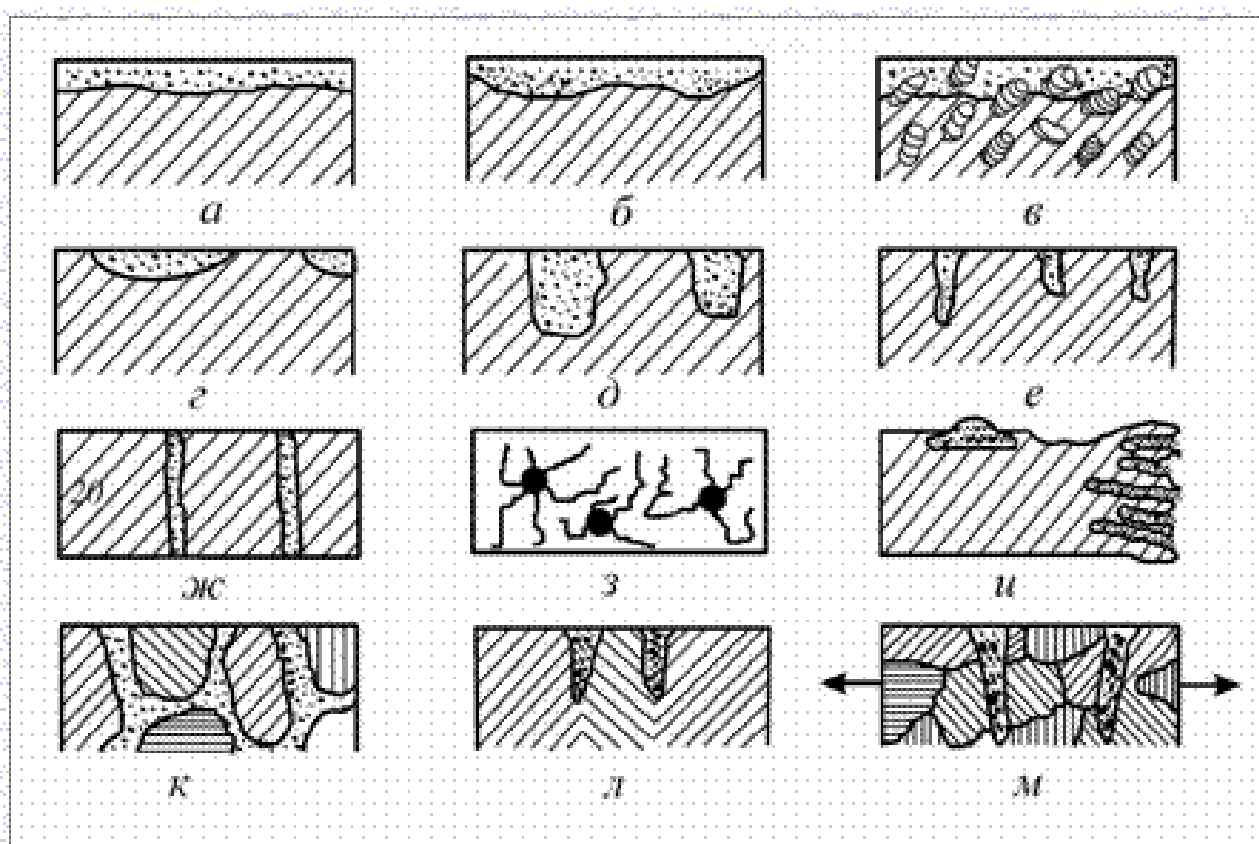
12) кавитация - разрушение металла при единовременном воздействии

коррозионной и внешней ударной средой;

13) "фреттинг-коррозия - процесс разрушения, осложненный трением двух поверхностей относительно друг друга в условиях коррозионной среды" [32];

14) "коррозия при трении (коррозионная эрозия) - разрушение происходящее при одновременном воздействии на металл трения и коррозионной среды" [32];

Классификации по типу разрушения поверхности основывается на положениях ГОСТа [33].



"а - равномерная коррозия; б - неравномерная коррозия;
в - избирательная коррозия; г - коррозия пятнами; д - язвенная коррозия;
е - питтинговая коррозия; ж - сквозная коррозия; з - нитевидная коррозия;
и - подповерхностная коррозия; к - межкристаллитная коррозия;
л - ножевая коррозия; м - транскристаллитная коррозия" [33]

Рисунок 1.10 - Виды коррозионных повреждений

"При взаимодействии всей поверхности материала с коррозионной средой

наблюдается общая или сплошная коррозия. Если диффузия с коррозионной средой происходит с частью поверхности, то наблюдается местная или локальная коррозия" [33].

"Различают два вида общей коррозии" [33]:

- равномерная коррозия, когда вся поверхность металла разъедается коррозионной средой (рисунок 1.10, а);
- неравномерная коррозия, когда поверхность металла имеет места с более глубоким коррозионным повреждением (рисунок 1.10, б) [33].

"Избирательная коррозия относится к неравномерной коррозии, когда одна из структурных составляющих сплава растворяется с большей скоростью (рисунок 1.10, в)" [33].

"Местная коррозия считается более опасной, чем общая, так как из-за сравнительно небольшой потери массы материала возможен выход из строя всей конструкции" [33].

Местную коррозию в основном делят на следующие группы:

- коррозия пятнами, когда размер коррозионного пятна на поверхности значительно превышает глубину коррозионного повреждения (рисунок 1.10, г);
- язвенная коррозия, когда размер коррозионного повреждения поверхности соизмерим с глубиной коррозионного повреждения (рисунок 1.10, д);
- питтинговая коррозия, когда глубина коррозионного повреждения намного больше его поверхностного повреждения (рисунок 1.10, е), к этому виду коррозии относится и сквозное коррозионное повреждение (рисунок 1.10, ж);
- нитевидная коррозия, когда коррозии подвержены материалы с неметаллическими защитными пленками (рисунок 1.10, з);
- подповерхностная коррозия, когда зоны коррозионного повреждения обнаруживаются под поверхностью без видимого прямого выхода на поверхность (рисунок 1.10, и);
- ножевая коррозия, когда коррозия локализована в металле с имеющим вид надрезом от острого предмета (рисунок 1.10, л) [33].

Локальная коррозия делится на:

- межкристаллитная коррозия, когда коррозионное повреждение находится вдоль границ зерен металла (рисунок 1.10, к) [33];

- транскристаллитная коррозия, когда коррозия распространяется как по телу зерна, так и по его границам (рисунок 1.10, м) [33].

1.3 Коррозия УМЗ сталей

Проблема коррозии одна из немаловажных причин выхода из эксплуатации металлических конструкций. Исследования, посвященные изучению влияния коррозии на УМЗ стали связаны с тем что коррозия в первую очередь возникает у конструкций, работающих в сложных и агрессивных условиях эксплуатации.

В работе [34] посвященной воздействию хлорид-ионов на стали с УМЗ структурой было отмечено, что полученная УМЗ структура стали методом РКУП не приводит к заметным изменениям чувствительности к воздействию агрессивной внешней среды и последующей коррозии. "Насыщение хлорид-ионами стали после РКУП способствует образованию более плотной защитной пленки на поверхности металла, которая способна противостоять дальнейшему разрушению" [34].

В работе Zhang L. «Sulphuric acid corrosion of ultrafine-grained mild steel processed by equal-channel angular pressing» "исследовано коррозионное поведение УМЗ стали после РКУП в среде, содержащей сульфат-ионы" [35]. "Для исследования взяли сталь с химическим составом 0.10-0.13% С, 0.11-0.15% Si, 0.38-0.45% Mn, 0.027% S, 0.024-0.028% P, 0.01% Cr, 0.01% Ni, 0.02% Cu" [35]. Обработку образцов методом РКУП проводили 4,8,12 и 16 раз. Испытания на коррозию проводили в дистиллированной воде, смешанной с серной кислотой 0,5 моль/л, под напряжением от 700 до 1700 мВ, со скоростью изменения напряжения порядка 0,7 мВ/с.

Результат исследования показал, что на образцах после РКУП образуется более плотная защитная пленка, предотвращающая коррозию, быстрее чем на контрольных образцах

В работе [36] посвященной исследованию скорости коррозии стали 10 в УМЗ состоянии. Исследовали сталь в четырех состояниях: исходном, после РКУП, с алмазоподобным покрытием и без него. Нас интересуют результаты, полученные при исследовании, стали в исходном состоянии и после РКУП. "Исследовали сталь в исходном КЗ состоянии (средний размер зерна $d_{cp} = 45$ мкм) и после РКУП при 200 °С, 4 прохода, маршрут В_с, угол $\varphi = 120^\circ$ (средний размер зерна $d_{cp} = 300$ нм)" [36]. Результаты исследования механических характеристик приведены в таблице 1.1 [36].

Таблица 1.1 - "Механические характеристики материала" [36]

Состояние стали	НВ	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %
Исходное состояние	121	460	350	25
После РКУП	235	1028	989	8

"Коррозионные испытания проводили путем погружения образцов в специально приготовленный раствор (5 %-й раствор NaCl по ГОСТ 4233 + 0,5 %-й раствор CH₃COOH по ГОСТ 19814, насыщенный сероводородом, рН \square 3,5; T = 297 К)" [36]. "Коррозионное воздействие на металл составило 96 часов" [36]. "Скорость коррозии определена по разности масс образцов до и после коррозионных испытаний. Авторами исследования было установлено, что скорость коррозии УМЗ стали (3,615 г/м²·ч) в 1,4 раза меньше, чем у стали в исходном состоянии (5,104 г/м²·ч)" [36].

1.4 Механизмы разрушения конструкционных металлических материалов

Рассматривая степень пластичности для определения характера разрушения можно разделить разрушение материалов по видам, таким как вязкое, хрупкое, квазихрупкое, вязко - хрупкое и смешанное разрушение.

1.4.1 Механизм вязкого разрушения

"Вязкое разрушение металлических изделий происходит после значительной работы пластической деформации у вершины вязкой трещины с большими затратами энергии. Характеризуется медленным развитием трещин и высокой энергоемкостью. Появление вязкого разрушения в металлических материалах связано с образованием пористости материала в области локализованной пластической деформации (утяжки). Вязкий излом состоит из относительно плоской центральной части, образуются губы среза и утяжка" [37,38]. Такой вид разрушения имеет волокнистое строение, большую шероховатость на поверхности и отсутствие металлического блеска (рисунок 1.11). Вязкое разрушение в основном является внутрезеренным, но бывает и межзеренным.

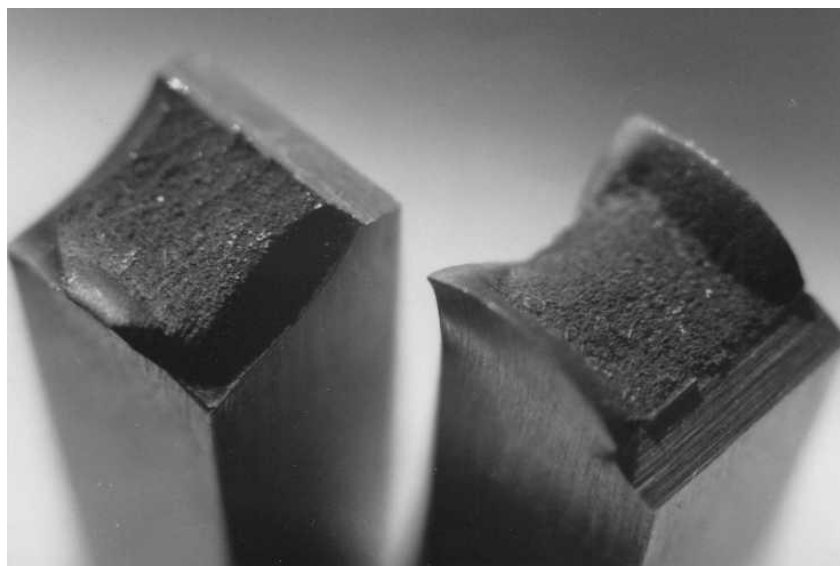
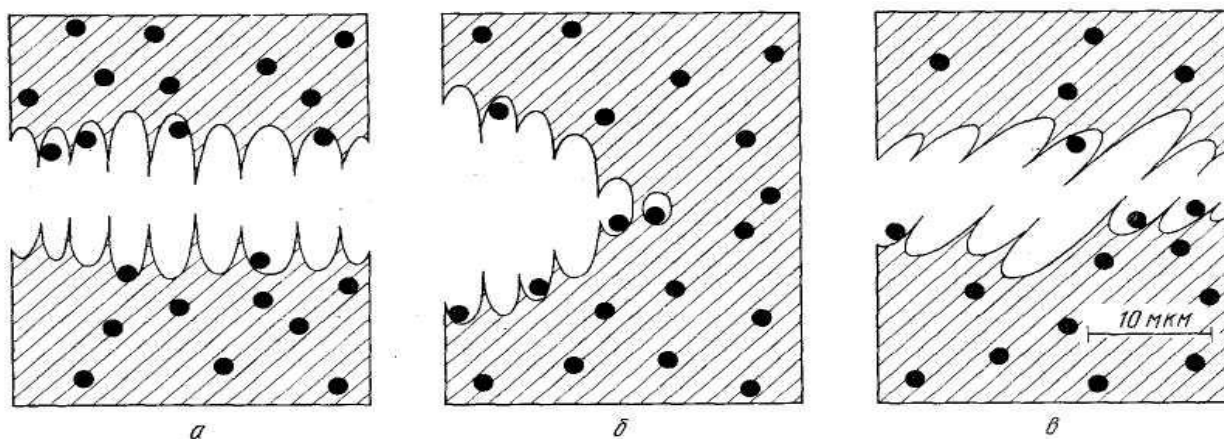


Рисунок 1.11 - Внешний вид вязкого излома аустенитной стали

"Микropopы в основном появляются в процессе пластического течения на включениях, нерастворенных частицах вторых фаз, границах зерен, в полосах деформации или в любых других местах, где наличие несплошности приводит к концентрации пластического течения. По мере увеличения пластической деформации микropopы растут, сливаются образуя новые более крупные. В дальнейшем происходит рост трещины за счет уменьшения расстояния между

крупными микропорами, и в итоге происходит разрушение (рисунок 1.12)" [39].

"Образованные поверхности излома содержат много углублений похожих на чаши. Размеры и форма ямок вязких изломов редко бывают похожими. В материалах с различными размерами и распределением дисперсных частиц виден обширный диапазон размеров и форм ямок" [40].

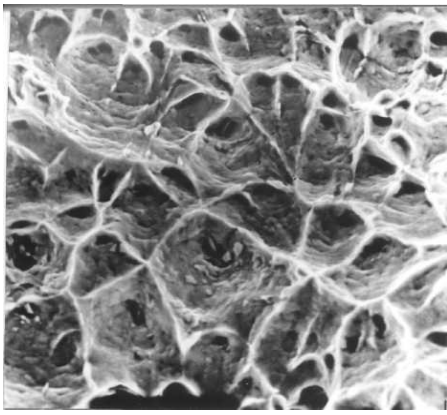


"а - одноосное растяжение; б - внецентренное растяжение; в - ямки
Рисунок 1.12 - Схема вязкого разрушения с образованием ямочного микрорельефа" [39]

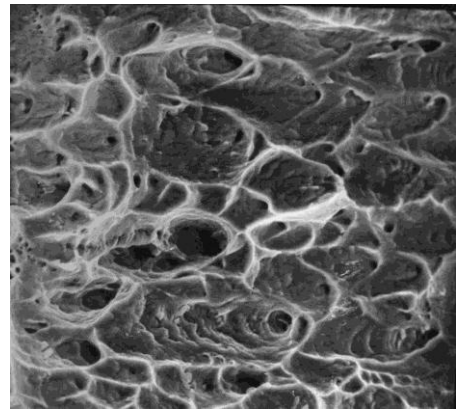
"На форму ямок влияет относительное направление максимального напряжения, вызвавшего разрушение. Существуют (рисунок 1.13): равноосные ямки (ямки растяжения), ямки сдвига, ямки отрыва" [40, 42].

"Равноосные ямки появляются в центральной части излома образца, испытанного при одноосном растяжении (рисунок 1.13, а)" [40].

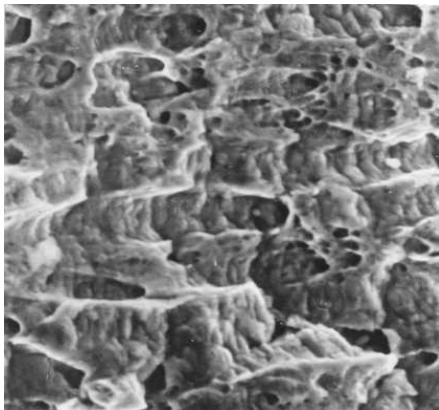
"На поверхности губ среза видны ямки сдвига, которые вытянуты в одном направлении (рисунок 1.13, б). Эти ямки на поверхности разрушения вытянуты в одном направлении, а на сопряженной поверхности разрушения - в противоположном" [41].



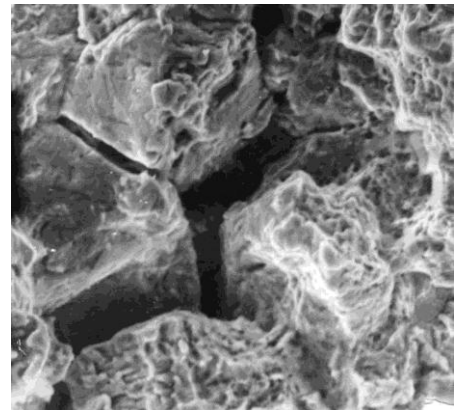
а)



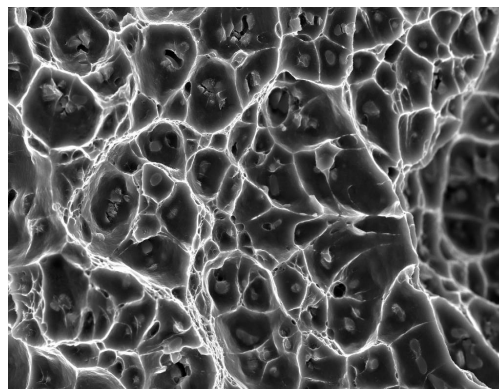
б)



в)



г)



д)

"а - равноосные ямки (сталь Н25Т3)" [42]; "б - ямки сдвига (сталь Н32Т3)" [42-44];

"в - ямки отрыва (сталь 40Х4Г18Н8Ф)" [42-44];

"г - межзеренное вязкое разрушение (сталь 40Г18Ф)" [42-44];

"д - ямки с включениями (сплав АК4-1)" [42-44].

а-д $\times 1000$

Рисунок 1.13 - Ямочный микрорельеф поверхности излома в материалах с УМЗ структурой

"Ямки сдвига трудно поддаются определению места зарождения мелких пор, так как карбидная частица может быть спрятана под ее поверхностью, которая бывает деформированной или сглаженной в результате сдвигового смещения в процессе разрушения" [42].

"Ямки отрыва (рисунок 1.13, в) появляются в результате внецентренного напряженного состояния. Сильно вытянутые микропоры, которые становятся ямками отрыва, появляются в начале области роста трещины (в очаге разрушения)" [42].

1.4.2 Механизм хрупкого разрушения

Хрупкое разрушение - это быстрый, самопроизвольный и нестабильный процесс роста трещины, который происходит при напряжениях меньших предела текучести. "Такой вид разрушения часто является причиной аварийного разрушения деталей и больших экономических потерь. Зарождение и развитие хрупкой трещины в большинстве случаев происходит вследствие использования изделия при низких температурах, в зонах увеличения толщины детали, наличия в изделии дефектов в виде трещин, присутствия в структуре вредных примесей и т.д" [42, 45, 46]. "Большая часть из перечисленных факторов увеличивают стесненность пластической деформации, вызывая снижение пластических характеристик материала. Не последнее место занимает водородное охрупчивание, коррозия под напряжением, жидкометаллическое охрупчивание. В этом случае, несмотря на структуру материала, разрушение проходит по межзеренному хрупкому механизму" [38].

"Хрупкий излом имеет кристаллическое строение, блестящее или имеющее цвет фаз, расположенных по границам зерен" [38]. "Гладкие и ровные без сколов кромки, а также отсутствие утяжки материала рядом с изломом (рисунок 1.14)" [38].

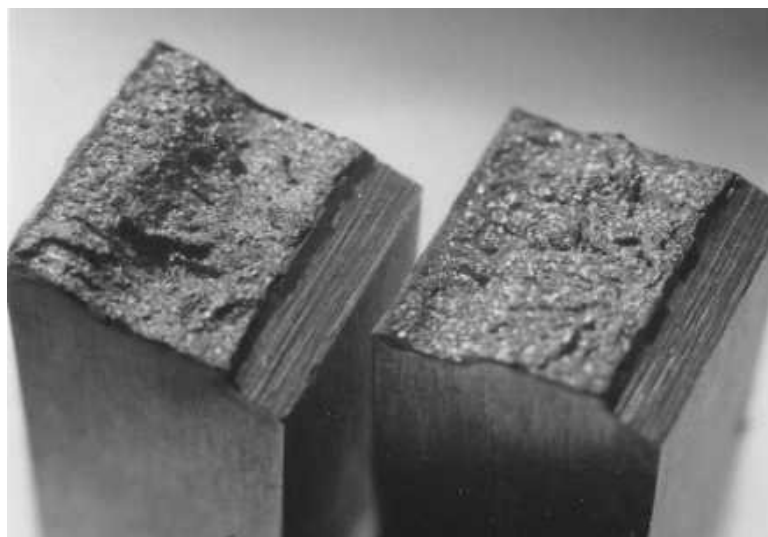


Рисунок 1.14 - "Внешний вид хрупких изломов углеродистой стали" [38]

Хрупкое разрушение бывает внутризеренным и межзеренным (рисунок 1.15, а, б).

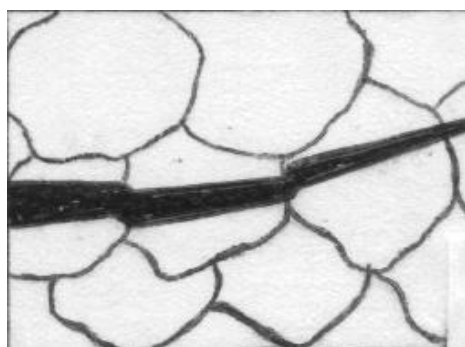
"При внутризеренном (транскристаллитном) хрупком разрушении (по механизму скола) (рисунок 1.15, а, в) трещина обычно распространяется вдоль кристаллографической плоскости с малыми индексами" [42, 51]. "Трещины скола зарождаются в местах, где затруднено кристаллографическое скольжение, т.е. на границах зерен, на пересечениях двойников, плоскостей скольжения, на включениях и частицах второй фазы. Под микроскопом фасетки с ручьистым узором наблюдаются внутри зерен в виде ступенек между участками трещины на параллельных плоскостях скола данного зерна" [42, 51] (рисунок 1.15, в).

"Ступеньки между плоскостями скола представляют собой места разрушения тонких перемычек, соединяющих сблизившиеся участки трещины скола. Эти ступеньки сходятся в одну точку, от которой начинается локальное развитие трещины, поэтому по их ориентации можно судить о направлении распространения трещины на данном локальном участке" [42, 51].

"Так могут разрушаться материалы с ОЦК и ГПУ решеткой. В материалах с ГЦК решеткой трещины скола, как правило, не наблюдаются" [42, 51].

"При межзеренном (интеркристаллитном) хрупком разрушении (рисунок 1.15, б, г) трещина распространяется в однофазных материалах по поверхности

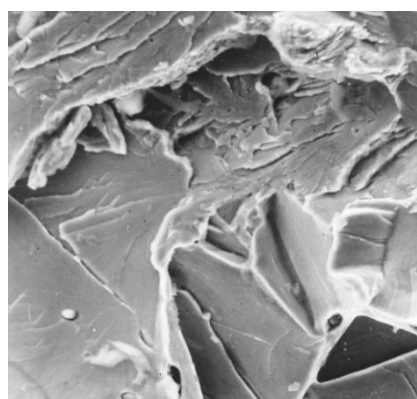
граней зерен, а при наличии на границах второй фазы - вдоль межфазной поверхности или вдоль поверхности скола внутри данной фазы" [51]. "В результате чего на изломе наблюдаются отдельные зерна в виде межзеренных фасеток, которые имеют форму многогранников (рисунок 1,15, г). Очень часто такое разрушение сопровождается образованием вторичных трещин на границах зерен" [51].



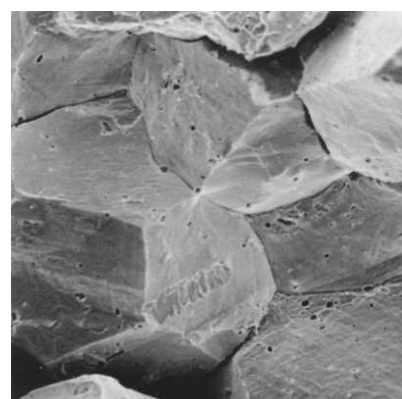
а)



б)



в)



г)

а - внутризеренное; б - межзеренное;
в - внутризеренное сталь 45; г - межзеренное сталь N32T3

Рисунок 1.15 - Микрорельеф хрупкого разрушения

"Межзеренное хрупкое разрушение обычно вызвано различными причинами: наличием хрупких выделений по границам зерен, трехосным напряженным состоянием, воздействием активной среды, наличием водорода и другими причинами. Оно можно наблюдать как в материалах с ОЦК и ГПУ решеткой, так и с ГЦК решеткой" [42, 51].

1.4.3. Механизм квазихрупкого разрушения

"Квазихрупкое разрушение по механизму близко к вязкому разрушению и предполагает наличие пластической зоны перед краем трещины и наклепанного материала у поверхности трещины. Энергоемкость близка к хрупкому разрушению, чем вязкому разрушению, так как обладает пониженным сопротивлением к разрушению. Такое разрушение называют квазисколом с образованием розеточного излома. Розеточный излом с плоскими или слегка изогнутыми поверхностями или фасетками образуется за счет слияния отдельных трещин" [42, 51] (рисунок 1.16, а).

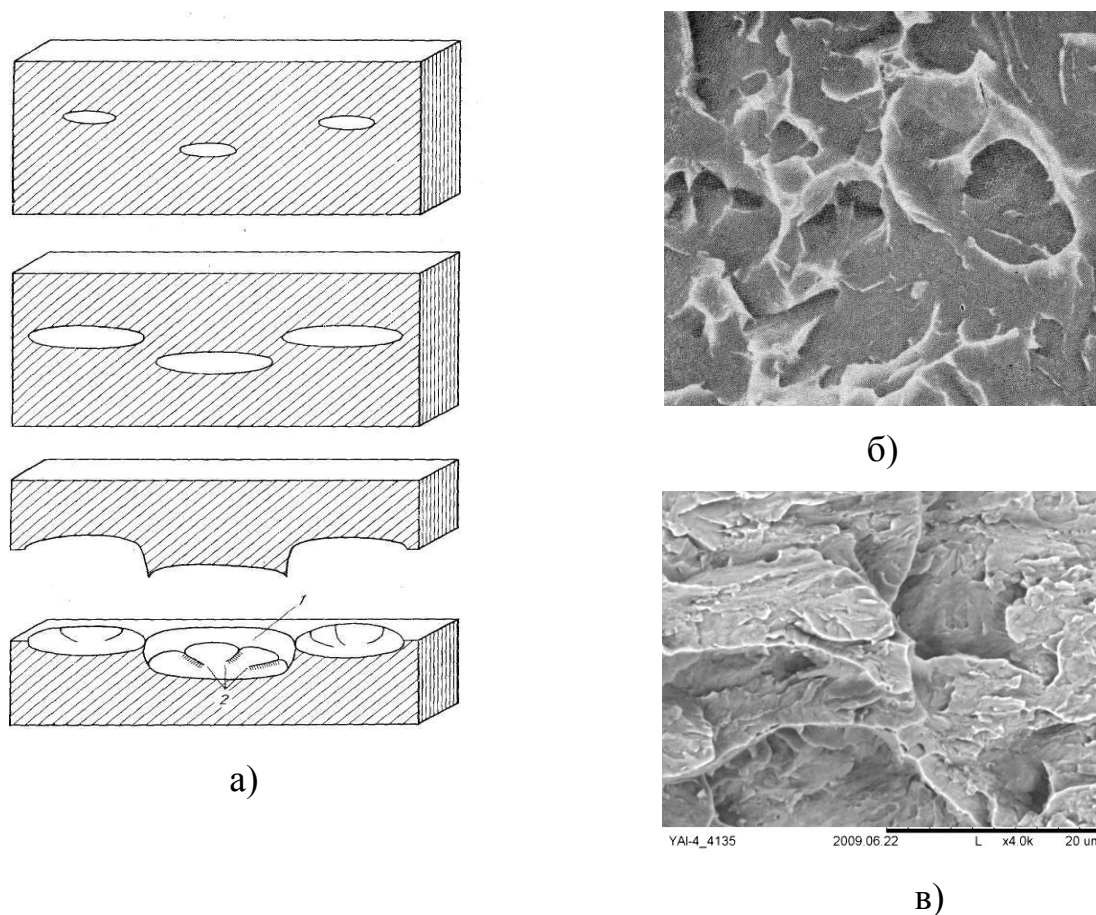
"Все трещины распространяется концентрически. При этом округлый фронт трещин под действием пластической деформации расширяется, образуя поры в виде линзы. При соединении трещин образуются острые гребни отрыва" [42, 51]. Образованный таким образом микрорельеф представлен на рисунке 1.16, б.

"Участки квазискола при вязком разрушении часто смешиваются с ямками отрыва показывая схожую природу этих видов разрушения. Определить размер и ориентировку плоскостей скола внутри зерен очень трудно, так как разрушение происходит сочетанием механизма слияния микропор и скола. Взамен истинных плоскостей скола есть слабо различимые фасетки скола меньшего размера, которые, как правило, инициированы карбидными или иными включениями. Эти небольшие фасетки скола рассматривают как плоскости квазискола, так как они похожи на фасетки скола с ручьистыми узорами, исходящими из мест зарождения трещин. Однако четко идентифицировать их кристаллографические плоскости не удается" [38].

"Этот механизм нельзя путать с тем случаем, когда одновременно наблюдаются участки скола по хрупким вторым фазам и ямки в матрице. При квазисколе нет выраженной границы между фасеткой скола и участками с ямками, обрамляющими эту фасетку. Разрушение путем квазискола зарождается внутри фасеток в отличие от скола, который зарождается на границе зерна. Ступеньки скола при квазисколе непосредственно переходят в гребни отрыва

соседних ямочных участков" [38].

"По механизму квазискола разрушаются, как правило, закаленные и отпущенные стали, в структуре которых имеются дисперсные карбидные включения, а также некоторые высокопрочные металлические материалы. В последнее время данный вид разрушения обнаружен при низкотемпературном ударном разрушении наноструктурированных материалов с ОЦК структурой" [46] (рисунок 1.16, в).



1 – поверхность сдвига; 2 – отрывные гребни.

а – схема образования; б – сталь Cr – Мо – V со структурой бейнит [39];

в – сталь 10 с УМЗ структурой [47].

б, в – стандартный микрорельеф квазискола.

б – $\times 1500$; в – $\times 4000$

Рисунок 1.16 - Схема образования и стандартный микрорельеф квазискола

1.4.4. Механизм вязко-хрупкого разрушения

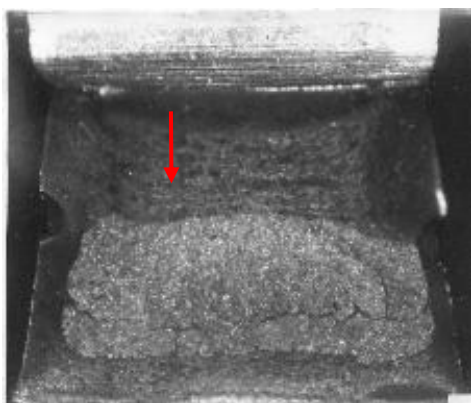
"Разрушение материалов с ОЦК решеткой в интервале вязко-хрупкого перехода называют вязко-хрупким. При визуальном осмотре на поверхности изломов вязко-хрупкого разрушения можно наблюдать как вязкую, так и хрупкую составляющие. Соотношение площади, занимаемой на поверхности излома вязкой и хрупкой составляющими, зависит от температуры разрушения образца или детали по отношению к критическим температурам хрупкости исследуемого материала" [42, 48, 49].

"По характеру распределения вязкой и хрупкой составляющих на поверхности изломов различают" [42, 48, 49]:

- "сосредоточенный излом (макронеоднородный излом, образованный при сосредоточенном разрушении) (рисунок 1.17, а, б)" [42, 48, 49];
- "рассредоточенный излом (макрооднородный излом, образованный при рассредоточенном разрушении) (рисунок 1.17, в)" [42, 48, 49].

"При сосредоточенном разрушении на поверхности вязко-хрупких изломов образуются локализованные области вязкого и хрупкого разрушения, выявляемые при визуальном наблюдении" [42, 48, 49]. "В одном случае вязкая область может локализоваться в очаге разрушения, образуя вязкую зону l_c (рисунок 1.17, а), в другом случае хрупкая область локализуется центральной части излома, образуя так называемый «хрупкий квадрат» (рисунок 1.17, в)" [42, 48, 49].

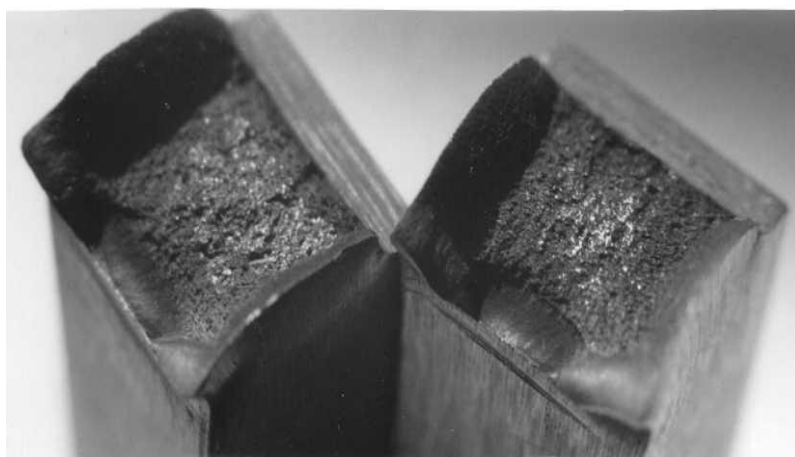
"При рассредоточенном разрушении металлических материалов в интервале вязко-хрупкого перехода поверхность образовавшегося излома визуально выглядит волокнистой с более или менее равномерно распределенными хрупкими «блестками» (участками скола) (рисунок 1.17, в)" [42, 48, 49].



а)



б)



в)

а – сосредоточенное разрушение стали 10 с образованием стабильной вязкой зоной I_c в очаге разрушения (отмечена стрелкой);

б – рассредоточенное разрушение стали 45;

в – сосредоточенное разрушение стали 10 с УМЗ структурой с образование «хрупкого квадрата».

Рисунок 1.17 - Общий вид вязко-хрупких изломов стальных образцов

"Микрорельеф таких изломов состоит из чередующихся областей ямок и фасеток скола (рисунок 1.18)" [42, 48]. "Поэтому нередко рассредоточенное вязко-хрупкое разрушение относят к разновидности смешанного разрушения" [39].

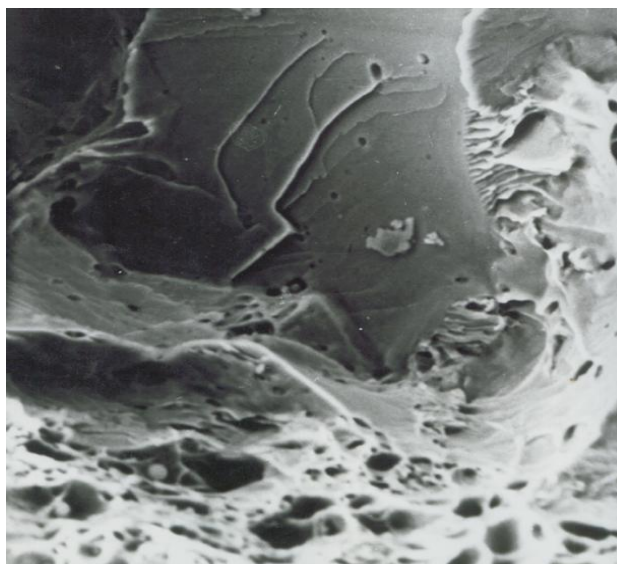


Рисунок 1.18 - "Микрорельеф рассредоточенного ударного излома стали 45, полученного в интервале вязко-хрупкого перехода" [48] ($\times 1000$)

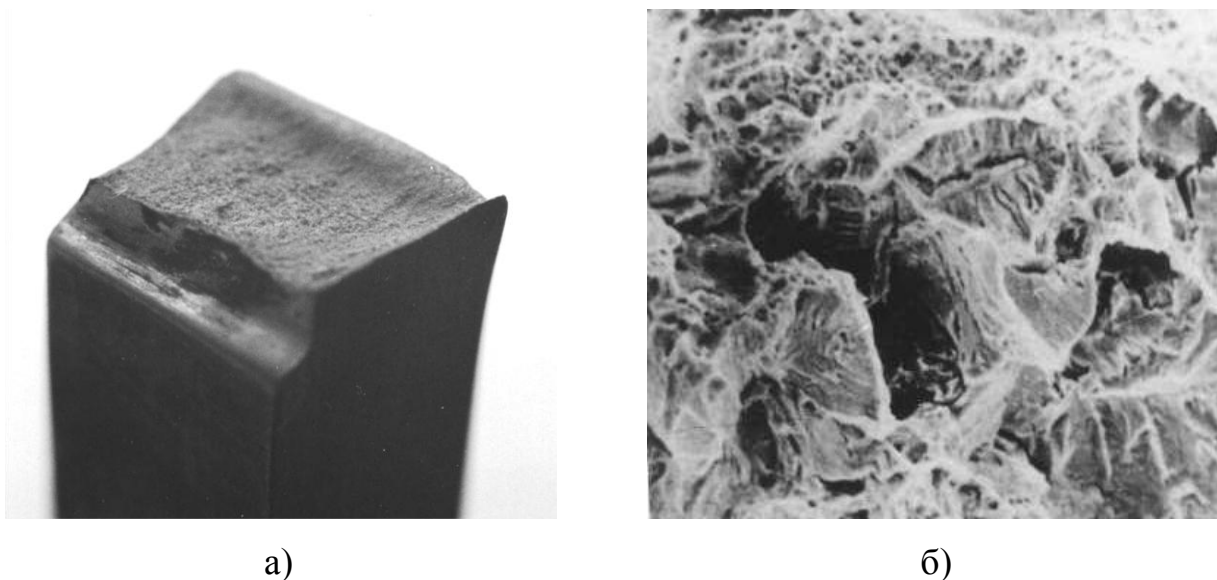
"При разрушении материалов в интервале вязко-хрупкого перехода как по сосредоточенному, так и по рассредоточенному механизмам, в очаге разрушения, как правило, образуется зона сдвига θ , а в периферийной области – губы среза" [37, 42].

1.4.5. Механизм смешанного разрушения

"Смешанным называют такой механизм, когда разрушение металлических материалов осуществляется под действием двух и более механизмов. Смешанный механизм характерен для материалов с ГЦК решеткой, например, аустенитных сталей, в переходной области от плоской деформации к плоскому напряженному состоянию, а также при разрушении некоторых закаленных инструментальных сталей. В материалах с ГЦК решеткой такое состояние может быть получено, например, при низких температурах, высоких скоростях нагружения и т.д. Полученные изломы имеют матовую поверхность, форма изломов ровная, губы среза небольшие (рисунок 1.19, а) или отсутствуют совсем" [37, 42].

"Смешанный механизм разрушения следует отличать от последовательной смены различных механизмов разрушения, которые можно рассматривать каждый в отдельности. Разрушение по смешанному механизму обычно означает, что

взаимодействующее влияние различных факторов заставило разрушение отклониться от одного какого-то определенного механизма" [37, 42], а сами микрорельефы не всегда ярко выражены (рисунок 1.19, б).



а – макрорельеф; б – микрорельеф.

Рисунок 1.19 - "Макро- и микрорельеф смешанного разрушения аустенитной стали 40X4Г18Ф" [43] ($\times 1000$)

"К наиболее часто встречающимся сочетаниям механизмов при смешанном разрушении можно отнести:

- скол в сочетании со слиянием микропор;
- скол в сочетании с отрывом;
- скол в сочетании с межзерненным разрушением;
- сочетание слияния микропор с отрывом;
- сочетание слияния микропор с межзерненным разрушением;
- отрыв в сочетании с межзерненным разрушением" [38, 39].

Возможно также сочетание одновременно нескольких микромеханизмов разрушения.

1.5 Элементы механики разрушения при однократных видах нагружения

1.5.1 Основные сведения о механике разрушения

Гипотеза о механике разрушения в начальной формулировке заключается в том, что в теле всегда есть трещины или похожие на трещины дефекты. Но есть необходимость установить, может ли приложенная к телу нагрузка вызвать рост трещины в данном месте. Если возникает возможность роста трещины, то предсказать как она будет распространяться дальше. Главные определения, сформулированы следующим образом.

"Зона разрушения представляет собой малую область в окрестности трещины, в которой развивается разрушение" [46, 53].

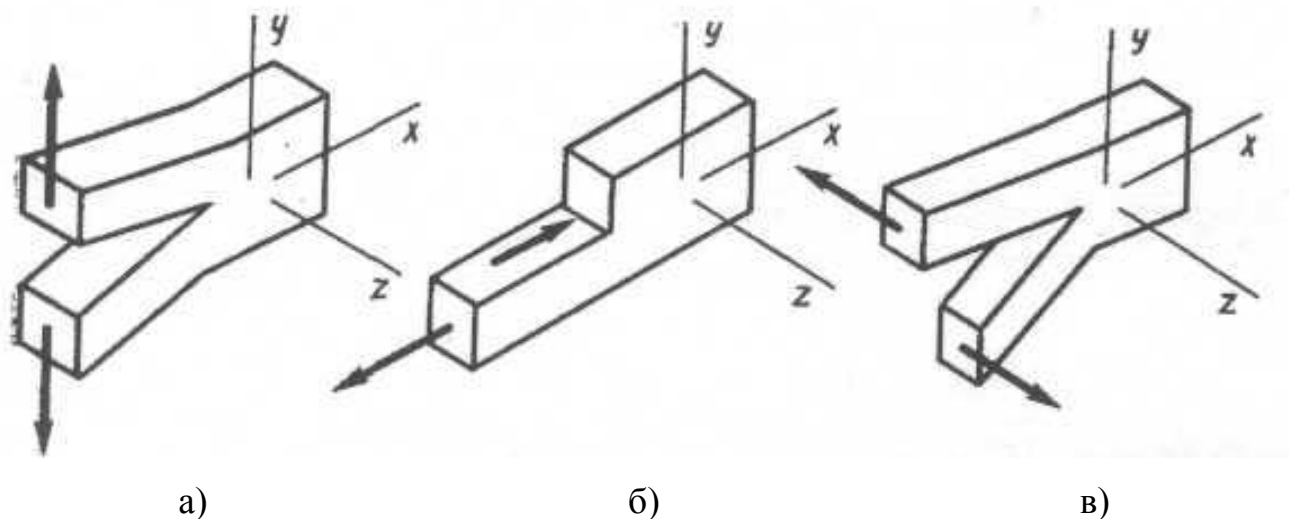
Фронт трещины - это видимость линии, которая соединяет берега трещины, расположенные напротив друг друга. При постепенном разделении тела на части эта линия, перемещаясь, будет описывать геометрическую поверхность, называемую поверхностью разрушения или изломом.

Исходя из схемы нагружения основные виды разрушения делятся на 3 вида (рисунок 1.20).

Первый вид (тип I) называют отрывом. При таком виде разрушения деформирование идет так, что поверхности трещины расходятся друг от друга при сохранении симметричности относительно плоскостей xy и xz .

Второй вид (тип II) называют поперечным сдвигом. При таком виде разрушения деформирование происходит скольжением поверхностей трещины в направлении оси x .

Третий вид (тип III) называют продольным сдвигом. При таком виде нагружения происходит одновременное скольжение поверхностей трещины параллельно оси z .



а – тип I (отрыв); б – тип II (поперечный сдвиг); в – тип III (продольный сдвиг).

Рисунок 1.20 - Основные типы трещин

В реальных условиях нагружения различных изделий у вершины трещины может выполняться один из приведенных видов разрушения или их комбинация. В комбинации видов обычно одного типа трещины преобладает над другим. В механике разрушения нет четкой связи типа трещины с механизмом разрушения изделий. Но в тоже время разрушение по типу I (в отличие от типа II и типа III) связано с реализацией только нормальных растягивающих напряжений и не предполагает протекание макропластической деформации. Поэтому разрушение по типу I имеет место при распространении хрупкой трещины по механизму скола. Разрушения по типу II и III имеют касательные напряжения, так как такое разрушение сопровождается макропластической деформацией и связано с вязким разрушением.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что из всех типов разрушения, показанных на рисунке 1.20, самым нежелательным с позиции энергоемкости является разрушение по типу I.

"Трещиностойкостью материала называют его способность сопротивляться возрастающей нагрузке при наличии в материале трещины. Стрэгивание трещины произойдет тогда, когда напряжение у ее вершины превысит предельное значение. Это напряжение у вершины трещины, в общем случае, будет зависеть

от нагрузки (напряжения), длины трещины (дефекта) и конфигурации образца или детали. В настоящее время поле напряжения у вершины трещины принято характеризовать единым силовым параметром K , называемым коэффициентом интенсивности напряжения" [42, 46, 53].

Как уже отмечалось, коэффициент интенсивности напряжения K является функцией напряжения σ и длины трещины (дефекта) l , т.е.

$$K = f \sigma \cdot l , \quad (1.2)$$

В зависимости от того какое поле напряжение у вершины трещины будет характеризовать коэффициент K , будет меняться обозначение этого коэффициента. Если это тип I, то K_I , если тип II, то K_{II} , если тип III, то K_{III} .

Минимальное (предельно допустимое) значение коэффициента интенсивности напряжения K , при котором материал перестает сдерживать трещину называют критическим значением этого или трещиностойкостью (вязкостью разрушения) материала. В таком случае трещина страгивается и происходит разрушение изделия, обозначают этот коэффициент K_C . "В зависимости от типа трещины, критическое значение коэффициентов интенсивности напряжения обозначают, соответственно, K_{IC} , K_{IIc} и K_{IIIc} " [12].

Трещиностойкость является важной характеристикой материала, которая используется для определения сопротивления материала развитию трещины при однократных видах нагружения.

1.5.2. Пластические зоны и локальное напряженное состояние материала у вершины трещины.

Если исходить из теории упругости, то в нагруженном изделии напряжение у вершины трещины или трещиноподобного дефекта должно всегда стремиться к бесконечности. Нет материала, который бы выдерживал такое напряжение. "Когда данное напряжение достигнет предела текучести материала σ_T , то вблизи вершины трещины металл переходит в пластическое состояние. Таким образом, формируется пластическая зона (рисунок 1.21)" [42, 46, 53].

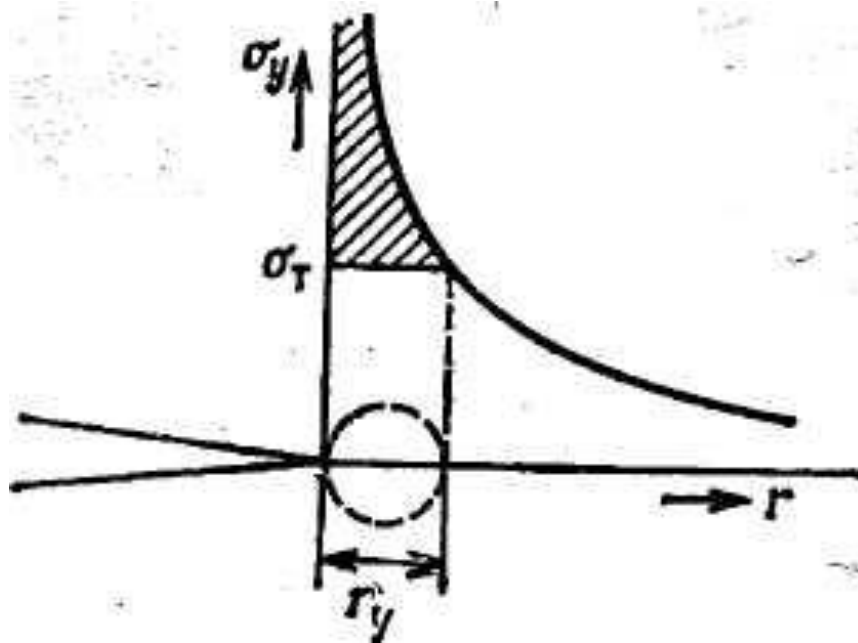


Рисунок 1.21 - "Распределение напряжений перед трещиной и формирование пластической зоны" [42, 46, 53]

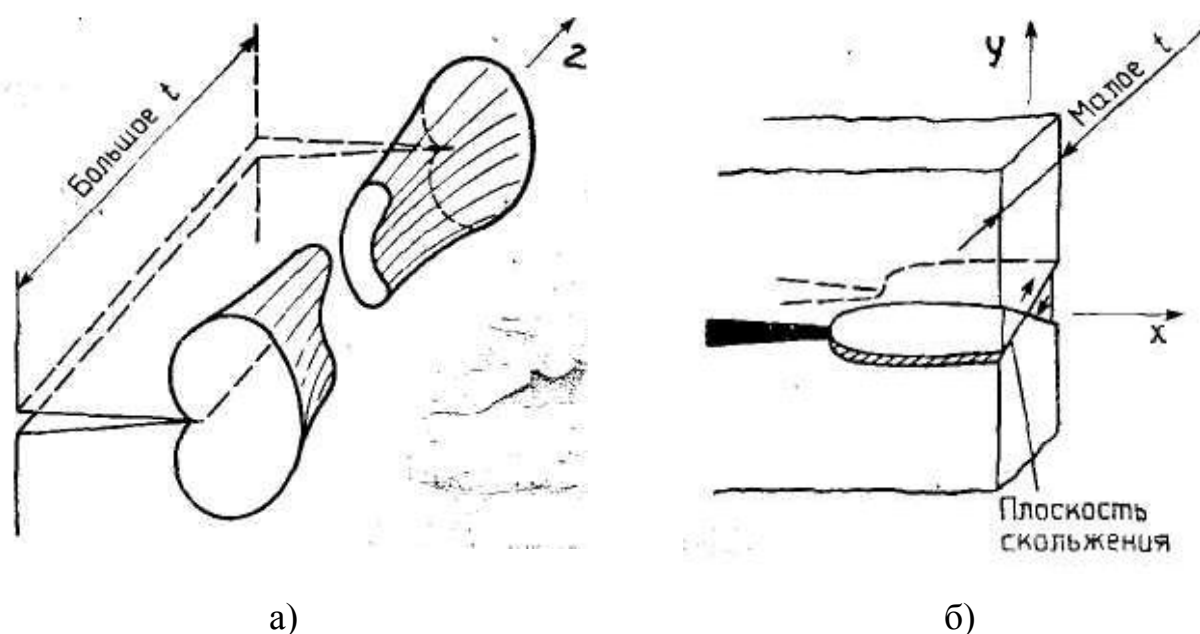
"Формирование пластической зоны происходит с пластическим течением путем накопления сдвиговых деформаций под углом 45° , значит форма пластической зоны будет не круглой, а вытянутой в направлении течения металла. Такие показатели как количество, форма и размеры пластических зон зависят от вида приложенной нагрузки и локального напряженного состояния материала у вершины трещины. Параметры, рассмотренные выше для пластических зон важны для понимания природы и механизмов разрушения металлических материалов, а также с практической точки зрения для решения вопросов диагностики разрушения материалов и конструкций" [42, 46, 53].

"При распространении трещины в материале, в зависимости от толщины образца или детали, температуры испытания, скорости нагружения, а также других внешних или внутренних факторов, у ее вершины может реализоваться различное локальное напряженное состояние материала. В механике разрушения различают два вида предельного локального напряженного состояния материала: плоскую деформацию (ПД) и плоское напряженное состояние (ПН)" [42, 46, 53].

"В том случае если толщина изделия t достаточно большая, то в центральном сечении у вершины трещины можно выделить подобласть зоны

разрушения (рисунок 1.21, а) в которой реализуется состояние плоской деформации ($\varepsilon_z \approx 0$)" [42, 46, 53]. "В этой подобласти течение металла по оси Z затруднено, так как будет сдерживаться окружающим упругим материалом. Деформация будет развиваться только в плоскости X - Y" [42, 46, 53]. "Поэтому пластическая зона в условиях ПД будет небольших размеров, а конфигурация данной зоны будет иметь вид «бабочки» (рисунок 1.22)" [42, 46, 53]. Размер пластической зоны r_1 , образовавшейся в условиях плоской деформации, по формуле (1.3) равен:

$$r_1 = \frac{1}{6\pi} \frac{K_1}{\sigma_T}^2, \quad (1.3)$$



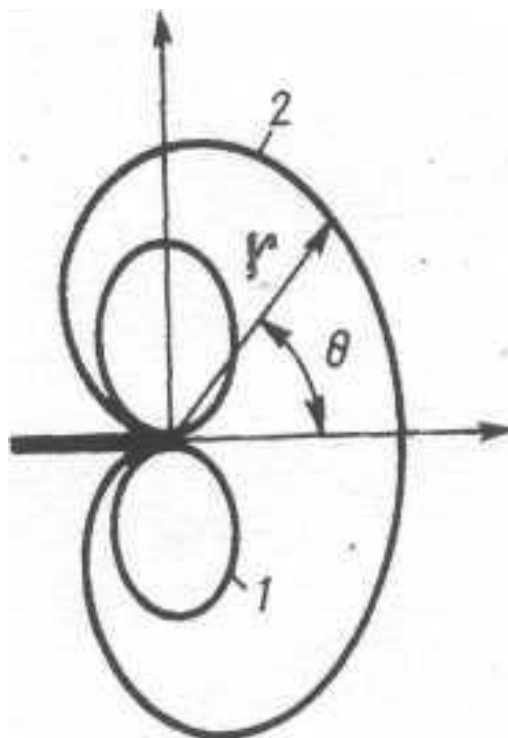
а – большой и б – малой толщины t

Рисунок 1.22. Изменение формы и размеров пластической зоны по толщине образца или детали в случае

Если толщина изделия t мала, то, из-за близости свободных поверхностей, ограничения в развитии ПД, в том числе и по оси Z (рисунок 1.22, б), не будет. В этом случае у вершины трещины реализуется условие ПН состояния ($\sigma_z \approx 0$). Расчеты по соотношениям механики разрушения, при ПН конфигурация пластической зоны становится вытянутой в направлении распространения

трещины (рисунок 1.23), а размер зоны – в три раза больше, чем в предыдущем случае, в соответствии с формулой (1.4) [46, 53]:

$$r = \frac{1}{2\pi} \frac{K}{\sigma_T}^2, \quad (1.4)$$



1 – плоской деформации; 2 – плоского напряженного состояния

Рисунок 1.23 - Конфигурация пластических зон в различных условиях

Локально напряженное состояние может сменяться как при изменении толщины изделия, так и разных участках сечения этого изделия. Ранее была изложена информация, в которой говорится, что "при высоких значениях толщины изделия в центральном их сечении реализуется условие ПД, но у поверхности этого же изделия сказывается близость свободной поверхности, и поэтому существует большая свобода для развития пластического течения материала" [42, 46, 53]. В итоге данная область изделия реализует условие ПН состояния материала (рисунок 1.22, а), которое проявляется в образовании у боковых поверхностей образца губ среза с вязким механизмом разрушения. Если толщина t очень малая, условие плоского напряженного состояния реализуется во всем сечении образца, что проявляется в вытянутой форме образца (рисунок 1.22,

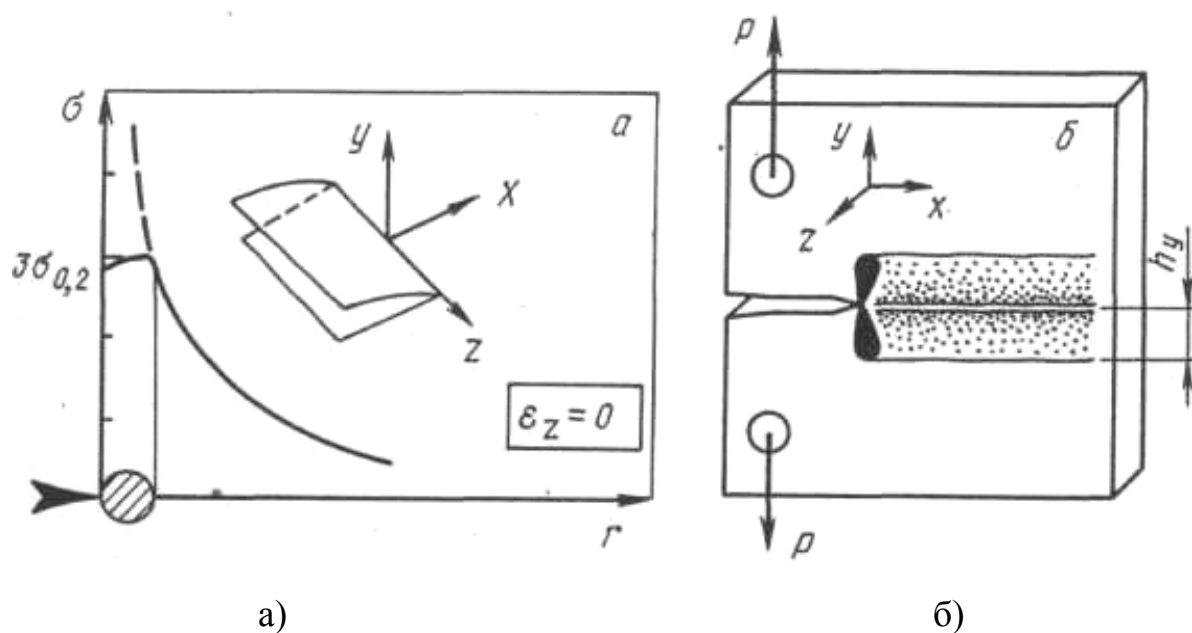
б).

"Таким образом, если взять за основу положения механики разрушения, видно, что пластические зоны, образующиеся у вершины трещины в условиях ПД и ПН состояния, отличаются как по форме, так и по размерам. Это сказывается и на механизме разрушения металлических материалов, и на его сопротивлении развитию трещины" [12]. При формировании пластических зон при разрушении настоящих изделий при однократном нагружении, необходимо принимать учитывать далее перечисленные обстоятельства [42, 48, 54, 55].

Разрушая некоторые металлические изделия, помимо предельных значений локального напряженного состояния материала: ПД и ПН, у вершины трещины возможно реализовываться переходному состоянию от ПД к ПН. В основном это реализуется при смешанном разрушении материалов с ГЦК решеткой [42, 56].

"Экспериментальные данные показывают, что при разрушении материалов в условиях ПН состояния, а в некоторых случаях, и в переходной области от ПД к ПН, у вершины трещины формируются две пластические зоны: слабodeформированная макрозона и сильнодеформированная микрозона, отличающиеся размерами и степенью искаженности кристаллической структуры материала в данных зонах" [42, 56, 54].

Разрушение изделий в условиях ПД напряжения непосредственно в вершине трещины будут равны σ_T . Это связано с эффектом затупления трещины. Далее резко повышается напряжение до эффективного напряжения текучести $3\sigma_T$ (рисунок 1.24, а). При таких условиях у вершины трещины формируется одна пластическая зона. В конце прохождения трещины через изделие под поверхностью готовых изломов выявляется рентгеновским или другим методом. Пластическая зона глубиной h_y показана на рисунке 1.24, б [45, 42, 46, 53].



"а – зона у вершины трещины;

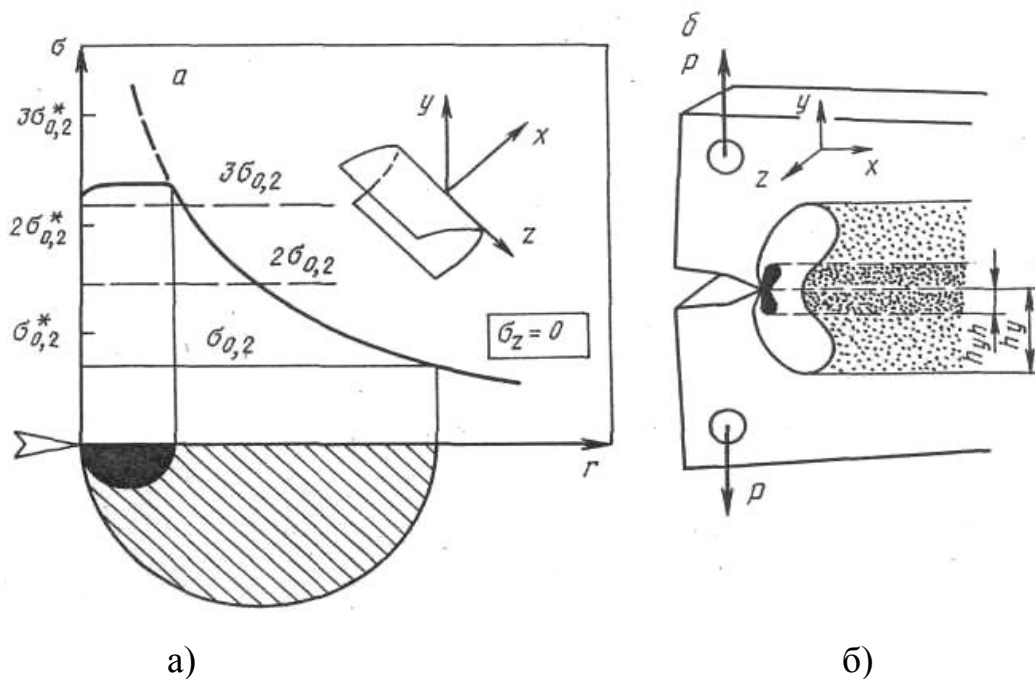
б – зона под поверхностью изломов при ПД" [12].

Рисунок 1.24 - Схема формирования пластической зоны

При условии ПН состояния во время разрушения изделия происходит под действием возникающих напряжений. В результате этого образуется слабдеформированная макрозона h_y , где напряжения достигают предела текучести исходного материала σ_T (рисунок 1.25, а). После пластического течения металла происходит его деформационное упрочнение и увеличение предела текучести до значения σ_T^* , которое изменяет локально напряженное состояние материала у вершины трещины от ПН состояния, к состоянию, близкому к ПД.

"Если увеличивать нагрузки дальше, то это способствует формированию у вершины трещины второй пластической зоны. Размеры этой зоны будут зависеть от предела текучести деформационного упрочненного материала σ_T^* (рисунок 1.25, а).

В конце прохождения трещины через изделие, используя рентгеноструктурный анализ под поверхностью полученных изломов, выявляются две пластические зоны: слабдеформированная макрозона, глубиной h_y и сильнодеформированная микрозона, глубиной h_{yh} (рисунок 1.25, б).



а – зона у вершины трещины;

б – зона под поверхностью изломов при ПН состоянии.

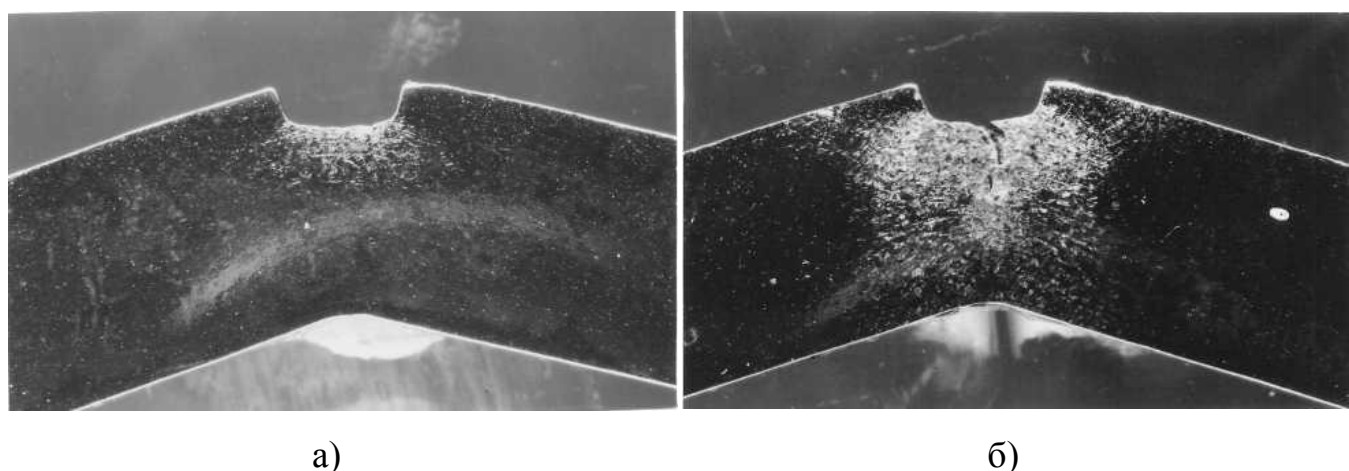
Рисунок 1.25 "Формирование пластических зон" [12]

"В переходной области от ПД к ПН разрушаются преимущественно материалы с ГЦК решеткой, как правило, по смешанному механизму" [42, 56]. Смешанное разрушение не имеет одного механизма разрушения, в связи с этим становится невозможно показать общую схему формирования пластических зон под поверхностью изломов. В каждом микроскопическом объеме металла реализуется свое определенное локальное напряженное состояние материала и свой механизм разрушения. "При рентгенографировании таких изломов ширина рентгеновских дифракционных линий характеризует усредненное значение искаженности кристаллической структуры материала в облучаемой области. Поэтому на практике при определении максимальной глубины пластической зоны под поверхностью изломов h_{\max} , она оказывается меньше, чем в случае вязких изломов, но больше, чем в случае хрупких изломов, а отношение h_{\max}/t имеет промежуточное значение ($10^{-2} < h_{\max}/t < 10^{-1}$)" [42, 56]. Кроме того, при смешанном разрушении не всегда есть возможность точно определить границы макро- и микрзоны под поверхностью изломов при рентгеновском методе их

определения. Если смешанное разрушение произошло в переходной области, но ближе к ПН, то разделение пластической зоны на макро- и микрону в принципе возможно [42, 56]. Если разрушение произошло в области ближе к ПД, то вышеуказанное разделение становится невозможным.

Уже сейчас есть экспериментальные подтверждения наличия под поверхностью вязких изломов двух пластических зон как у КЗ, так и УМЗ материалов с ОЦК и ГЦК решеткой [42, 44]. Наблюдения за развитием пластических зон на боковой поверхности призматических образцов из закаленной аустенитной стали Н32Т3, оцененные по интенсивности мартенситных превращений, показали, что при вязком разрушении стали в условиях ПН, как зарождение, так и распространение трещины, происходит после формирования слабodeформированной макрозоны (на рисунке 1.26, а, б) [56].

Специально проведенные исследования показали [42, 56], "что физическое уширение рентгеновской дифракционной линии, полученной при рентгенографировании материала в слабodeформированной макрозоне, соответствует уширению линии того же материала, ПД на 2–8 %" [54]. Данная деформация увеличивает предел текучести материалов с ГЦК решеткой на 20–40 %, а с ОЦК решеткой – на 30–50 % [57].

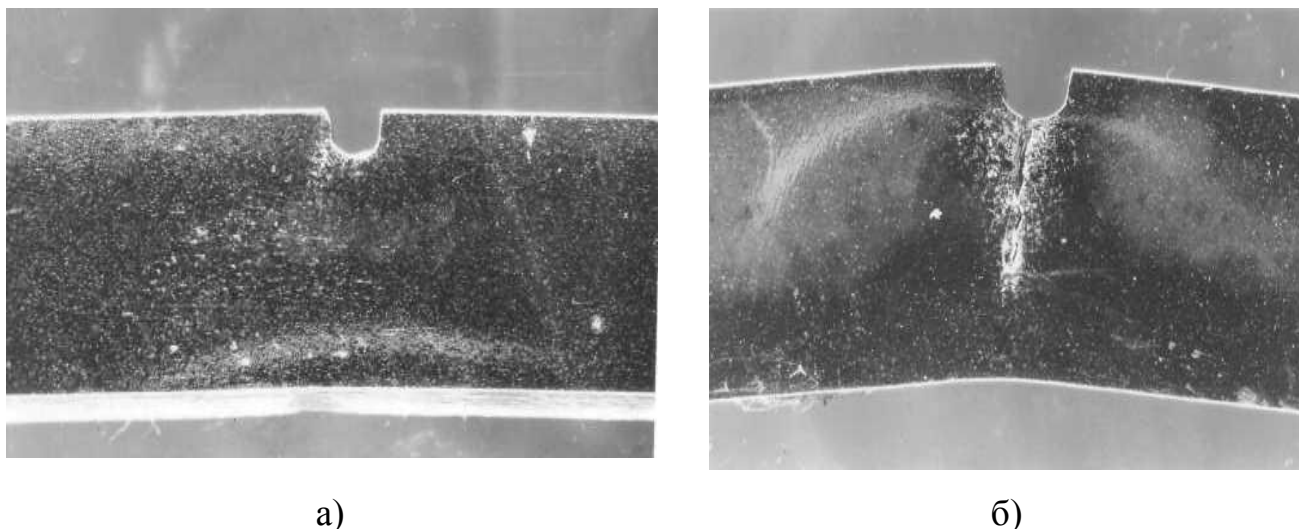


а – $\varphi = 25^\circ$; б – $\varphi = 38^\circ$

Рисунок 1.26 - Распределение мартенсита деформации на боковой поверхности ударных образцов закаленной стали Н32Т3, деформированной при температуре

минус 196 °С на разный угол изгиба

В результате хрупкого разрушения состаренной аустенитной стали Н32Т3 в условиях ПД состояния трещина с образовавшейся у ее вершины пластической зоной (рисунок 1.27) распространяется по материалу с отсутствием макропластической деформации. Данный факт видно по-практически не изменившейся форме надреза [56].



а – $\varphi=5^\circ$; б – $\varphi=10^\circ$

Рисунок 1.27 - Распределение мартенсита деформации на боковой поверхности ударных образцов состаренной стали Н32Т3, деформированной при температуре минус 196 °С на разный угол изгиба

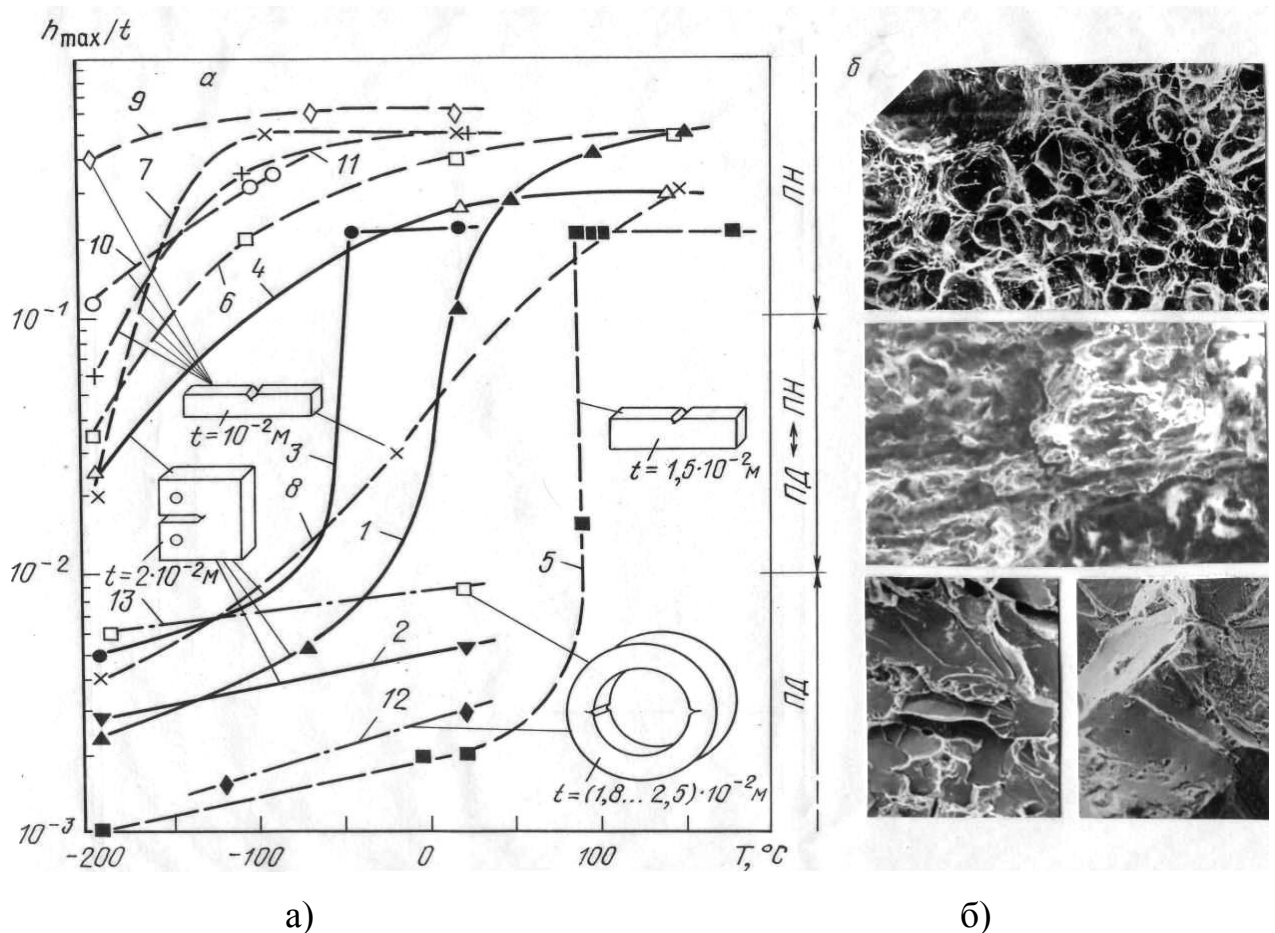
1.5.3 Связь локального напряженного состояния с механизмом разрушения изделий и кинетикой развития пластических зон.

"При использовании однократных видов нагружения локальное напряженное состояние материала у вершины трещины определяет количество, размер и форма образующихся пластических зон. Определить точную границу перехода локального напряженного состояния материала от ПД в переходную область и от переходной области в ПН не представляется возможным из-за непрерывности процесса изменения размера и количества пластических зон" [12]. "Задача состоит в том, чтобы найти количественный критерий, позволяющий

сравнивать между собой жесткость локального напряженного состояния материала при разрушении" [12].

"На рисунке 1.28, а представлена температурная зависимость отношения h_{max}/t для статического, ударного, высокоскоростного импульсного материалов с ОЦК и ГЦК решеткой" [12]. График хорошо показывает ранее выявленные области локального напряженного состояния материала: ПД, ПН и переходной области от ПД к ПН.

Условия ПД при разрушении изделий проходят с образованием одной пластической зоны у вершины трещины изделия разрушаются. При таком условии отношение \max глубины пластической зоны под поверхностью изломов к толщине образца или детали определяется выражением $\frac{h_{max}}{t} < 10^{-2}$. При ПД разрушение изделий с ОЦК решеткой будет проходить хрупко по механизму скола или по механизму межзеренного хрупкого разрушения (рисунок 1.28, б). "Названные механизмы разрушения делают возможным низкий, по сравнению с вязким разрушением, уровень искажения кристаллической структуры материала в пластической зоне, оцененной по ширине рентгеновской дифракционной линии" [42, 48]. При ПД разрушение изделий с ГЦК решеткой будет проходить только по механизму межзеренного хрупкого разрушения. "При таком разрушении степень искаженности кристаллической структуры материала на поверхности изломов можно сравнить с искаженностью кристаллической структуры при хрупком разрушении сколом материалов с ОЦК решеткой" [12].



а - статистическое (1-4), ударное (5-11) и импульсное (12,13) нагружения;
 б - микрорельефы изломов при ПД, Пн и переходной области от ПД к Пн.
 1 - сталь 20; 2 - сталь 40; 3 - 15Х2МФА; 4 - 03Ч13АГ19; 5 - сталь 45;
 6 - 40Г18Ф(закалка); 7 - 40Х4Г18Ф (закалка); 8 - 40Х4Г18Ф (закалка+старение);
 9 - Н26Т3 (закалка); 10 - Н32Т3 (закалка); 11 - Н26Х5Т3 (закалка + старение);
 12 - сталь 3; 13 - 40Г18Ф (закалка).

Рисунок 1.28 - "Температурная зависимость отношения h_{max}/t для материалов с ОЦК решеткой (темные точки) и ГЦК решеткой (светлые точки)" [12]

При ПН состоянии разрушение изделий происходит с появлением двух пластических зон под поверхностью изделия: сильнодеформированной микрозоны h_{yh} и слабодеформированной макрозоны h_y . Из-за больших размеров пластических зон, главным образом, макрозоны h_y , отношение h_{max}/t возрастает практически на два порядка и становится $h_{max}/t > 10^{-1}$ (рисунок 1.28, б) [12]. Высокие ПД обуславливают вязкий характер разрушения материалов в условиях

ПН состояния. В основном такое разрушение проходит с образованием ямочного микрорельефа. "Степень искаженности кристаллической структуры материала в слабдеформированной макроzone h_y соизмерима со степенью искаженности структуры материала в пластической zone при хрупком разрушении, а степень искаженности кристаллической структуры на поверхности изломов в местах разрыва перемычек между ямками достигает, по-видимому, максимального значения" [42, 56]. Для материалов с ОЦК и ГЦК решеткой возможно разрушение при ПН состоянии.

Если разрушение материалов происходит в переходной области от ПД к ПН, то значит проходит смешанное разрушение, у которого нет определенного механизма разрушения. Это значит, что не получится показать общую схему формирования пластических зон под поверхностью изломов. Не всегда есть возможность четко обозначить границы макро- и микрозоны под поверхностью изломов из-за небольших размеров пластических зон. Отношение h_{\max}/t принимает значение: $10^{-2} < h_{\max}/t < 10^{-1}$ (рисунок 1.28, а). В такой области по большей части разрушаются материалы с ГЦК решеткой по смешанному механизму (рисунок 1.28, б). "При таком механизме искаженность кристаллической структуры изделия на поверхности изломов соизмерима с искаженностью кристаллической структуры в сильнодеформированной микроzone при вязком разрушении. Низкая энергоемкость разрушения материалов при рассматриваемом механизме обусловлена, по-видимому, малым размером микрозоны ПД" [12].

Рисунок 1.28, а показывает, что в зонах, соответствующих ПД и ПН состоянию, увеличение или уменьшение температуры испытания приводит к незначительному изменению локального напряженного состояния материалов у вершины трещины при всех видах однократного нагружения. в области перехода от ПД к ПН - к более резкому его изменению. В материалах с ОЦК решеткой переход состояния от ПД к ПН связан с достижением нижней критической температуры хрупкости ($T_{\text{хр}}^{\text{H}}$) и появлением на поверхности изломов первых участков вязкой составляющей. "Температурные зависимости отношения h_{\max}/t

для таких материалов имеют S-образный характер, аналогичный серийным кривым ударной вязкости или процента волокна в изломе. Для материалов с ГЦК решеткой данные зависимости имеют более плавный характер" [12].

Сравним для широкого класса материалов с микро- и УМЗ структурой отношение h_{\max}/t с известным критерием механики разрушения $t/(K/\sigma_{0,2})^2 \geq 2,5$, используемым для оценки условий реализации ПД при испытании изделий на статическую трещиностойкость (рисунок 1.29). Из приведенного рисунка видно, что критерий реализации ПД $t/(K/\sigma_{0,2})^2 \geq 2,5$ (на графике отмечен пунктирной линией) является менее жестким, чем предложенный критерий $h_{\max}/t < 10^{-2}$ и соответствует середине переходной области от ПД к ПН [42, 46, 48].

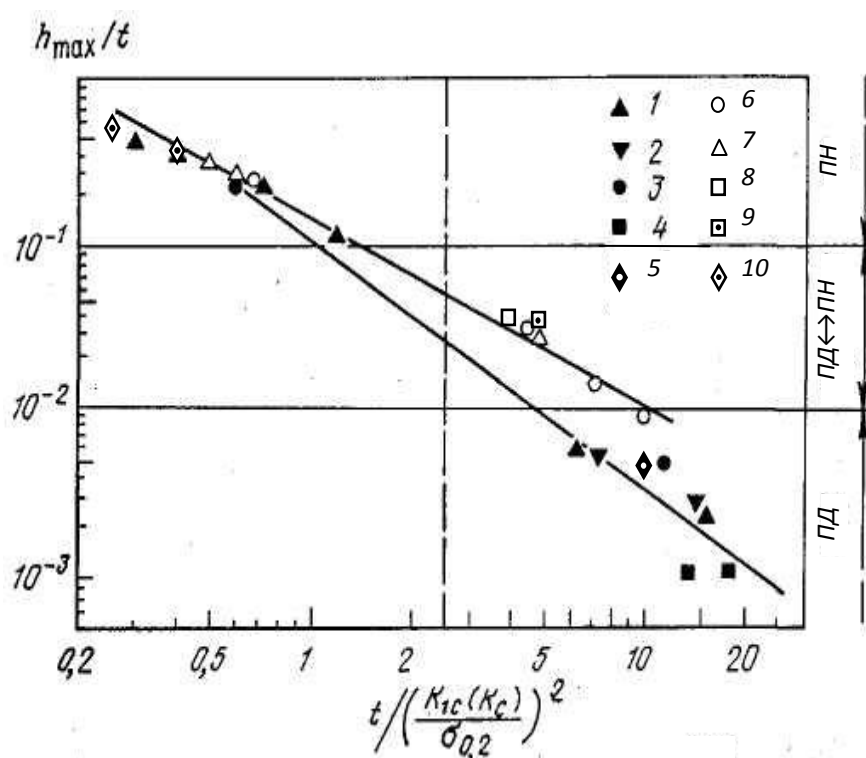
"Признак локального напряженного состояния материала h_{\max}/t , основанный на анализе глубины пластических зон под поверхностью изломов, дает возможность уточнить известный критерий механики разрушения. Из рисунка 1.29 можно сделать вывод, что для определения условий плоской деформации необходимо учитывать класс материала. Для материалов с ОЦК решеткой условия ПД можно записать $t/(K_{1C}/\sigma_T)^2 \geq 5,0$, а для материалов с ГЦК решеткой – $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 10$ " [12].

При таких случаях под поверхностью изломов образуется единственная пластическая зона, а отношение h_{\max}/t становится меньше 10^{-2} (рисунок. 1.29).

Таким же образом можно определить критерии реализации у вершины трещины ПН состояния. Соотношение $t/(K_C/\sigma_{0,2})^2 < 1,0$ является критерием материалов с ОЦК решеткой (рисунок 1.29), а для материалов с ГЦК решеткой – соотношение $t/(K_C/\sigma_{0,2})^2 < 1,4$.

Еще одно локально напряженное состояние материала действует не только на глубину пластических зон под поверхностью изломов, но и на степень искаженности кристаллической структуры материала в данных зонах, которая оценивается по ширине рентгеновской дифракционной линии. Для такой оценки берем безразмерную величину β/β_0 . "Данная величина характеризует отношение ширины дифракционной линии, полученной при съемке пластических зон β , к ширине линии, полученной при съемке эталона β_0 " [42, 46]. Зависимости,

соединяющие h_{\max}/t и β/β_0 , для различных изделий представлены на рисунке 1.30. Если разрушение метастабильных аустенитных сталей при определенных условиях проходит с протеканием фазовых превращений в пластических зонах, то точки на рисунке 1.30 обозначены двойными линиями. Пунктиром на рисунке 1.29 отмечен критерий $t/(K_{1c}/\sigma_{0,2})^2 \geq 2,5$.



- 1 - сталь 20; 2 - сталь 40; 3 - 15X2МФА; 4 - сталь 15; 5 - сталь 10 (после РКУП);
 6 - Д16; 7 - 03X13АГ19; 8 - АК4-1; 9 - АК4-1 (после РКУП);
 10 – АК4-1 (после РКУП).

Рисунок. 1.29 - Связь критериев h_{\max}/t и $t/(K_{1c}(K_c)/\sigma_{0,2})^2$ для материалов с ОЦК решеткой (темные точки) и ГЦК решеткой (светлые точки) при испытании на статическую трещиностойкость обычных (КЗ) материалов (1–4, 6–8) и материалов с УМЗ структурой (5, 9, 10)

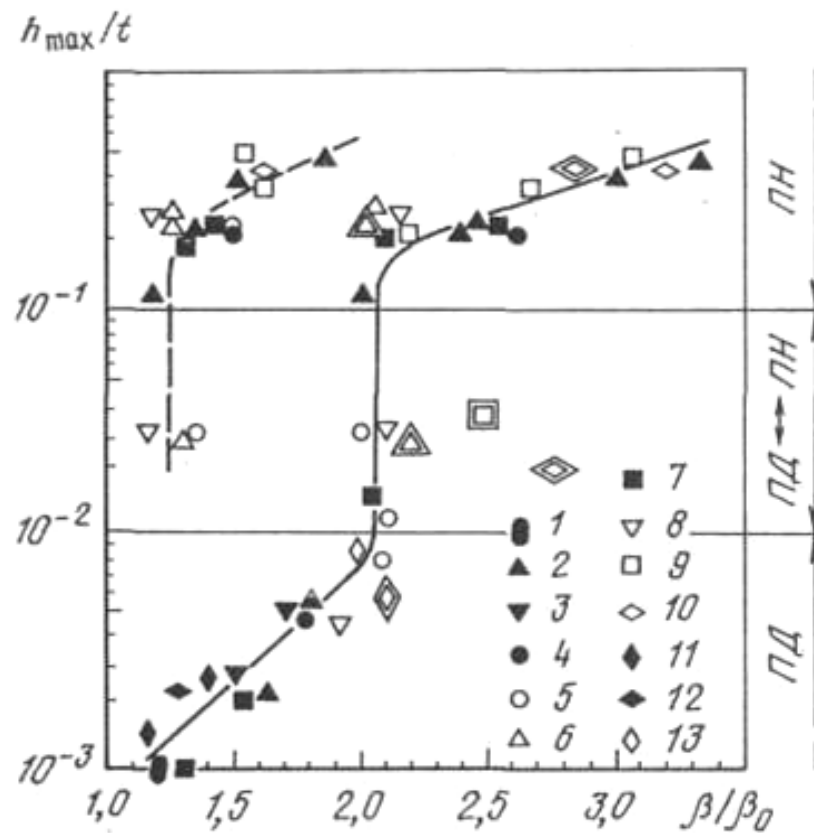
Рисунок 1.30 показывает, что для материалов, разрушение которых не сопровождалось фазовыми превращениями в пластических зонах, зависимости $h_{\max}/t - \beta/\beta_0$ описываются едиными кривыми, независимо от класса материалов и вида однократного нагружения. Отметим на данной зависимости три области [12]:

1. При ПД $\beta/\beta_0 \leq 2,0$ [12].

2. В переходной области от ПД к ПН - $\beta/\beta_0 = 2,0 - 2,1$ [12].

3. При ПН состоянии - $\beta/\beta_0 \geq 2,1$ [12].

"Если на поверхности изломов аустенитных сталей образуются мартенситные фазы или деформационные двойники, то при съемке поверхности таких изломов установить зависимость $h_{\max}/t - \beta/\beta_0$ не представляется возможным (рисунок 1.30)" [42, 56].

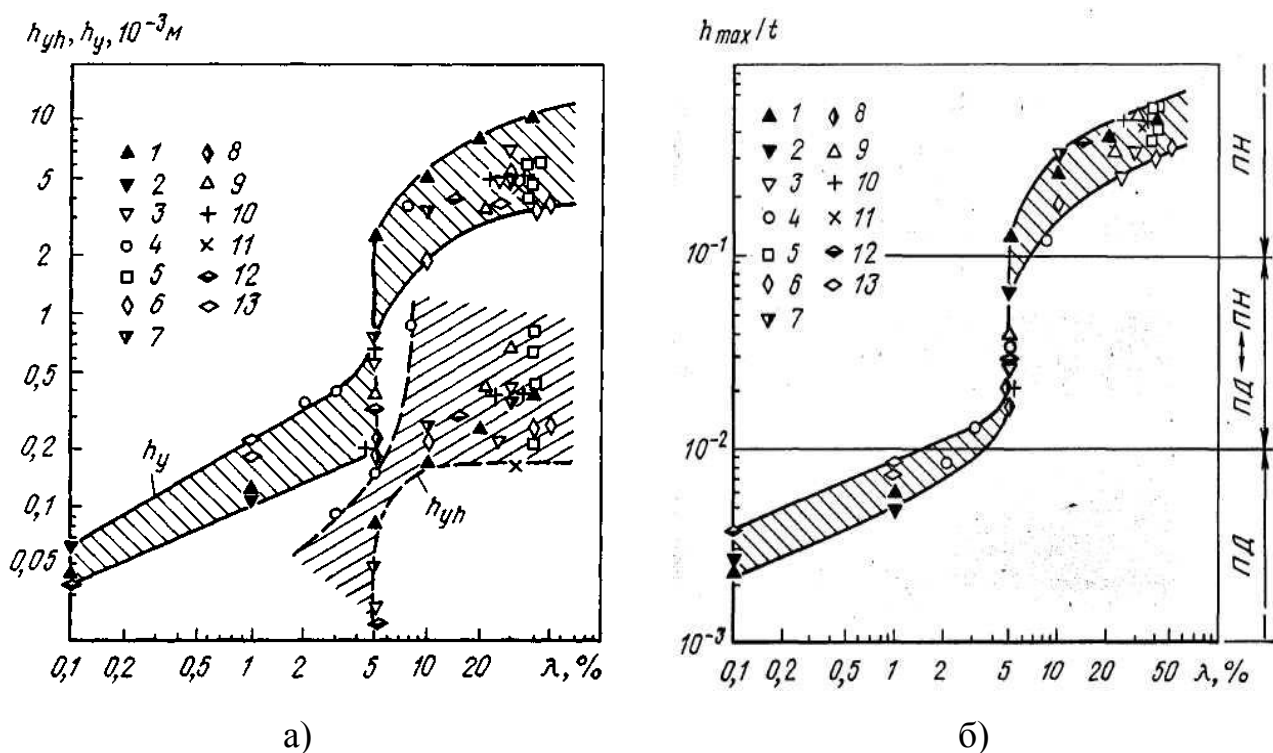


1 - сталь 15; 2 - сталь 20; 3 - сталь 40; 4 - 15X2МФА; 5 - Д16; 6 - 03X13АГ19;
7 - сталь 45; 8 - 40X4Г18Ф (закалка + старение); 9 - 40Г18Ф (закалка);
10 - 40X4Г18Ф (закалка); 11 - Ст3; 12 - сталь 45; 13 - 40Г18Ф [12].

Рисунок. 1.30 - Связь отношений h_{\max}/t и β/β_0 при съемке поверхности изломов (сплошная линия) и слабodeформированной макрозоны (пунктирная линия) статических (1 – 6), ударных (7 – 10) и импульсных (11 – 13) изломов материалов с ОЦК решеткой (темные точки) и ГЦК решеткой (светлые точки) [12]

Напряженном состоянии в центральной части изделия, также называется

локальным напряженным состоянием изделия при разрушении. В центральной части излома измеряют глубину пластической зоны и по которой оценивают локальное напряженное состояние материала. Около поверхности образца напряженное состояние другое. Оно напряжение всегда близкое к ПН состоянию, о чем видно по наличию на поверхности изломов губ среза. Связь размера губ среза λ с глубиной пластических зон под поверхностью изломов и отношением h_{max}/t представлено на рисунок 1.31.



а - связь с глубиной пластических микро- (h_{yh}) и макрозоны (h_y) под поверхностью изломов;

б - связь с отношением h_{max}/t при статическом (1 – 4), ударном (5 – 12) и высокоскоростном импульсном (13) нагружениях образцов из материалов с ОЦК (1, 2) и ГЦК решеткой (3 – 13).

1 – сталь 20, 2 – сталь 40, 3 – 03X13AG19, 4 – Д16, 5 – Н26Т3 (закалка),
 6 – Н32Т3 (закалка), 7 – Н26Х5Т3 (закалка + старение),
 8 – Н32Т3 (закалка + старение), 9, 13 – 40Г18Ф (закалка), 10 – 40Х4Г18Ф (закалка), 11 – 60Х3Г8Н8Ф (закалка), 12 – 40Х4Г18Ф (закалка + старение).

Рисунок 1.31 - Связь размера губ среза λ

Из рисунка можно видеть, что размер губ среза, независимо от класса

материалов и вида однократного нагружения, связан с глубиной пластических зон под поверхностью изломов и локальным напряженным состоянием материала в центральной части образца, определяемым отношением h_{\max}/t . Причем, размер губ среза лучше коррелирует с глубиной пластической макрзоны h_y , чем с глубиной микрзоны h_{yh} (рисунок 1.31, а). С увеличением размера губ среза глубина пластической макрзоны под поверхностью центральной части изломов возрастает. Наиболее сильное возрастание глубины макрзоны наблюдается при $\lambda=5\%$. Поэтому на зависимости « $\lambda - h_{\max}/t$ » (рисунок 1.31, б) можно условно выделить три области [12]:

1. При условии ПД $\lambda < 5\%$;
2. При условии переходной области от ПД к ПН $\lambda = 5\%$;
3. При условии ПН состояния $\lambda > 5\%$.

В результате, мы видим, что размер губ среза в периферийной части изломов достаточно полно отражает локальное напряженное состояние материала в центральной части изломов, полученных при однократных видах нагружения, независимо от структуры и класса материалов. Это положение может быть использовано при диагностике разрушения для оценки локального напряженного состояния материала при аварийном разрушении промышленных конструкций и деталей машин [12].

Рассмотрев примеры, можно выделить следующие основные закономерности разрушения изделий.

1. "Механизм разрушения изделий при однократных видах нагружения определяется локальным напряженным состоянием материала у вершины трещины" [12]. При ПД главным механизмом разрушения является скол или межзеренное хрупкое разрушение; при ПН состоянии - ямочное разрушение; в переходной области от ПД к ПН главным является смешанный механизм разрушения [12].

2. Количество и размеры пластических зон у вершины трещины не зависят от вида однократного нагружения и типа кристаллической решетки материала, а определяются локальным напряженным состоянием материала. При ПД

образуется одна пластическая зона; при ПН состоянии - две пластические зоны: сильнодеформированная микрizona h_{yh} и слабодеформированная макрizona h_y ; в переходной области от ПД к ПН из-за особенностей распределения структурных изменений материала не всегда представляется возможным разделить пластическую зону на микро- и макрizonу [12].

3. "Для оценки локально напряженного состояния материала у вершины трещины при однократных видах нагружения может быть использован единый критерий: отношение наибольшей глубины пластической зоны под поверхностью изломов h_{max} к толщине образца или детали t , т.е. h_{max}/t . Если $h_{max}/t < 10^{-2}$, то разрушение произошло при плоской деформации (ПД); если $h_{max}/t > 10^{-1}$ - при плоском напряженном состоянии (ПН); если $10^{-2} < h_{max}/t < 10^{-1}$, то разрушение произошло в переходной области от ПД к ПН" [12].

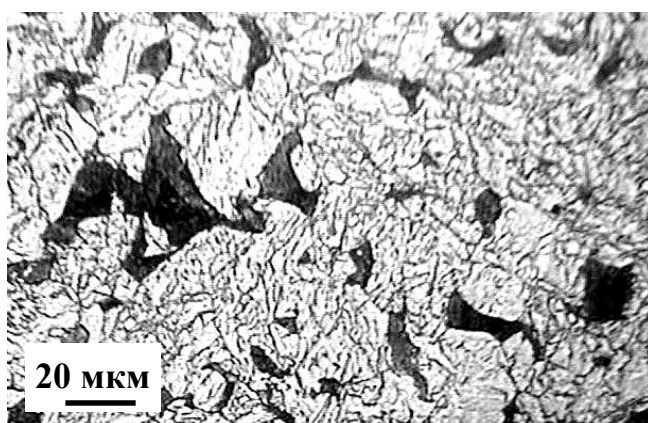
4. Изменение локального напряженного состояния материала у вершины трещины сопровождается изменением не только количества и глубины пластических зон, но и степенью искаженности кристаллической структуры в рассматриваемых зонах. "Если разрушение металлических изделий при однократных видах нагружения не сопровождается фазовыми превращениями в пластических зонах, то, независимо от вида нагружения (статическое, ударное, высокоскоростное импульсное), критерием локального напряженного состояния материала у вершины трещины может служить отношение ширины дифракционной линии, полученной с поверхности излома β , к ширине линии, полученной при съемке эталона β_0 , т.е. β/β_0 " [12].

1.6. Формирование УМЗ структуры в сталях.

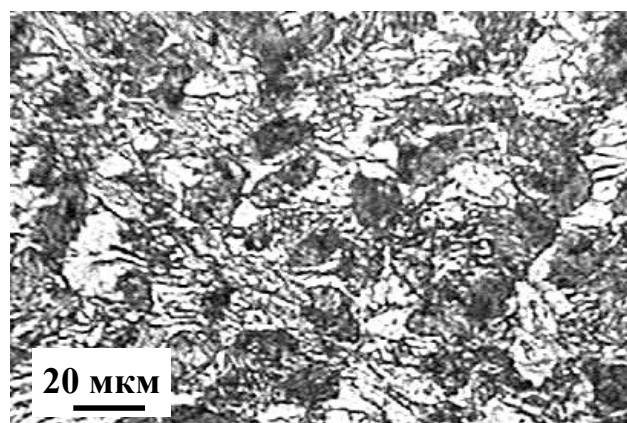
Исходя из параметров пластической деформации, таких как температура, схема, степень и скорость, процессы формирования УМЗ микроструктуры могут многим отличаться друг от друга [12].

Анализ структуры стали после 4 проходов РКУП при 400 °С углеродистых конструкционных сталей марок 20 и 45 показал, что воздействие РКУП приводит

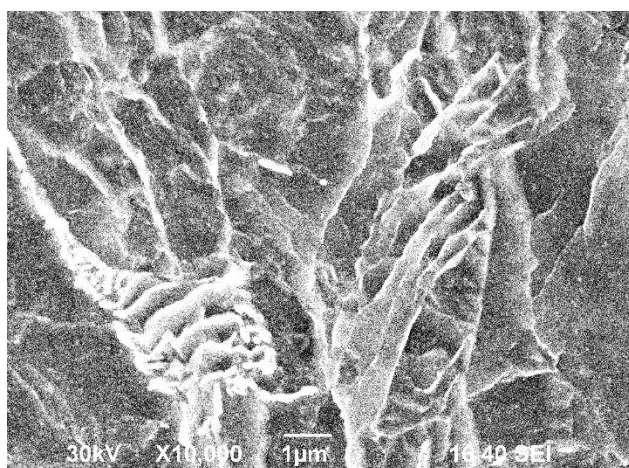
к фрагментации практически всех зерен феррита и в стали 20, и в стали 45 (рисунок 1.32, а, б) [12]. Характерной особенностью микроструктуры (рисунок 1.32, в, г) является наличие деформационных полос, представляющих собой вытянутые в одном направлении зерна феррита, объемная доля которых составляет в стали 20 около 70 %, а в стали 45 - около 60 %. В ферритной составляющей наблюдаются фрагменты со средним размером около 0,44 мкм, объемная доля которых составляет 35 % - в стали 20 и 31 % - в стали 45 [12].



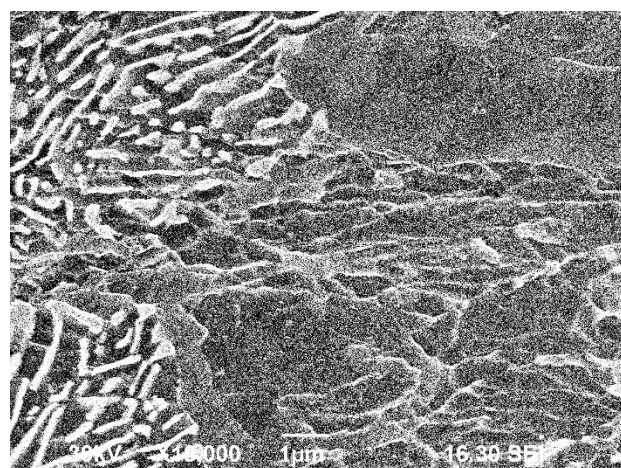
а)



б)



в)



г)

а, в – сталь 20;

б, г – сталь 45 после 4 проходов РКУП

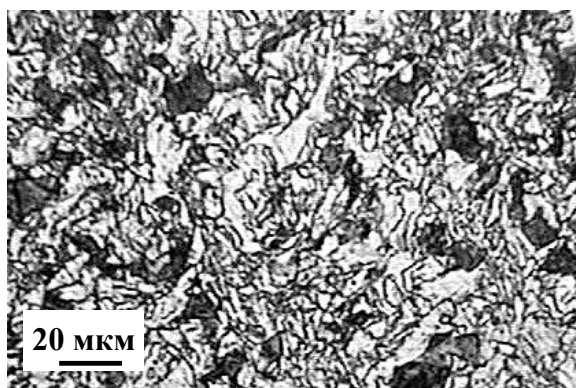
Рисунок 1.32 - Микроструктура стали

После РКУП образцы подвергались нагреву до 200 – 700 °С с выдержками до 60 минут с целью установления термостабильности УМЗ структуры.

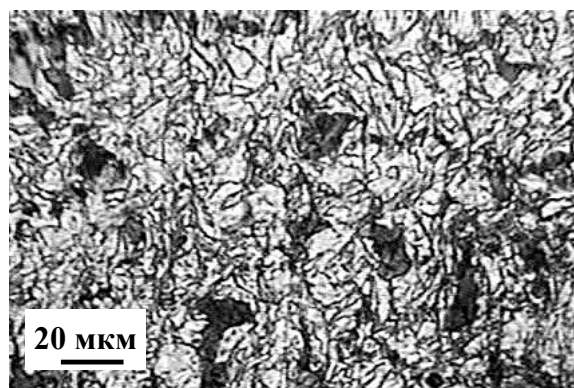
РЭМ анализ показал, что при нагреве УМЗ стали до температуры 200–300 °С в микроструктуре сохраняются деформационные полосы, фрагментация феррита и преимущественно пластинчатое строение перлита (рисунок 1.33) [59].

Если, нагрев произвести до температуры 400 °С в микроструктуре появляются новые зерна феррита правильной геометрической формы с равновесными тройными стыками зерен. Это свидетельствует о начале протекания рекристаллизационных процессов [12].

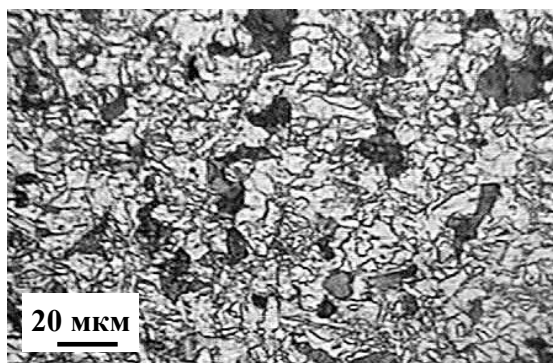
При повышении температуры нагрева до 600 °С (рисунок 1.33, е) количество рекристаллизованных зерен феррита увеличивается, и наблюдается их рост, процессы сфероидизации цементита почти полностью завершаются. Средний размер фрагментов при нагреве до температуры 200–400 °С увеличивается незначительно и составляет в стали 20 от 0,49 до 0,58 мкм, а в стали 45 – от 0,47 до 0,61 мкм. При нагреве до 500 °С размер фрагментов (зерен) в стали 20 увеличивается до 0,93 мкм, а в стали 45 – до 0,75 мкм. При 600 °С величина зерна резко возрастает до 5,6 – 6 мкм. В этой работе авторами сделано предположение, что при рекристаллизации в процессе нагрева наноструктурированных сталей 20 и 45 стадия зародышеобразования отсутствует, миграция границ зерен не наблюдается, механизм соответствует рекристаллизации *in situ* [59].



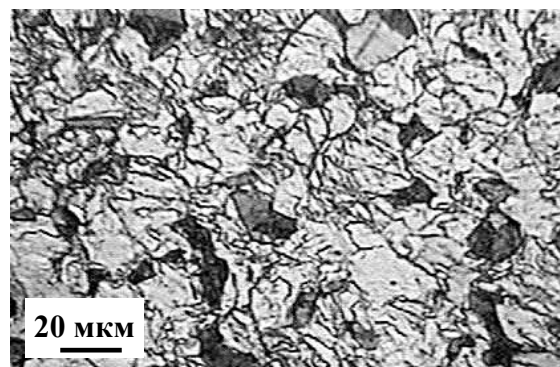
а)



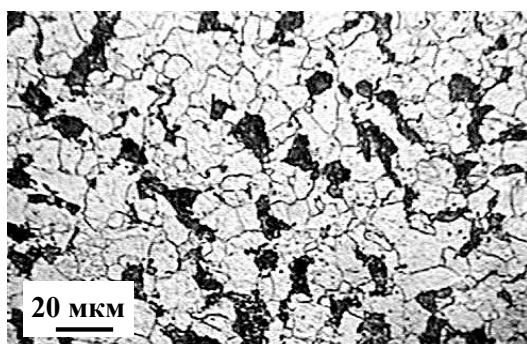
б)



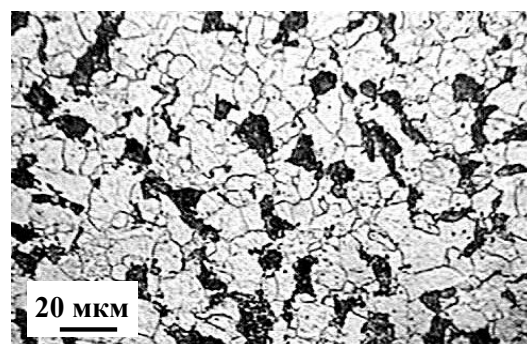
в)



г)



д)



е)

а, б – 200 °С; в, г – 400 °С; д – 500 °С; е – 600 °С
с выдержкой 5 мин. (а, в, д) и 60 мин. (б, г, д, е) [25]

Рисунок 1.33 - Микроструктура стали 20 после РКУП и нагрева

В другой работе авторами рассмотрены механизмы получения УМЗ структуры в процессе многократной ковки при комнатной температуре [29, 30]. Установлено, что УМЗ структура получается в процессе действия двух механизмов. Один из этих механизмов связан с фрагментацией исходных зерен за счет появления деформационных полос сдвига и двойников деформационного происхождения, а другой из этих механизмов связан с развитием фазового превращения $\gamma \rightarrow \alpha'$ по сдвиговому механизму образования мартенсита деформации [12].

При $\varepsilon \leq 0,8$ формируются деформационные полосы, внутри которых активно развивается УМЗ двойникование (рисунок 1.34).

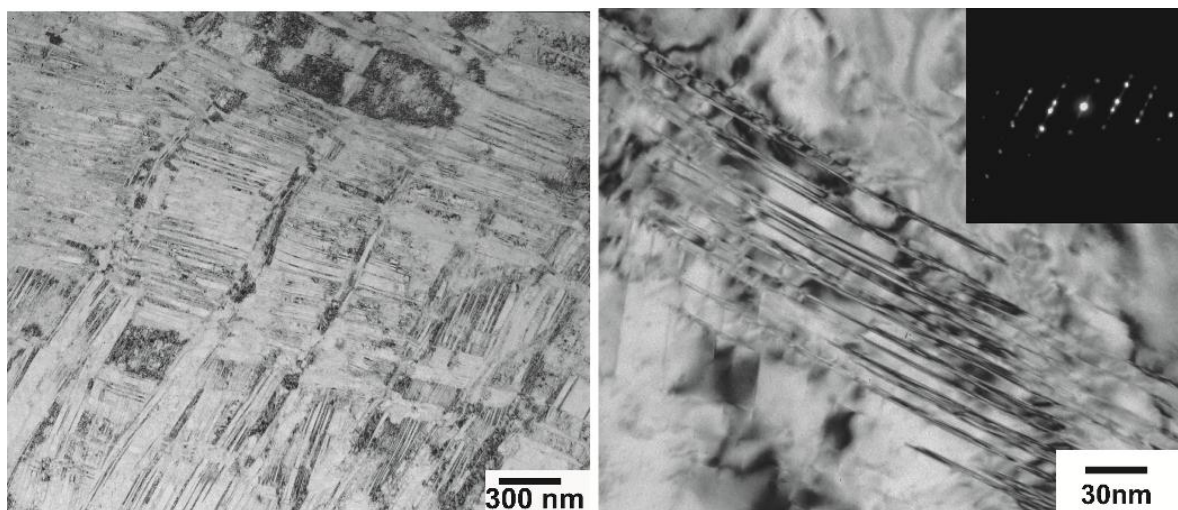


Рисунок 1.34 - "Микроструктура стали 10X18H8ДЗБР после многократнойковки при комнатной температуре до степени деформации 0,8" [12]

"Двойникование играет основную роль в формировании пространственной сетки большеугловых границ в интервале степеней деформации от 0 до 2. Соответственно, в деформированной структуре появляется большое количество двойниковых границ со средним расстоянием между ними 30 нм" [12].

"После $\epsilon \sim 1$ к формированию новых УМЗ зерен подключается мартенситное превращение. При $\epsilon \geq 2$ оно становится основным механизмом, обеспечивающим формирование УМЗ структуры. Зерна α' -мартенсита в первую очередь образуются на деформационных полосах" [12].

Кинетика измельчения образованных зерен в стали 10X18H8ДЗБР при многократной ковке выше при $\epsilon < 2$, когда они образуются в следствии фрагментации исходных зерен деформационными полосами с последующим их разделением двойниками (рисунок 1.35). Если степень деформации становится больше, то скорость образования новых УМЗ зерен падает. "При $\epsilon \sim 4$ структура состоит из УМЗ аустенита и мартенсита, средний размер которых равен 30 нм, причем доля мартенсита составляет 80% (рисунок 1.35)" [12].



Рисунок 1.35. "Зависимость плотности дислокаций и среднего размера УМЗ зерен от степени деформации" [12]

2 Материал и методика исследования

2.1 Исследуемый материал и образцы

Для исследования была выбрана среднеуглеродистая конструкционная сталь 45 (0,45 % С)

Сталь исследована в трех состояниях:

- в крупнозернистом (КЗ) состоянии после нормализации;
- в КЗ состоянии после закалки и высокого отпуска (550 °С);
- с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой после РКУП.

В ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии сталь исследовали после наноструктурирования путем РКУП. РКУП проводили по режиму: закалка от температуры 800 °С в воде + средний отпуск (350 °С) + РКУП при 350 °С (маршрут Вс, n=6, φ = 120°)¹⁾.

2.2 Методики исследования микроструктуры

Исследование микроструктуры КЗ стали 45 проводили на стандартных травленых металлографических шлифах при помощи металлографического микроскопа Zeiss Axiovert 40 MAT. В качестве травителя использовали 4% - ный раствор азотной кислоты в спирте.

Исследование УМЗ стали проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOLJEM2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ²⁾.

¹⁾ РКУП стали провели сотрудники УГАТУ

²⁾ Тонкую структуру стали 45 после РКУП исследовали сотрудники УГАТУ

2.3 Методики механических испытаний

Испытания стали 45 на твердость проходили на твердомере Роквелла. Статическое растяжение круглых образцов диаметром 3 мм произвели на универсальной испытательной машине Н50КТ (рисунок 2.1). Испытания стали на ударную вязкость (KCV) (рисунок 2.2) проводили на маятниковом копре JB-W300 (рисунок 2.3) в интервале температур от -196 до 300 °С, согласно ГОСТ 9454-78.



Рисунок 2.1 – Универсальная испытательная машина Н50КТ
с компьютерным управлением

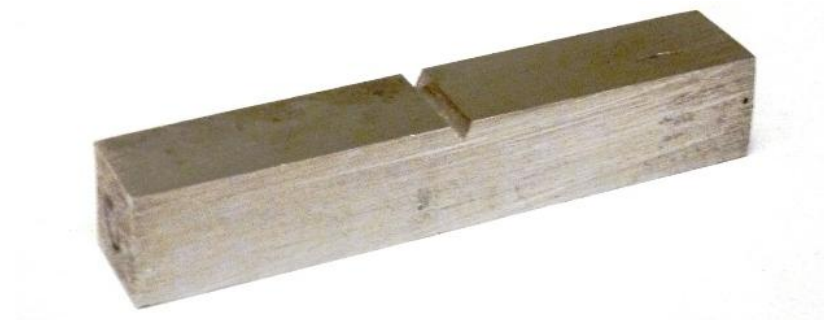


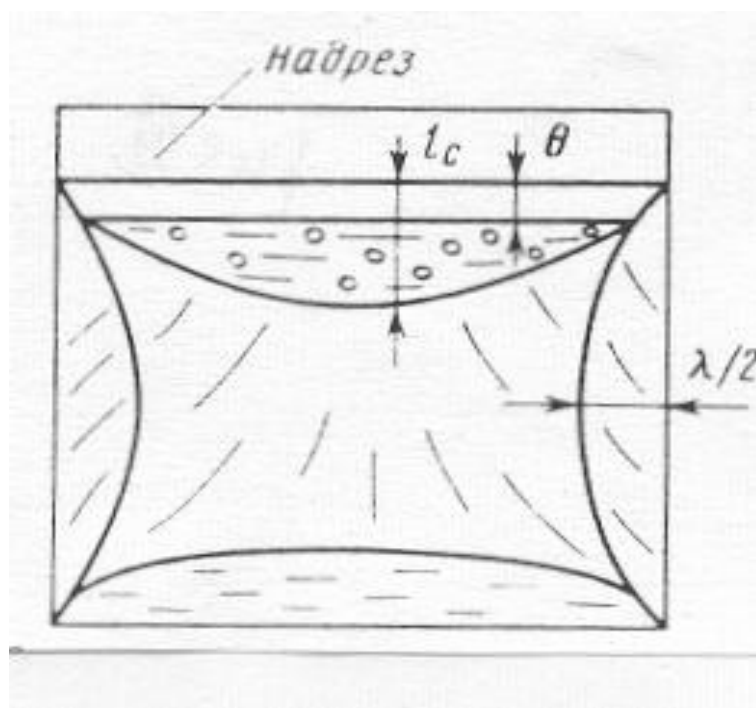
Рисунок 2.2 – Готовый образец для испытаний на KCV



Рисунок 2.3 – Маятниковый копер JB-W300 с компьютерным управлением

2.4 Методика макро- и микрофрактографических исследований

При макрофрактографическом анализе исследовали общий вид изломов, определяли на поверхности ударных изломов размер губ среза λ (рисунок 2.4) и утяжку. При микрофрактографических исследованиях – изучали микрорельеф ударных изломов.



θ - зона вытягивания; l_c - вязкая зона стабильного роста трещины; λ – губы среза.

Рисунок 2.4 – Схема строения излома, полученного при ударном нагружении.

Размер губ среза определялось следующим образом. Замеряли размер губ среза самой широкой их части с левой и правой стороны излома (λ_1 и λ_2).

Общий размер губ среза определяли по формуле (2.1):

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{10} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где λ_1, λ_2 - размер губ среза левой и правой стороны образца.

Утяжку образца вблизи поверхности излома замерыли с помощью штангенциркуля. Расчет утяжки проводили по формуле (2.2):

$$\delta = \frac{t_0 + t_1}{t_0} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

где t_0 – исходная толщина образца;

t_1 – толщина образца у излома.

Микростроение изломов исследовали в растровом электронном микроскопе SIGMA фирмы «ZEISS» (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 - Растровый электронный микроскоп SIGMA фирмы «ZEISS»

2.5 Методика определения скорости коррозии

"Определение скорости коррозии образцов проводили согласно ГОСТ 9.908-85" [33].

Для коррозионных испытаний использовали образцы из стали 45:

- в КЗ состоянии, размером 30x10x3 мм в количестве 5 шт.;
- после РКУП, размером 30x10x3 мм в количестве 5 шт.;

"В качестве коррозионной среды применяли водный раствор NACE: 5% NaCl + 0,5% CH₃COOH, насыщенный H₂S, pH ≤ 3,5, температура раствора T=24 ± 3 °C" [33].

"Сероводород получали из сернистого натрия и соляной кислоты (1:1) на специальной установке. При приготовлении коррозионной среды использовалась дистиллированная вода по ГОСТ 6709-72 с pH около 5,4-6,6; хлорид натрия по ГОСТ 4233-77 и охлажденную CH₃COOH по ГОСТ 61-75 марки ХЧ; H₂S с

содержанием примесей $\leq 0,5\%$, а также азот в газообразной форме первого (или более высокого) сорта. Азот использовался для продувки системы подачи раствора и сероводорода, время продувки составляло 5-10 минут до удаления кислорода, а также для продувки камеры после закрытия (время продувки 1 час или более, расход азота более $100 \text{ см}^3 / \text{мин}$ на 1 литр раствора). В течение остального времени испытаний не менее $10 \text{ см}^3 / \text{мин}$ на литр раствора" [33].

"Рабочая часть образцов проходила предварительное обезжиривание с использованием органических растворителей, нитротолуола по ГОСТ 23487, а затем ее промывали этиловым спиртом по ГОСТ 18300" [33]. "После обезжиривания и промывки спиртом образцы допускалось брать только за нерабочую часть. Затем образцы помещали в ячейки (объем коррозионной ячейки обеспечивает удельный объем коррозионной среды не менее 30 см^3 на 1 см^2 неизолированной рабочей поверхности образца) и подводили коррозионную среду NaCl" [33].

"Перед испытаниями, а также после испытаний и удаления продуктов коррозии с поверхности образцы взвешивали на аналитических весах с точностью до 4-го знака и определяли скорость коррозии V_k , $\text{г}/\text{м}^2\text{ч}$, по формуле (2.3)" [33]:

$$V_k = \frac{m_1 + m_2}{S \cdot t}, \quad (2.3)$$

"где m_1 – масса до испытаний, г;

m_2 – масса после испытаний, г;

S – площадь поверхности образца, м^2 ;

t – время выдержки в растворе, час" [33].

"Для перевода скорости коррозии V_k , $\text{г}/\text{м}^2\text{ч}$, в V_{k1} , $\text{мм}/\text{год}$, использовали формулу (2.4)" [51]:

$$V_{k1} = V_k \cdot a, \quad (2.4)$$

где a – приведенный коэффициент, равный 1,1216.

2.6 Методика исследования коррозионного повреждения поверхности образцов

"После коррозионных испытаний и вычисления скорости коррозии, производили изучение поверхности образцов с использованием конфокального лазерного сканирующего микроскопа (КЛСМ) Lext OLS4000 (рисунок 2.6)" [12].



Рисунок 2.6 – Лазерная конфокальная измерительная сканирующая система
LEXT OLS4000

"Лазерный микроскоп Lext OLS4000 позволяет проводить реконструкцию 3D рельефа поверхности исследуемого образца за счет использования конфокальной оптической схемы, а также высокоточной системы сканирования с разрешением по оси Z до 10 нм и 100 нм в плоскости XY. Программное обеспечение микроскопа позволяет вычислять площадь получаемых поверхностей, а также параметры линейной шероховатости (в соответствии со стандартами ISO 4287, ISO 4288, ISO 1302, ISO 11562, ISO 12085, ISO 13565, DIN 4762, DIN 4768) и 3D параметры поверхностной шероховатости в соответствии со стандартом ISO 25178" [52].

3) Коррозионные испытания проводили сотрудники ОГУ

В настоящем исследовании изучалось изменение площади поверхности из-за коррозионных испытаний в зависимости от типа образца. "Так как развитие коррозионного повреждения поверхности увеличивает разнообразие рельефов этой поверхности, что в свою очередь может использоваться для определения степени коррозионного повреждения. Для получения точного сравнительного анализа в результате исследования использовали значения площади поверхности, вычисленные с полученного кадра и приведенные к площади этого кадра" [60].

"Съемка проходила с использованием объектива 50х с конечным увеличением $\times 1000$; шаг сканирования при съемке составлял 0,1 мкм. Стандартный размер кадра составлял: 260х260 мкм. Образцы в исходном состоянии и после РКУП проходили съемку по схематическому изображению (рисунке 2.7). Образец мысленно делили на три идентичные части и в середине каждой части делали панорамный снимок, состоящий из 4-х кадров" [60].

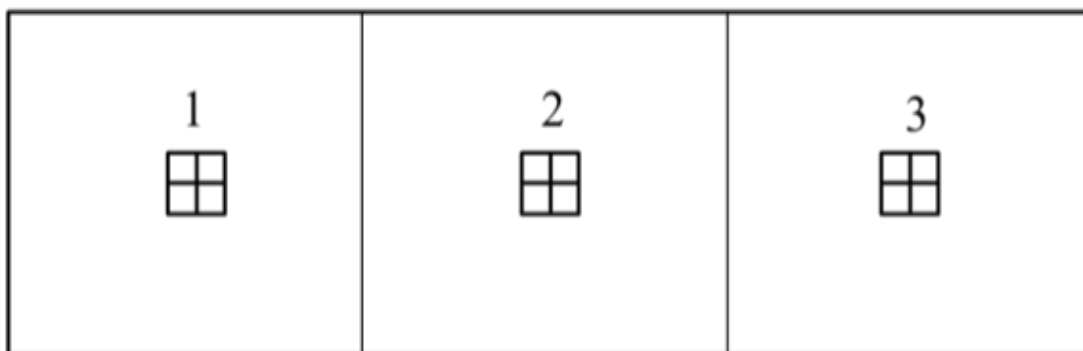


Рисунок 2.7 - Схематическое изображение съемки образцов в исходном состоянии и после РКУП

3 Результаты исследования

3.1 Результаты исследования структуры и свойств стали 45 при растяжении

Сталь 45 исследовали после РКУП в сравнении со стандартной обработкой (закалка + высокий отпуск). Однако, при исследовании механизма коррозии стали дополнительно изготавливали образцы и из стали после нормализации (феррит + сорбит). Микроструктура стали 45 после нормализации и после закалки и высокого отпуска представлена на рисунке 3.1 а, б.

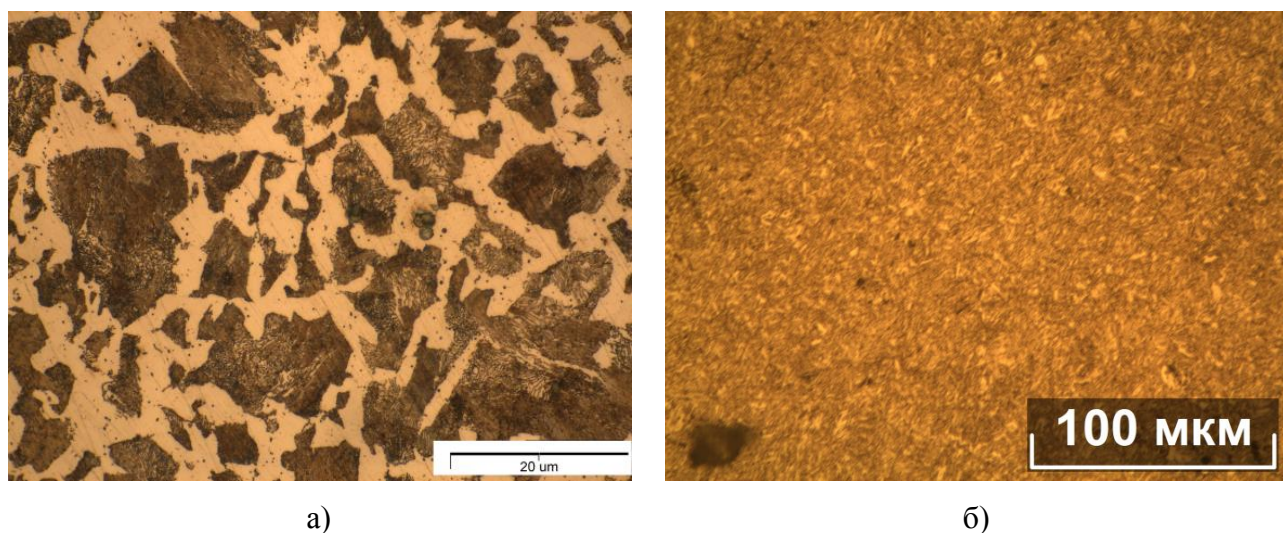
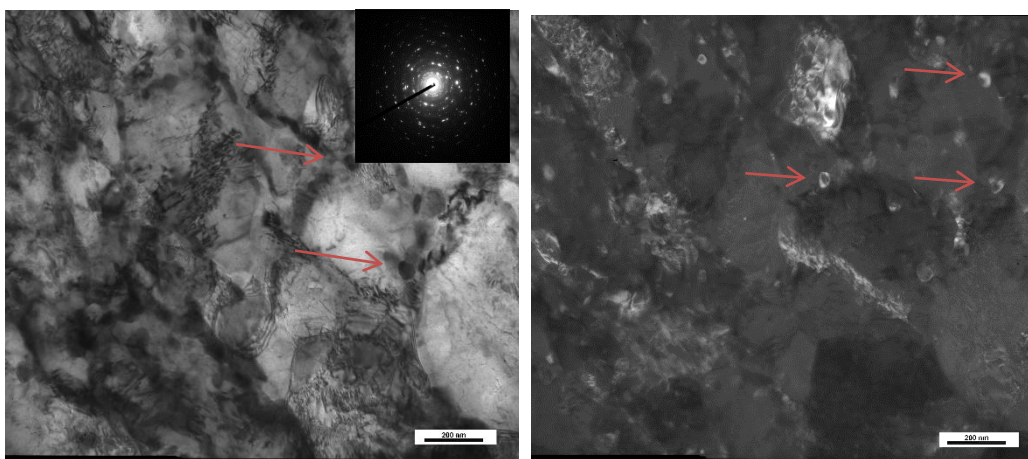


Рисунок 3.1 – Структура стали 45 после нормализации (а) и после закалки и высокого отпуска (x500)

Тонкая структура стали 45 после РКУП показана на рисунке 3.2. Можно предположить, что в результате предварительного нагрева активизируются диффузионные процессы и в пластинах мартенсита начинают выделяться карбиды (показаны на рис. 3.1). Деформационные процессы приводят к появлению полос сдвига, за счет чего обеспечивается дробление мартенситных пластин и выделившихся цементитных частиц. Средний размер зерна составил 560 ± 30 нм; средний размер карбидов – 27 ± 2 нм.



а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение.

Рисунок 3.2 – Тонкая структура стали 45 после РКУП

Из таблицы 3.1 видно, что стандартная обработка стали 45 (закалка + высокий отпуск) повышает, по сравнению с исходным состоянием стали, твердость, примерно, в 1,5 раз; прочностные свойства – в 2,0-3,5 раза и снижает пластичность в 2 раза. РКУП по вышеуказанным режимам дополнительно повышает твердость и прочностные свойства стали в 1,2-1,3 раза и снижает пластичность в 1,6 раза.

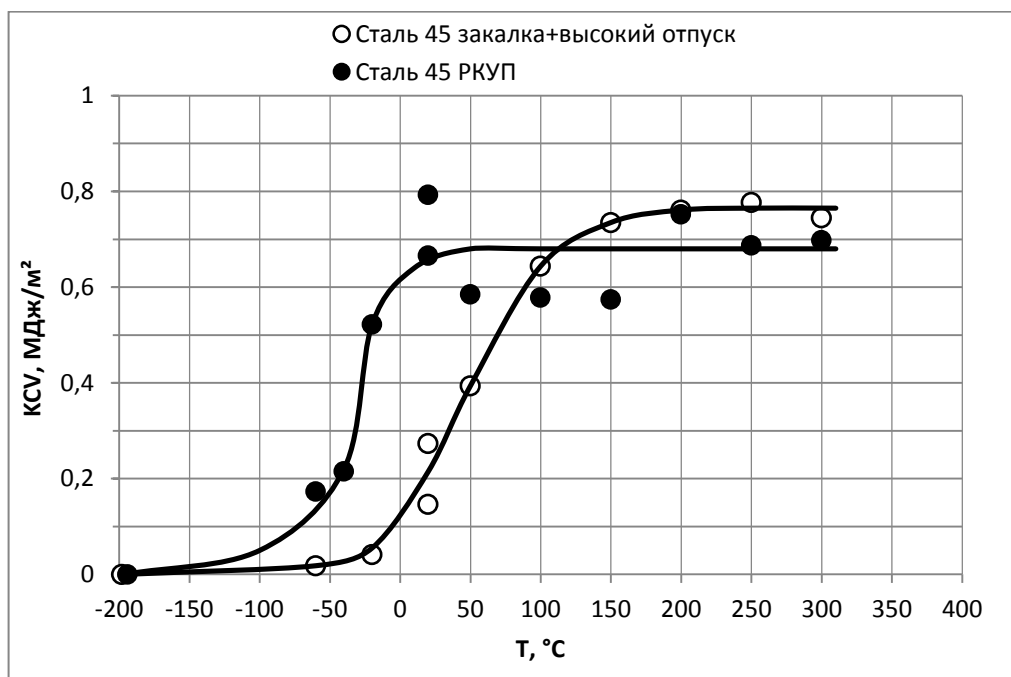
Таблица 3.1 – Средний размер зерна ($d_{cp.}$) и механические свойства стали 45 после различных видов обработки

Состояние стали	$d_{cp.}$, мкм	НВ	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Нормализация	10	204	470	245	17
Закалка + высокий отпуск	-	302	985	839	8
После РКУП	0,56	346	1171	1064	5

Таким образом можно заключить, что РКУП по вышеуказанным режимам, формируя УМЗ структуру, повышает твердость и прочностные характеристики стали 45 в 1,2 раза по сравнению с стандартной обработкой (закалка + высокий отпуск), однако снижает пластичность 1,6 раза.

3.2 Ударная вязкость и механизмы ударного разрушения стали 45 после различных видов обработки

Из графика температурной зависимости ударно вязкости (рис. 3.3) видно, что после РКУП происходит сужение интервала вязко-хрупкого перехода и смещение его в сторону низких температур на 70-80 °С, что благоприятно для конструктивной прочности стали.



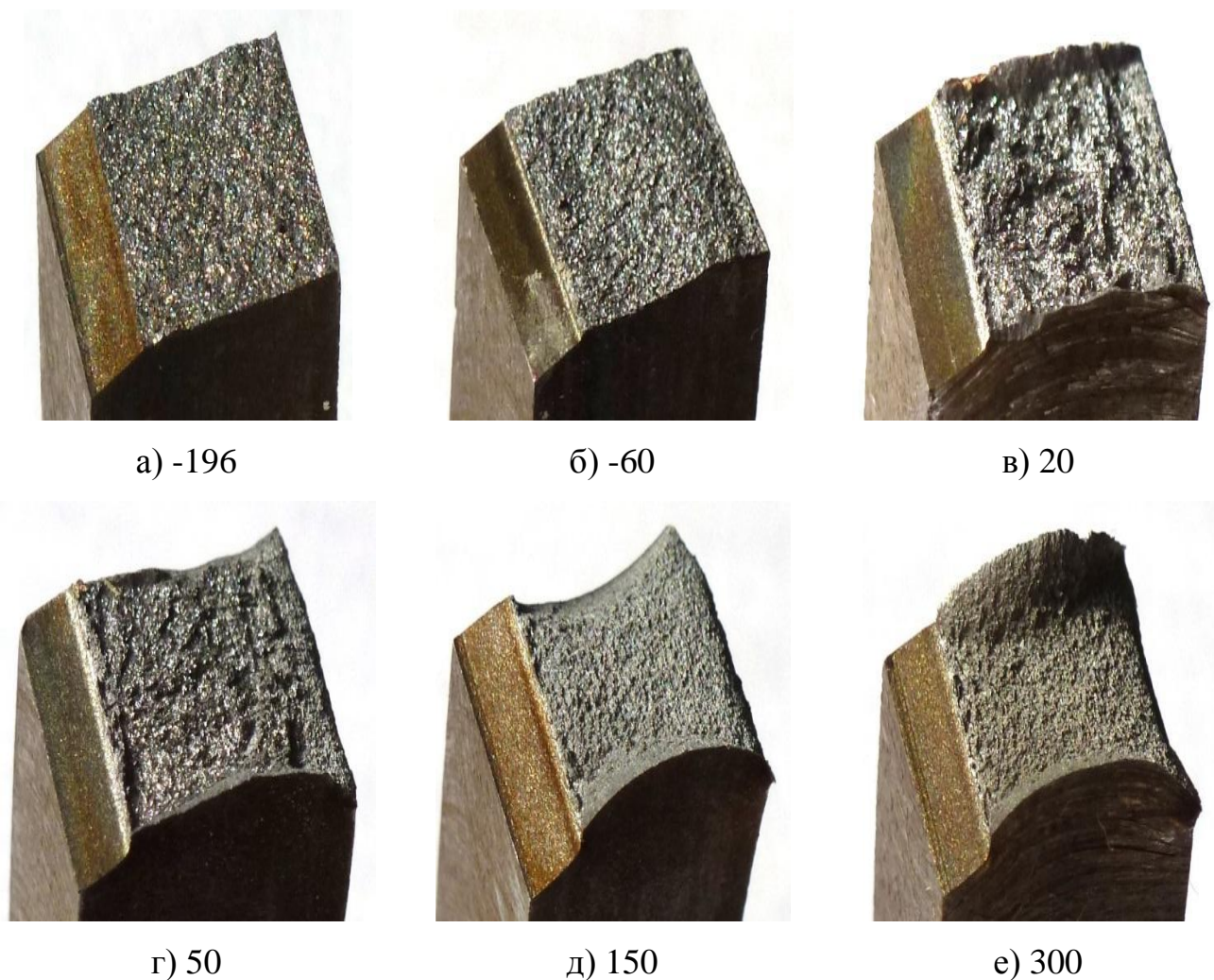
1) после закалки и высокого отпуска (светлые точки);

2) после РКУП (темные точки)

Рисунок 3.3 – Температурная зависимость ударной вязкости (KCV) стали 45

Все ударных изломы, независимо от состояния стали, состоят из относительно плоской центральной части и губ среза. На изломах стали, полученных при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, губы среза практически отсутствуют (рисунок 3.4, а и рисунок 3.5, а). С повышением температуры испытания размер губ среза и утяжка образцов вблизи изломов возрастают. При этом температурная зависимость размера губ среза (рисунок 3.6, а, б), хорошо коррелирует с температурной зависимостью ударной вязкости (рисунок 3.3, а, б).

В нижней области вязко-хрупкого перехода образцы из стали 45 с КЗ структурой разрушились хрупко (рисунок 3.4, а, б). В средней области вязко-хрупкого перехода образцы разрушились вязко-хрупко, но с преобладанием хрупкой (кристаллической) составляющей (рисунок 3.4, в, г). В верхней области вязко-хрупкого перехода образцы разрушились вязко (рисунок 3.4, д, е).

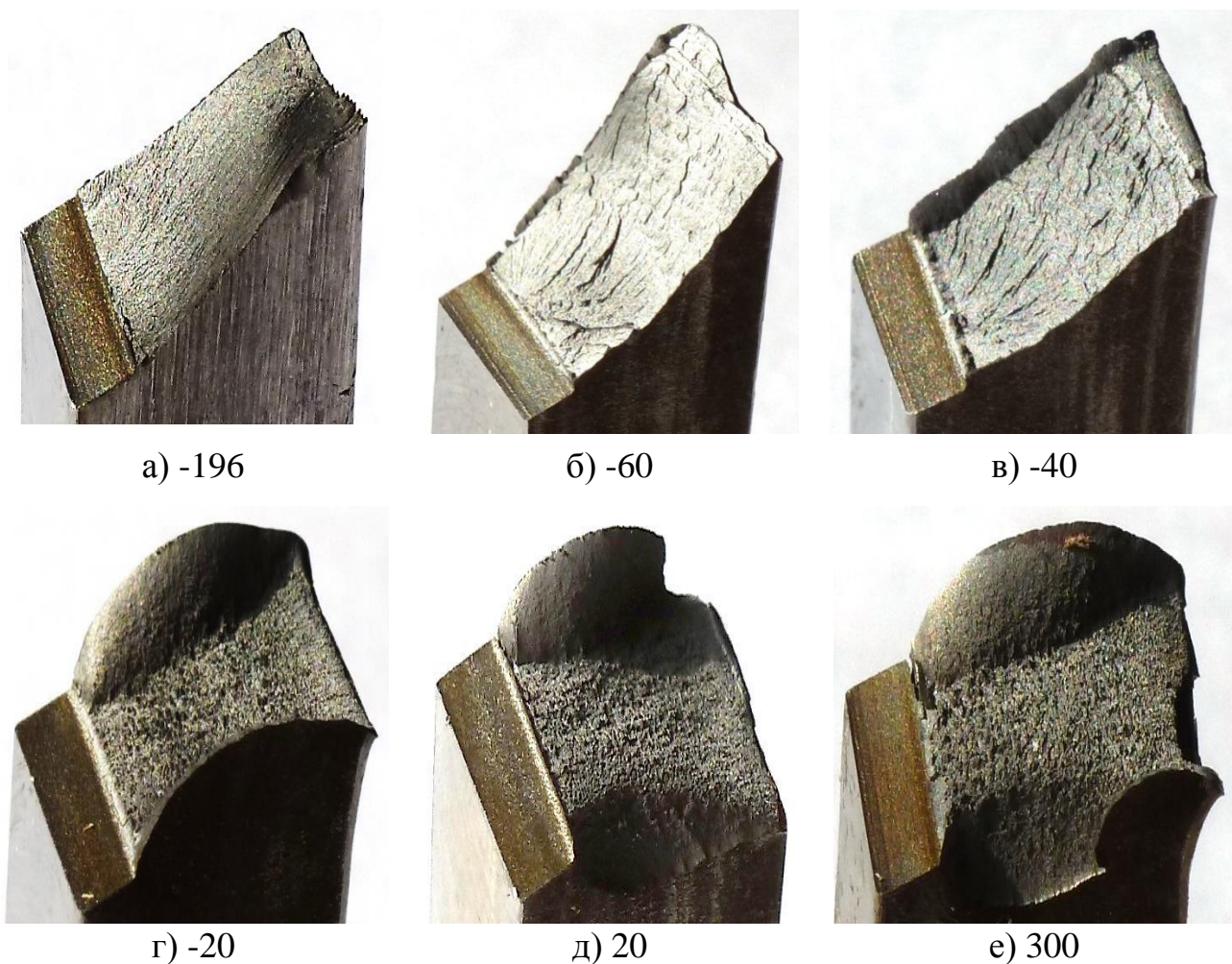


Изломы получены в нижней области вязко-хрупкого перехода, при температурах -196 °С (а) и -60 °С (б); в средней области, при 20 °С (в) и 50 °С (г) и в верхней области, при 150 °С (д) и 300 °С (е)

Рисунок 3.4 – Общий вид изломов стали 45 после закалки + высокого отпуска

Образцы из стали 45 с УМЗ структурой в нижней области вязко-хрупкого перехода разрушились хрупко, но под некоторым углом к сечению образца (рисунок 3.5, а, б). В средней области вязко-хрупкого перехода некоторые

образцы, как и в предыдущем случае, разрушились хрупко и под некоторым углом к сечению образца (рисунок 3.5, в, г). В верхней области вязко-хрупкого перехода все образцы разрушились вязко (рисунок 3.5, д, е).

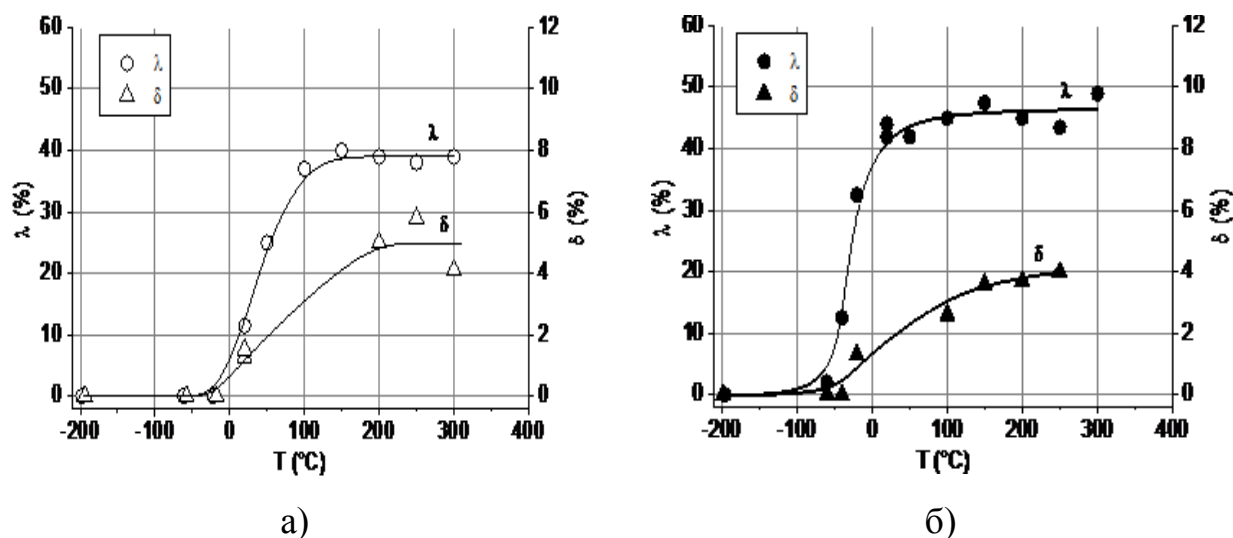


Изломы получены в нижней области вязко-хрупкого перехода, при температурах -196°C (а) и -60°C (б); в средней области, при -40°C (в) и -20°C (г) и в верхней области, при 20°C (д) и 300°C (е)

Рисунок 3.5 – Общий вид изломов стали 45 после РКУП.

Микрофрактографический анализ показал, что в нижней области вязко-хрупкого перехода (при -196°C) сталь 45 после закалки и высокого отпуска (в КЗ состоянии) разрушается по механизму скола. Причем фасетки скола видны как в очаге разрушения (рисунок 3.6, а), так и в центральной части излома (рисунок 3.6, б). В средней области вязко-хрупкого перехода (при 50°C) сталь вблизи очага разрушается с получением ямочного микроскопического рельефа

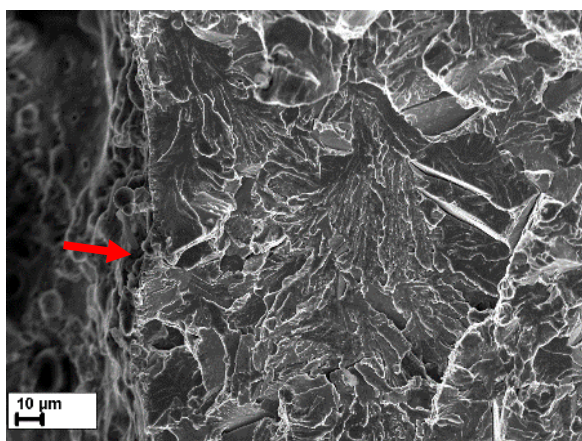
(рисунок 3.6, в), а в середине излома – по механизму скола, но с небольшими участками ямочного микрорельефа (рисунок 3.6, г). В верхней области вязко-хрупкого перехода (при 150 °С), как вблизи очага разрушения, так и в середине изломов – разрушения с получением ямочного микрорельефа (рисунок 3.6, д, е).



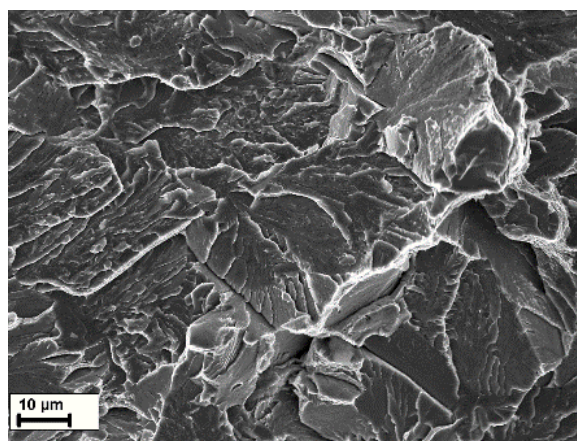
а - после закалки и высокого отпуска; б - после РКУП

Рисунок 3.6 – Размер губ среза (λ) и утяжки (δ) в образцах из стали 45

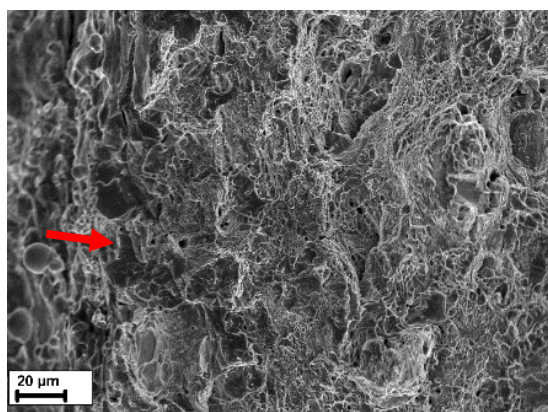
Разрушение стали 45 после РКУП (с УМЗ структурой) в нижней области вязко-хрупкого перехода (при -196 °С) произошло по механизму квазискола (рисунок 3.8, а, б). Непосредственно в очаге разрушения можно выделить зону с мелкими, гладкими ямками, длиной 4-5 мкм (рисунок 3.8, а). В средней области вязко-хрупкого перехода (при -40 °С) длина зоны с мелкими, гладкими ямками равна 110 мкм (рисунок 3.7, в); в центральной части излома разрушение произошло по механизму квазистола (рисунок 3.8, г). В верхней области вязко-хрупкого перехода (при 20 °С) длина зоны с мелкими, гладкими ямками достигает 150 мкм (рисунок 3.8, д), а в центральной части излома микрорельеф ямочный (рисунок 3.8, е). Внутри ямок видны включения, возможно карбиды.



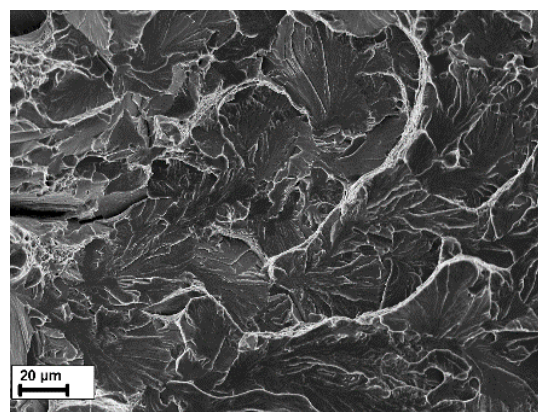
а) x500



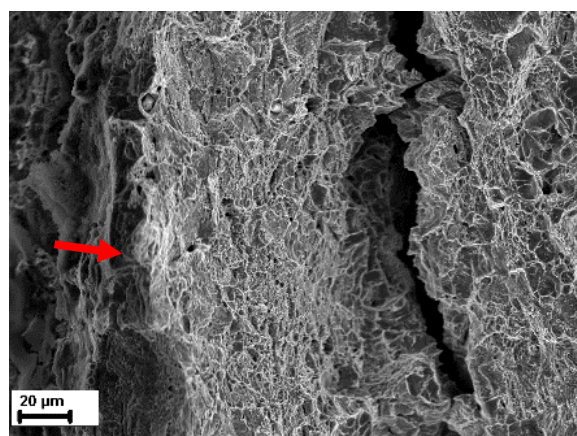
б) x1000



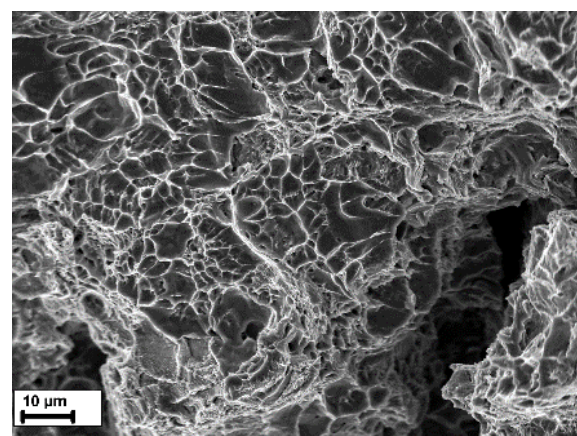
в) x500



г) x500



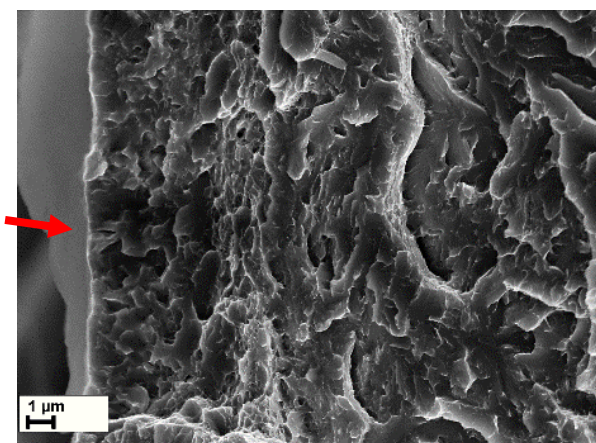
д) x500



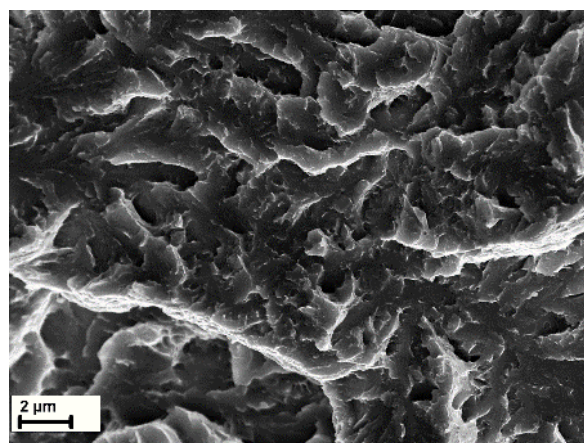
е) x1000

Рисунок 3.7 – Микрорельеф ударных изломов стали 45 после закалки и высокого отпуска. Изломы получены в нижней области вязко-хрупкого перехода, при температуре -196°C (а, б); в средней области – при 50°C (в, г); в верхней области, при 150°C (д, е), в очаге разрушения (а, в, д) и в центральной части изломов (б, г, е). Стрелкой отмечен очаг разрушения.

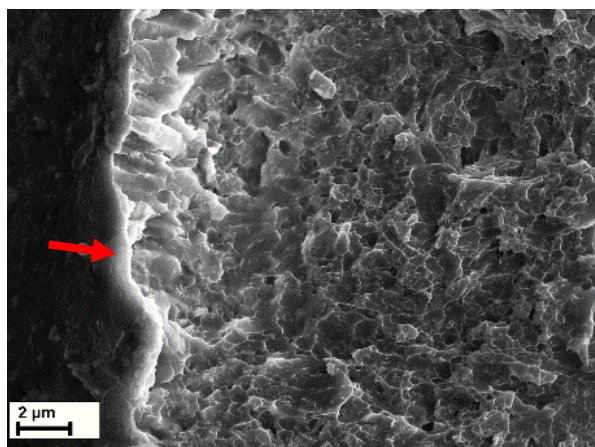
а, в, г, д – x500; б, е – x1000



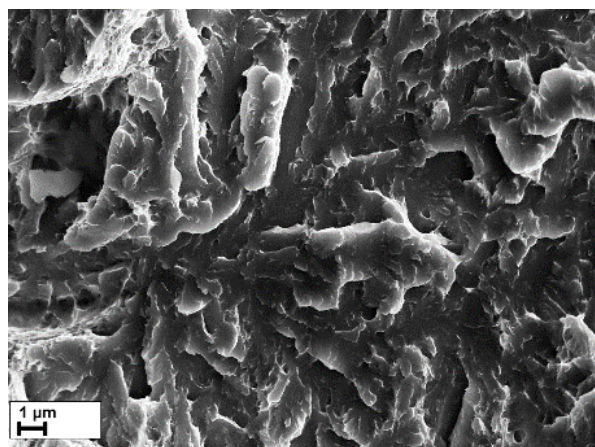
а)



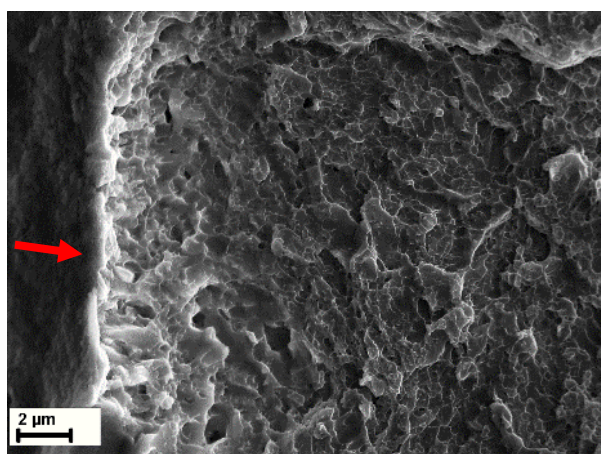
б)



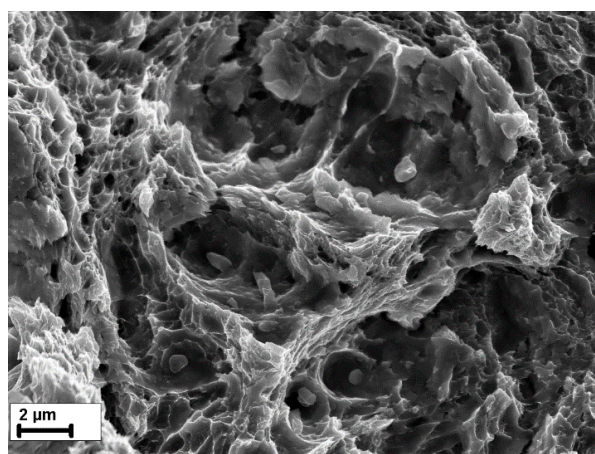
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.8 – Микрорельеф ударных изломов стали 45 после РКУП. Изломы получены в нижней области вязко-хрупкого перехода, при температуре -196°C (а, б); в средней области, при -40°C (в, г); в верхней области, при 20°C (д, е), в очаге разрушения (а, в, д) и в центральной части изломов (б, г, е).

Стрелкой отмечен очаг разрушения. а-е – $\times 5000$

Таким образом, можно заключить, что в стали 45 после РКУП по вышеуказанным режимам, происходит сужение интервала вязко-хрупкого перехода и смещение его в сторону низких температур на 70-80 °С, что благоприятно для конструктивной прочности стали. Причем, температурная зависимость губ среза хорошо коррелирует с температурной зависимостью ударной вязкости. Доминирующим механизмом разрушения стали 45 после закалки и высокого отпуска (в КЗ состоянии) в нижней и средней области вязко-хрупкого перехода является скол, а в верхней области – ямочный микрорельеф. Доминирующим механизмом разрушения стали 45 после РКУП (в УМЗ состоянии) в нижней и средней области вязко-хрупкого перехода является квазискол, а в верхней области – ямочный микрорельеф.

3.3 Закономерности коррозионного повреждения стали 45 в сероводородсодержащей среде после различных видов обработки

Результаты коррозионных испытания стали 45 показали, что скорость коррозии в сероводородсодержащей среде зависит от состояния стали. Так, самую низкую скорость коррозии сталь имеет после нормализации; самую высокую – после РКУП (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Средняя скорость коррозии (V_k) стали 45 в сероводородсодержащей среде после различных видов обработки

Состояние стали	После нормализации	После закалки + высокого отпуска	После РКУП
Скорость коррозии $V_k, \text{ г/ч}\cdot\text{м}^2$	0,400	0,765	0,785

Из рисунка 3.9 видно, что макрорельеф поверхности образцов после различных видов обработки и коррозии мало отличается друг от друга.



а)



б)



в)

а) после нормализации; б) после закалки + высокого отпуска; в) после РКУП

Рисунок 3.9 – Образцы после испытаний в различном состоянии

Рассмотрим механизмы коррозионного повреждения стали 45 после различных видов обработки.

На поверхности образцов из стали 45 после нормализации и коррозионного воздействия, помимо общей коррозии можно наблюдать небольшое количество коррозионных язв (рисунок 3.10, а).

После закалки, высокого отпуска и коррозионного воздействия данной стали количество язв увеличивается более чем в 2,5 раз (таблица 3.3) и появляются участки, занятые коррозией пятнами (рисунок 3.10, б), причем язвы расположены не равномерно по поверхности образца; встречается небольшое количество блистеров. Можно предположить, что, в данном случае, неравномерное распределение коррозионные язвы и пятен связано с наличием карбидных фаз. Именно в дефектной структуре стали на границах фаз «феррит-цементит» предпочтительно образование коррозионных язв и пятен.

На поверхности образцов из стали 45 после РКУП (в УМЗ состоянии) и последующей коррозии, на фоне общей коррозии, видна коррозия пятнами и коррозионные язвы (рисунок 3.10, в). Количество язв увеличивается более, чем в 8 раз по сравнению с исходным состоянием, а сами коррозионные язвы располагаются равномерно по поверхности образцов.

Такой механизм коррозии УМЗ стали возможно обусловлен наличием, помимо дефектности структуры и межфазовых границ, пористостью материала, неизбежно возникающей при любых видах ИПД. Микро- и нанопоры на поверхности образцов могут служить очагами развития коррозионных язв.

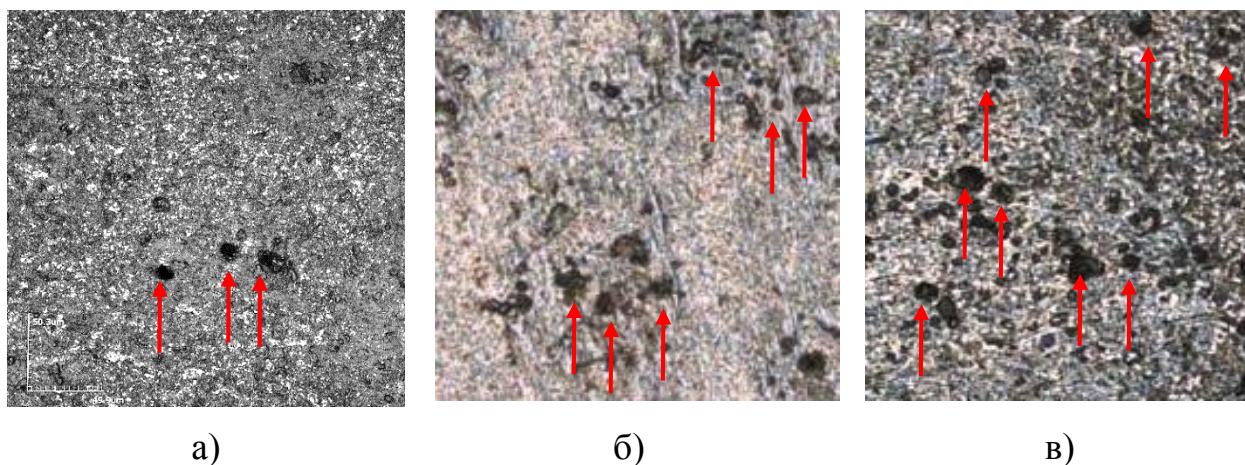


Рисунок 3.10 – Микрорельеф поверхности образцов из стали 45 после нормализации + коррозии (а), после закалки + высокого отпуска + коррозии (б), после РКУП + коррозии (в), (КЛСМ). Стрелками указаны некоторые коррозионные язвы. x1000

Из таблицы 3.3 можно проследить кинетику развития коррозионных язв, в зависимости от вида обработки стали.

Таблица 3.3 – Параметры коррозионных язв на поверхности образцов из стали 45

Состояние стали	Исследуемая область, мкм	Количество язв, шт.	Средний диаметр язв, мкм	Средняя глубина язв, мкм	Площадь, занятая язвами, мкм ² / %
Нормализация	640x640	9	9	8	920 / 0,23
Закалка + высокий отпуск	640x640	24	11	8	2700 / 0,66
После РКУП	640x640	74	11	10	7820 / 1,91

Таким образом, можно заключить, что скорость коррозии стали 45 в сероводородсодержащей среде зависит от состояния стали. Самую низкую скорость коррозии (0,400 г/ч·м²) сталь имеет после нормализации; самую высокую

(0,785 г/ч·м²) – после РКУП. После закалки и высокого отпуска сталь имеет промежуточное значение скорости коррозии (0,765 г/ч·м²).

Основным механизмом коррозии КЗ стали 45 является общая коррозия, коррозионные язвы и пятна. После нормализации стали имеет место небольшое количество коррозионных язв. После закалки и высокого отпуска стали количество коррозионных язв увеличивается более чем в 2,5 раза, причем язвы расположены неравномерно по поверхности образцов.

В УМЗ стали 45, полученной путем РКУП, коррозия также включает в себя общую коррозию, коррозионные язвы и пятна. Однако количество язв увеличивается более чем в 8 раз по сравнению с исходным состоянием, а сами коррозионные язвы располагаются равномерно по поверхности образцов.

Заключение

1. РКУП по предложенным режимам повышается твердость и прочностные характеристики стали 45 с УМЗ структурой в 1,2 раза по сравнению со стандартной обработкой стали (закалка + высокий отпуск), однако снижается пластичность 1,6 раза.

2. После РКУП происходит сужение интервала вязко-хрупкого перехода и смещение его в сторону низких температур на 70-80 °С, что благоприятно для конструктивной прочности стали.

3. Температурная зависимость губ среза на поверхности ударных изломов, независимо от состояния стали 45, хорошо коррелирует с температурной зависимостью ударной вязкости.

4. Скорость коррозии стали 45 в сероводородсодержащей среде зависит от состояния стали. Самую низкую скорость коррозии (0,400 г/ч·м²) сталь имеет после нормализации; самую высокую (0,785 г/ч·м²) – после РКУП. После закалки и высокого отпуска сталь имеет промежуточное значение скорости коррозии (0,765 г/ч·м²).

5. Основным механизмом коррозии КЗ стали 45 является общая коррозия, коррозионные язвы и пятна. После нормализации стали имеет место небольшое количество коррозионных язв. После закалки и высокого отпуска стали количество коррозионных язв увеличивается более чем в 2,5 раза, причем язвы расположены неравномерно по поверхности образцов.

6. В УМЗ стали 45, полученной путем РКУП, коррозия также включает в себя общую коррозию, коррозионные язвы и пятна. Однако количество язв увеличивается более чем в 8 раз по сравнению с исходным состоянием, а сами коррозионные язвы располагаются равномерно по поверхности образцов.

Список использованной литературы

1. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы / Р. З. Валиев, И. В. Александров. - М.: Академкнига, 2007. - 398 с.
2. Головин, Ю. И. Введение в нанотехнологию / И. Ю. Головин. – М.: «Машиностроение – 1», 2003 – 112 с.
3. Андриевский, Р. А. Наноструктурные материалы. Уч. пособие / Р. А. Андриевский, А. В. Рагуля. - М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 117 с.
4. Андриевский, Р. А. Наноструктурные материалы – состояние разработок и применение / Р. А. Андриевский // Перспективные материалы. 2001. №6. С.5–11.
5. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И.Менделеева), 2002, т. XLVI, №5, с. 50-56.
6. Алымов, М. И. Механические свойства нанокристаллических материалов / М. И. Алымов. – М.: МИФИ, 2004. – 32 с.
7. Матренин, С. В. Наноструктурные материалы в машиностроении: уч. пособие. Томский политехнический университет / С. В. Матренин. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. - 186 с.
8. Valiev, R. Z. Ultrafine-grained materials prepared by severe plastic deformation / ed. By R.Z. Valiev // Annales de Chimie. Science des Materiaux. – 1996. – vol.21. – № 6-7. – p. 369 -520.
9. Furukawa, M. The use of severe plastic deformation for microstructural control / M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon // Mater. Sci. Eng. A., – 2002. – vol. 324. - p.82–90.
10. Xu, C. The evolution of homogeneity in an aluminum alloy processed by high pressure torsion / C. Xu, Z. Horita, T. G. Langdon.// Acta Mater., – 2008. – vol. 56. – p. 5168-5176.

11. Langdon, T. G. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: achieving exceptional properties through grain refinement / T. G. Langdon // *Acta Materialia.*, – 2013. – vol. 61 (19). – p.7035-7059.
12. Клевцов, Г.В. Прочность и механизмы разрушения объемных наноструктурированных металлических материалов: учебное пособие / Г. В. Клевцов и др.; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2016. – 240 с. ISBN 978-5-4221-0913-5
13. Segal, V. M. Materials processing by simple shear / V. M. Segal // *Materials Science and Engineering A.* 1995. V. 197. P. 157–164.
14. Vorhauer, A. On the homogeneity of deformation by high pressure torsion / A. Vorhauer, R. Pippan // *Scripta Materialia.* 2004. № 51. P. 921–925
15. Valiev, R. Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation / R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov // *Progress in Materials Science.* 2000. V. 45. P. 103–189.
16. Валиев, Р. З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивную пластическую деформацию/ Р. З. Валиев // *Российские Нанотехнологии.* 2006. Т. 1. № 1–2. С. 208–217.
17. Iwahashi, Y. An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing [Текст] / Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon // *Acta Mater.* -1997. -V. 45. -P. 4733–4741.
18. Iwahashi, Y. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials [Текст] / Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon // *Scripta Materialia.* -1996. -V. 35. -№ 2. -P. 143 - 146.
19. Ma, A. Characteristics of plastic deformation by rotary-die equal-channel angular pressing/ A. Ma, Y. Nishida, K. Suzuki, I. Shigematsu, N. Saito // *Scripta Materialia.* 2005. № 52. P. 433–437.
20. Raab, G. I. Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels/ G. I. Raab // *Materials Science and Engineering.* 2005. V. 410–411. P. 230–233.

21. Raab, G. J., Valiev R. Z., Lowe T. C., Zhu Y. T. Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP-Conform / G. J. Raab, R. Z. Valiev, T. C. Lowe, Y. T. Zhu // *Materials Science and Engineering* 2004. V. 382. P. 30–34.
22. Перспективные материалы. Структура и методы исследования / Учебное пособие/ Под ред. Д. Л. Мерсона. ТГУ, МИСиС, 2006.–536с.
23. Салищев, Г. А. Формирование субмикроструктурной структуры в титане при пластической деформации и ее влияние на механические свойства / Г. А. Салищев, О. Р. Валиахметов, Р. М. Галеев // *Металлы*, – 1996. – № 4. – с. 86-91.
24. Салищев, Г. А. Механические свойства титанового сплава ВТ6 с микроструктурной и субмикроструктурной структурами / Г. А. Салищев, Р. М. Галеев, С. В. Жеребцов // *Металлы*, – 1999. - № 6. – с.84-87.
25. Humphreys, F.J. Developing Stable Fine-Grain Microstructures by Large Strain Deformation / F.J. Humphreys, P.B. Prangnell, J.R. Bowen, A. Gholinia, C. Harris // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, – 1999. – vol. 357. – p. 1663-1681.
26. Belyakov, A. Strain induced grain evolution in polycrystalline copper during warm deformation / A. Belyakov, W. Gao, H. Miura, T. Sakai // *Metall. Mater. Trans.*, – 1998. – vol. 29A. – p. 2957-2965.
27. Salishchev, G.A. Structure and Density of Submicrocrystalline Titanium Produced by Severe Plastic Deformation / G.A. Salishchev, R.M. Galeev, S.P. Malysheva, M.M. Myshlyaev // *Nanostructured Mater.*, – 1999. – vol. 11. – p. 407-414.
28. Salishchev, G.A. Development of submicrocrystalline titanium alloys using isothermal forging / Salishchev G.A., Zherebtsov S.V. // *Mater. Sci. Forum.*, – 2004. –vols. 447- 448. – p.459-464.
29. Saito, Y. Novel ultra-high straining process for bulk materials - development of the accumulative roll - bonding (ARB) process / Y. Saito // *Acta Mater.*, - 1999. - Vol.47. - P.579- 583.
30. Tsuji, N. Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process/ N. Tsuji // *Scripta Mater.*, – 1999. – vol.40. – №7. – p.795-800.

31. Valiev R. Z., Langdon T. G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // *Progress in Materials Science*. 2006. V. 51. P. 881 - 981.
32. Федорченко, В. И. Коррозия металлов: учебное пособие/ В. И. Федорченко. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. - 127 с.
33. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости (Дата введения 01.01.87).- М.: ИПК Из-во Стандартов, 1999 г.
34. Hadzima, B. Microstructure and corrosion properties of ultrafine-grained interstitial free steel / B. Hadzima, M. Janecek // *Materials Science and Engineering A* 462, 2007, pp 243-247.
35. Zhang, L. Sulphuric acid corrosion of ultrafine-grained mild steel processed by equal-channel angular pressing / L. Zhang, M. Aibin, J. Jinghua // *Corrosion Science* 75, 2013, pp 434-442.
36. Клевцов, Г.В. Коррозионная стойкость наноструктурированной стали 10 с алмазоподобным покрытием / Г. В. Клевцов, Р. З. Валиев, Н. А. Клевцова, Л. Л. Ильичев., Е. В. Кушнаренок, М. Р. Кашапов., А. Г. Рааб, А. В. Ганеев // *Фундаментальные исследования*, 2012. - № 6-2. - С. 441-443.
37. Ботвина, Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности / Л. Р. Ботвина. - М.: Наука, 2008. 334с.
38. Владимиров, В. И. Физическая природа разрушения материалов / В. И. Владимиров. - М.: Металлургия, 1984. - 280 с.
39. Энгель, Л. Растровая электронная микроскопия: Справочник / Л. Энгель, Г. Клингеле. - М.: Металлургия, 1986. - 232 с.
40. Фрактография и атлас фрактограмм: Справочник: Пер. с англ. Пер. Е.А. Шур, Ред. М. Л. Бернштейн. - М.: Металлургия, 1982. - 489 с. : ил.
41. Бичем, К. Д. Микропроцессы разрушения/ К. Д. Бичем // *Разрушения*. - М.: Мир, 1973, Т. 1. - С, 265 - 275.

42. Клевцов, Г. В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г. В. Клевцов, Л. Р. Ботвина, Н. А. Клевцова, Л. В. Лимарь. - М.: МИСиС, 2007. - 264 с.
43. Клевцова, Н. А. Разрушение аустенитных сталей и мартенситные превращения в пластических зонах / Н. А. Клевцова, О. А. Фролова, Г. В. Клевцов. - М.: Изд-во Академии Естествознания, 2005. 155с.
44. Клевцов, Г. В. Прочность и механизм разрушения наноструктурированного алюминиевого сплава АК4-1 в широком интервале температур / Г. В. Клевцов, М. В. Фенесюк // Фундаментальные исследования, 2012. № 3. Часть 2. С. 391 - 395.
45. Владимиров, В. И. Физическая природа разрушения материалов / В. И. Владимиров. - М.: Металлургия, 1984. 280 с.
46. Мороз, Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов / Л. С. Мороз. Л.: Машиностроение, 1984. 224 с.
47. Клевцов, Г. В. Механизм ударного разрушения стали 10 с субмикроструктурной структурой в интервале вязко-хрупкого перехода / Г. В. Клевцов, Р. З. Валиев, Г. И. Рааб, Н. А. Клевцова // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 8. С. 9-13.
48. Ботвина, Л. Р. Макро- и микрофрактографические особенности рассредоточенного ударного разрушения в стали 45 в интервале вязко-хрупкого перехода / Л. Р. Ботвина, Г. В. Клевцов // Металловедение и термическая обработка металлов, 1985. № 2. С. 27 - 29.
49. Клевцов, Г. В. Влияние низких температур на микромеханизм разрушения материалов с ОЦК и ГЦК структурой при однократных видах нагружения / Г. В. Клевцов, Н. А. Клевцова // Известия РАН. Серия физическая, 2008. Т.72. № 9. С. 1363 - 1367.
50. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В. Г.Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. - 640 с.

51. Матвиенко, Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 328 с.
52. Тольяттинский Государственный Университет [электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.tltsu.ru/uscience/Equipment/detail.php?ID=39593>
53. Хеллан, К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
54. Клевцов, Г. В. О связи локального напряженного состояния материала с кинетикой развития пластических зон и микромеханизмом разрушения при однократных видах нагружения / Г. В. Клевцов, Н. А. Клевцова // *Металловедение и термическая обработка материалов*, 2000, № 2. С. 15–22.
55. Клевцов, Г. В. Пластические зоны и диагностика разрушения металлических материалов / Г. В. Клевцов. – М.: МИСИС, 1999. 112 с.
56. Клевцова, Н. А. Разрушение аустенитных сталей и мартенситные превращения в пластических зонах / Н. А. Клевцова, О. А. Фролова, Г. В. Клевцов . - М.: Изд-во Академии Естествознания, 2005. 155 с.
57. Калачев, М. Д. Деформационное упрочнение металлов / М. Д. Калачев. Минск: Наука и техника, 1980. 256 с.
58. Клевцов, Г.В. Оценка локального напряженного состояния при разрушении наноструктурированных материалов с ОЦК и ГЦК решеткой / Г .В. Клевцов, Н.А. Клевцова, Р.З. Валиев, И.Н. Пигалева, О.А. Фролова // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*, 2016. Т. 21, №. 3. С. 772-775.
59. Bathias С. There is no infinite fatigue life in metallic materials// *Fatigue Fract. Engng. Mater. Sci.*, 1999 V. 22, №.7. P. 559–566.
60. Мерсон, Е.Д. Количественный анализ изломов при помощи конфокальной лазерной сканирующей микроскопии / Е.Д. Мерсон, В.А. Данилов, Д.Л. Мерсон // *Вектор науки ТГУ*, 2015. № 4. С. 68-75.

Приложение А

Список публикаций автора по теме исследования:

1. Пигалева, И.Н. Механические свойства и механизм коррозии наноструктурированной стали 45 / И.Н. Пигалева, Е.Д. Мерсон, А.В. Ганеев, А.В. Улюкин, Г.В. Клевцов // Сборник тезисов 9-ой Международной конференции ФППК. - Черноголовка. - 2016. - С.123;

2. Улюкин, А.В. Влияние наноструктурирования на ударную вязкость стали 45 в широком интервале температур / А.В. Улюкин // Сборник тезисов научно-практической конференции Студенческие дни науки ТГУ. - Тольятти. - 2017. (принято в печать).