

Аннотация

В данной работе исследована статическая трещиностойкость стали 45, которая была подвержена процессу наноструктурирования, путём равноканального углового прессования (РКУП), и получившая в последствие ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру. Проведено сравнение УМЗ стали со сталью 45 прошедшей наиболее распространённую термообработку для данной марки стали (закалка + средний отпуск), и имеющая крупнозернистую (КЗ) структуру.

В первой главе. Коротко рассказано о стали 45, о её свойствах и об областях её применения. Приведены, так же описания изменений свойств сталей других марок, с ультрамелкозернистой и нано структурой. И поверхностно рассмотрен применяемый метод наноструктурирования – РКУП.

Во второй главе рассказываются о проведённых испытаниях и о методиках их проведения.

В третьей главе мы исследуем безопасность труда при проведении испытаний, и возможность их влияния на экологию.

Четвёртая часть включает в себя результаты всех проведённых испытаний и исследований.

Пояснительная записка содержит: 56 страниц, 23 рисунков, 9 таблиц, 33 источника.

ABSTRACT

The graduation work is devoted to the static crack resistance of grade 45 steel subjected to the process of nanostructuring by the method of equal channel angular pressing (ECAP) and thus acquiring ultrafine-grain (UFG) structure.

In this work we compare the UFG steel with the coarse grain steel of grade 45 that passed the most common heat treatment for this grade of steel (quenching + tempering).

In the first part of the work grade we study grade 45 steel, its properties and areas of application. There is a description of changes in properties of ultrafine-grained and nanostructured steels of other brands as well. A brief overview of the ECAP method is also included in this part.

The second part describes the tests conducted and the methods used.

In the third part we investigate the work safety of the tests and their impact on the environment.

The results show that the static crack resistance of steel 45 after standard treatment (quenching + high tempering) is $69 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, whereas after ECAP, according to the above-mentioned regimes, it equals to $53 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Criteria for fracture mechanics, macro- and microfractographic analysis data, and the h_{max} / t criterion indicate that the static destruction of steel 45, both after hardening + high tempering and after ECAP, occur under conditions of planar deformation. The relationship of the depth of the plastic zone below the surface of the fractures in the region of friction cracking with the static crack resistance of steel 45, both after hardening + high tempering, and after ECAP, is described by the equations respectively: $h_y = \frac{1}{12\pi} \cdot \frac{K_{1c}^2}{\sigma_{0.2}^2}$ and $h_y = \frac{1}{8\pi} \cdot \frac{K_{1c}^2}{\sigma_{0.2}^2}$.

The explanatory note contains 57 pages, 23 figures, 9 tables, 33 sources.

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Аналитический обзор.....	7
Глава 2. Материал и методика проведения экспериментов.....	26
Глава 3. Результаты проведённых испытаний	40
Глава 4. Безопасность и экологичность технического объекта	44
Заключение	52
Список используемой литературы	53

Введение

Востребованность какого-либо конструкционного материала (КМ) определяется набором заданных свойств: определённое соотношение между прочностью и пластичностью, вязкость разрушения и др., которые характеризуют так называемую конструкционную прочность.

Металлические материалы имеют оптимальное соотношение прочности и пластичности по сравнению с другими материалами, от части из-за этого так велика доля сплавов и сталей в общем объёме КМ в мировой промышленности, которая превышает 90% [1]

Для дальнейшего развития техники требуется обеспечить промышленность КМ с комплексом высоких физико-механических свойств, осуществить это можно освоив инновационные технологий упрочнения преимущественно железоуглеродистых сплавов [2, 3].

В последние десятилетия повышение прочностных свойств КМ осуществлялось за счёт разработки сплавов с новым фазовым и химическим составом. В настоящее же время в мировой практике популярны новые направления повышения свойств путём получения объёмно-наноструктурированных конструкционных материалов за счет формирования ультрамелкозернистой и нанокристаллических структур. Значительный интерес к данным материалам объясняется тем, что их конструкционные и эксплуатационные свойства сильно рознятся со свойствами крупнозернистых аналогов.

Однако существующие технологии, благодаря которым можно добиться ультрамелкозернистой и нанокристаллической структуры, относительно дороги, а в сумме с ценной самого материала делают данную обработку нерентабельной. Поэтому для первичного материала мы выбрали оптимальный по соотношению цены и конструкционной прочности сплав железа и углерода - Сталь 45.

Одним из самых распространённых технологий получения ультрамелкозернистой и нанокристаллических структур является

Равноканальное угловое прессование (РКУП). Мы подвергли сталь 45 РКУП и сравнили свойства со Сталь 45 закалка + средний отпуск.

Цель: Определить статическую трещиностойкость стали 45 в наноструктурированном состоянии с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой с оценкой локального напряженного состояния материала в сравнении со стандартной обработкой стали (закалка + высокий отпуск) с крупнозернистой структурой (КЗ).

Задачи исследования:

- Испытать сталь 45 в двух состояниях на твердость и растяжение при комнатной температуре и -196 0С.
- Разработать методику и дюар для испытаний образцов на K1c в среде жидкого азота.
- Провести испытание статическую трещиностойкость стали 45 в двух состояниях.
- Провести анализ макро- и микроструктуры, фактографический анализ стали 45 в двух состояниях.
- Провести рентгеноструктурный анализ изломов стали 45 в двух состояниях для оценки локального напряженного состояния материала.
- Определить коэффициент статической трещиностойкости стали 45 с УМЗ и с КЗ структурой

Глава 1. Аналитический обзор.

1.1 Назначение и свойства стали 45

Сталь – это сплав, в котором основные компоненты железо (не менее 45%) и углерод (от 0,1 до 2,14 %). Сталь пользуется сегодня постоянным спросом в самых разных областях промышленности. Без неё трудно возводить города, монтировать трубопроводы, производить транспорт, технику, разнообразные агрегаты и детали [4].

По данным Международной ассоциации стали (англ. World Steel Association) производство стали в мире в 2011 году составило 1 490 060 (в тыс. тонн), в том числе 112 434 (в тыс. тонн) в России и странах СНГ [5].

Один из наиболее востребованных сплавов – сталь 45. Характеристики и свойства определяют ее популярность на рынке металлопроката. Относится она к разряду конструкционных углеродистых качественных сталей [4]. Этот сплав стали отличается от других набором особых характеристик, которые присущи только этой марке. Она отличается применением и высокой функциональностью, уникальным составом химических соединений, совокупностью литейных и других производственных параметров.

Из стали 45 производят валы всех видов, бандажи, шпиндели, цилиндры различных видов, кулачки разнообразной формы. По сути, применяется для конструкций и устройств, функциональным назначением которых является устойчивость к огромным нагрузкам, где требуется продемонстрировать повышенные показатели износостойкости, прочности, нечувствительности к коррозии.

В составе стали марки 45 в соответствии с ГОСТ находятся такие элементы, как фосфор, мышьяк, медь, никель, марганец и другие вещества. Данная сталь обладает большим набором механических характеристик. Поэтому она способна вынести практически все климатические и температурные колебания. Испытывают данный вид стали при температурном интервале от 200 до 600 °С.

Данная сталь относится к тем материалам, которые трудно поддаются сварке, однако, при этом у нее отсутствует отпускная способность. Эта ее особенность часто очень хорошо влияет на изготовление сложных форм и деталей. Благодаря характеристикам данной стали, ударная вязкость изделий из нее всецело зависит от толщины взятого листа, причем наибольшим значением будет обладать самый толстый исходник. Но, даже несмотря на данный параметр, можно с уверенностью сказать, что практически любая конструкция, изготовленная из стали этой марки, выдержит практически любые, в том числе и самые интенсивные воздействия.

Это стало возможным благодаря применяемым способам обработки, а также производственному процессу, который разработан в соответствии с ГОСТ. Безусловно, в мире еще не создали материалы, обладающие бесконечной выносливостью к различным воздействиям, поэтому данный металл в этом смысле не исключение. Но благодаря высоким свойствам сырья, из которых производят материал, у него великолепные показатели [6].

1.2 УМЗ и нано структурированная сталь

Именно благодаря распространённости и особым характеристикам данной марки стали мы решили взять её за исходный материал для образцов. Часть из них мы подвергли стандартной ТО для Ст 45 – закалка + высокий отпуск (QT), а оставшиеся образцы отправили на интенсивную пластическую деформацию методом РКУП (TF), что позволило получить объёмную субмикрозернистую структуру.

Целью создания наноструктурированных и субмикрозернистых сталей является получение материала, имеющего повышенные прочностные и физико-механические характеристики. Создание наноматериалов в масштабах промышленного производства стали и чугуна, в настоящее время не представляется возможным. Однако материалы с похожей структурой уже неоднократно получали ранее, и их свойства были весьма интересны. Например, Сверхпрочная наноструктурированная сталь:

Японские ученые получили сталь, имеющую зернистую структуру, ориентированную вдоль направления прокатки, с включениями наноразмерных шаровидных частиц карбидов. Данная сталь, в отличие от других Металлов и их сплавов, которые приобретают ковкость при высоких температурах и становятся более ломкими и хрупкими при охлаждении, имеет обратную зависимость [7].

Метод, благодаря которому удалось получить данную сталь, авторы назвали темпформингом или температурной формовкой. В качестве базисного сплава использовалась низколегированная сталь, содержащая 0.4% C, 2% Si, 1% Cr, and 1% Mo. Формовка образцов осуществлялась с эквивалентной деформацией порядка 1,7 после отпуска стали при 500°C. После обработки зёрна удлиняются вдоль кристаллографического направления, совпадающего с направлением прокатки. Средний поперечный размер зерен металла составляет в среднем 260 нм, размер сферических карбидных частиц, диспергированных в железной матрице не превышает 50 нм. Значение же ударной прочности по Шарпи для темпформинных образцов (TF) увеличилось практически в 16 раз, и

ровно 226 Дж, по сравнению с аналогичным испытанием с обычной сталью (QT).

Исходная сталь, не прошедшая темпформинг, при испытаниях на ударную прочность, разламывается в месте V-образного надреза, образуя ровный скол. Другие образцы, обработанные путём температурной формовки, при ударе расслаиваются, и при этом, как правило, полного разрушения не происходит (Рис. 1.1).

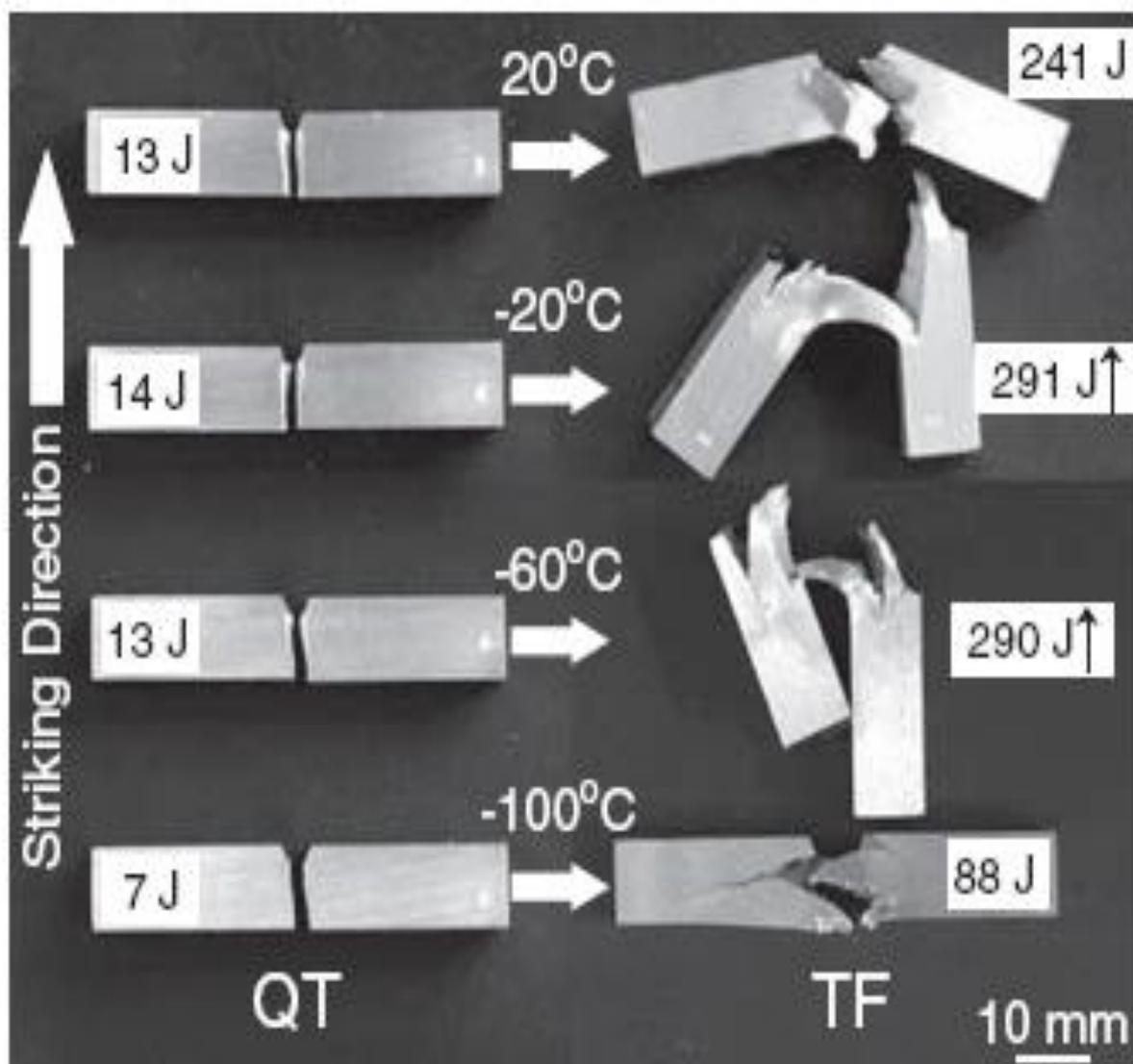


Рисунок 1.1 - Образцы низколегированной стали, приготовленной обычным методом (QT) и с помощью термической формовки (TF) после проведения испытаний по определению прочности (тест Шарпи на образцах с V-образным надрезом) [7, 8].

При испытаниях в диапазоне температур, заметно проявляется интересная зависимость показателей ударной прочности. Для наноструктурированных образцов максимум можно наблюдать в интервале температур от -60°C до -20°C , и соответственно ударная прочность уменьшается при дальнейшем возрастании температуры (Рис. 1.2).

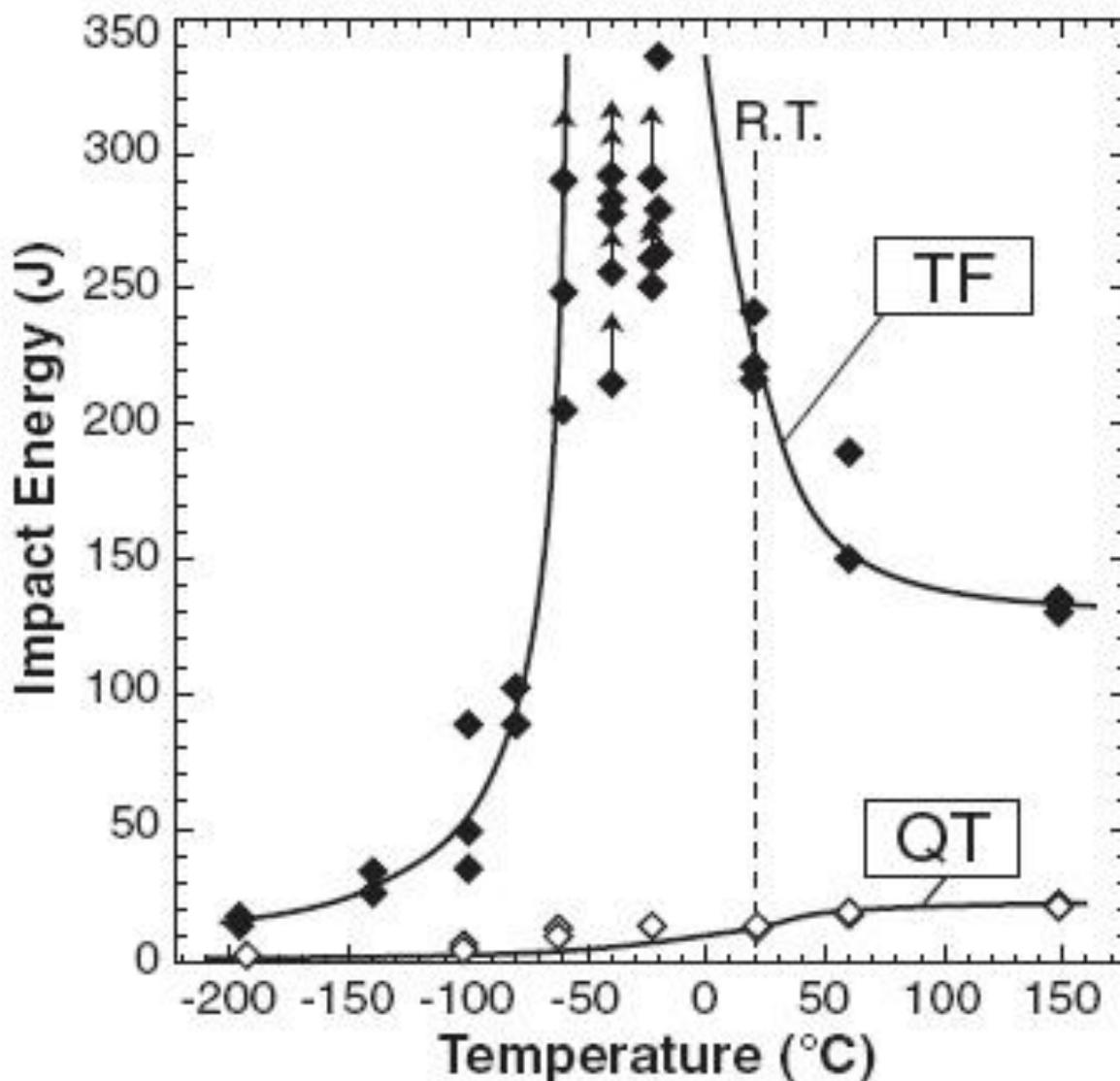


Рисунок 1.2 – График зависимости показателя ударной вязкости по Шарпи от температуры.

После темпформинга происходит удлинение зерен вдоль $\langle 110 \rangle$ кристаллографического направления, которое совпадает с направлением прокатки (рис. 1.3). Средний поперечный размер зерен металла составлял

порядка 260 нм, размер сферических карбидных частиц, диспергированных в железной матрице не более 50 нм.

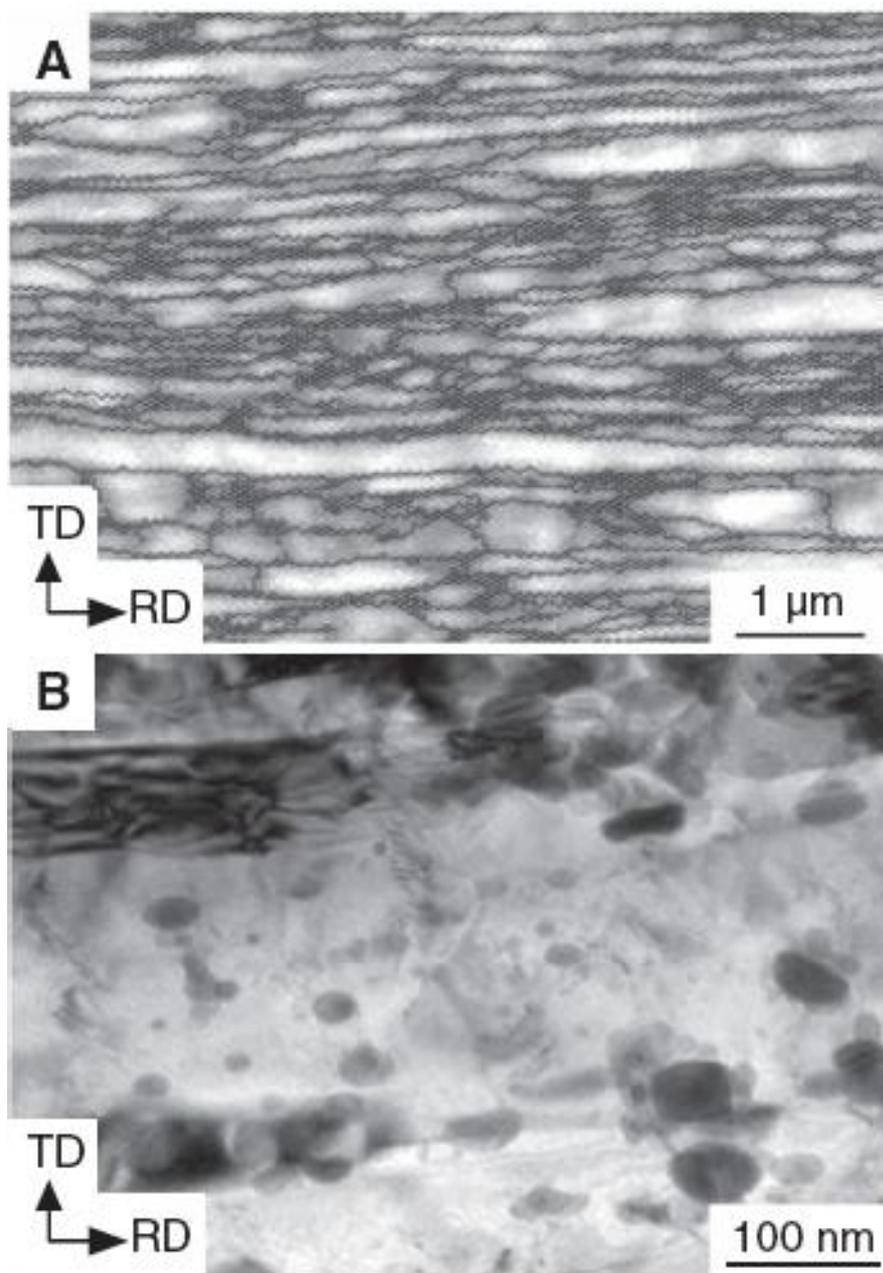


Рисунок 1.3 – Микроструктур образцов после температурной формовки при 500°C. (А) Изображение получено методом дифракции отраженных электронов (EBSD), угол разориентировки между зернами составляет меньше 5°. RD – направление прокатки. (В) Микрофотография (ПЭМ) показывает распределение наноразмерных карбидов в металлической матрице.

Выводы авторов таковы, что комбинация наноразмерной зернистой структуры материала и контролируемой текстуры прокатки позволяют

повысить как прочность, так и ковкость стали при низких температурах. Помимо этого, приведённый выше метод, может быть применен и для мартенситностареющих сталей, являющихся наиболее прочным материалом, используемым на сегодняшний «день» [10].

Она из компаний, наиболее приближенных к промышленному получению объёмных наноструктурных материалов находится в России. Это компания ГК Рэлтек, они сообщили о том, что хочет выйти на международные рынки с предложением наноструктурированной стали. Данная компания, как сообщается на её сайте, давно работает в области нанотехнологий [9].

Технология, благодаря которым ГК Рэлтек получают объёмные наноструктурные материалы, заключается в том, что индукционные плавильные печи позволяют точно градуировать температуру во всей массе металла и получать металл с заранее заданными свойствами. В турбоиндукционноплавильных агрегатах вместимостью 5–10 тонн происходит активное перемешивание металла и его вращение вокруг оси, которое обеспечивает активное взаимодействие шлака и расплава металла в турбулентном слое под шлаком. В результате чего жидкий металл, сильно перемешиваясь, насыщается азотом до необходимой концентрации, что обеспечивает интенсивный процесс образования наночастиц и мелкокристаллических фаз, присутствующих в расплаве компонентов – алюминия, титана, ванадия, марганца и др.

Твёрдость стали в наносостоянии, получаемая таким методом, возрастает на порядок, прочность за счёт этого увеличивается в 3-4 раза, так же улучшается хладостойкость и многократно увеличивается коррозионная стойкость.

Ещё одним примером успешного получения наноструктурной стали является работа Уфимского государственного авиационного технического университета по разработке технологических методов получения ультрадисперсных и наноструктурных стальных прутков и проволок с повышенными технологическими и эксплуатационными свойствами на основе

развития и интеграции процессов интенсивной пластической деформации (ИПД), прокатки и волочения.

Сотрудники Уфимского государственного авиационного технического университета получили высокопрочную проволоку из стали 20, используя метод интенсивной деформации. Применение данной проволоки весьма обширно, начиная от изготовления болтов, заканчивая получением стальных канатов и прочих металлических изделий. Проволока должна обладать и высокой прочностью, и обладать запасом пластичности, в частности ее аналог из обычной стали 20 обладает относительным удлинением при испытаниях на растяжение более 5%.

В результате проведенной ИПД получилось поднять прочность стали на 150%, до 1550 МПа, однако закономерно то, что в свою очередь пластичность упала почти до нуля. Проанализировав это, сотрудники УГАТУ пришли к выводу необходимости термической обработки, в результате которой пластичность возросла до 7%, а прочность снизилась до 1119 МПа. Исходный результат вполне приемлем, так как для стали 20 стандартом установлена прочность на уровне 950 Мпа [9].

В другом источнике описываются структура и механизмы упрочнения сталей марок 20 и 45 [11]. Равнокональное угловое прессование происходит в 4 прохода при температуре 400 °С. Это приводит к практически полной фрагментации зёрен феррита (рис. 1.4, а, б) [12]. Так же, отличительной чертой данной микроструктуры является наличие деформационных полос, которые представляют собой зёрна феррита, вытянувшиеся в одном направлении (рис. 1.4, в,г). Доля таких зёрен в стали 20 составляет в среднем 70%, а в стали 45 близка к 60%. Средний размер фрагментов ферритной составляющей колеблется возле значения 0,44мкм.

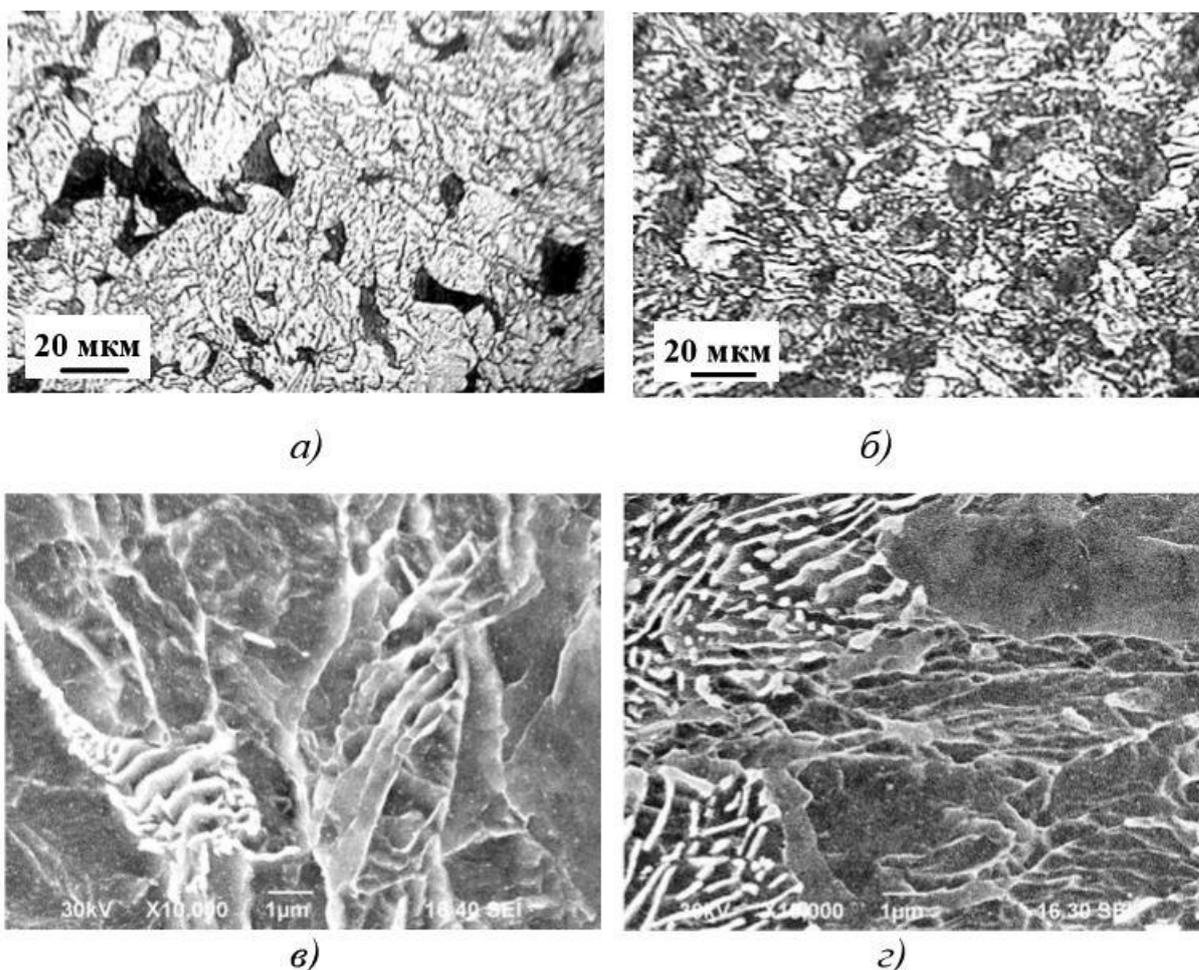


Рисунок 1.4 – Микроструктура стали 20 (а,в) и стали 45(б,г) после РКУП

Для стабилизации ультрамелкозернистой структуры образцы нагревали до 200 – 700 °С и выдерживали при данных температурах от 5 до 60 минут.

Исследовав выдержанные при разных температурах образцы на растровом электронном микроскопе обнаружилось, что в микроструктуре образцов нагретых до 200 – 300 °С сохраняется большой процент деформационных полос, фрагментация феррита и пластинчатое строение перлита (рис. 1.5) [13]. Образцы, выдержанные при 400 С имеют структуру с характерными признаками начала рекристаллизации: зарождение новых зёрен феррита имеющие правильную геометрическую форму и равновесные тройные стыки зёрен. В образцах, нагретых до 600 С (рис. 1.5, е) процесс рекристаллизации продвинулся дальше: количество новых зёрен увеличилось, и заметен их рост, а цементит в свою очередь почти полностью сфероидизировался.

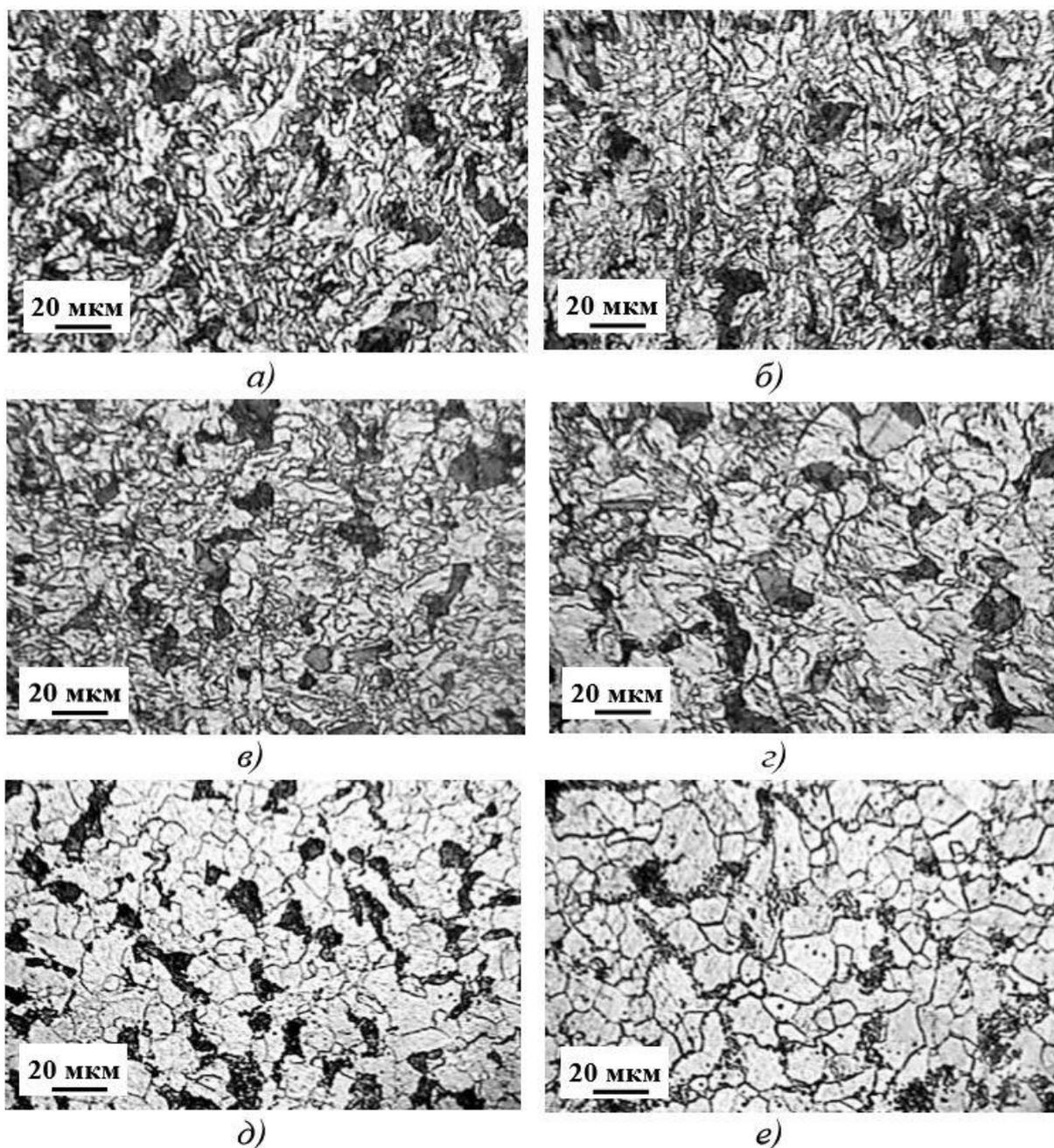


Рисунок 1.5 – Микроструктура стали 20 после РКУП и нагрева: а, б -200 С; в, г – 400 С; д – 500 С; е – 600 С и выдержкой в 5 (а, в, д) и 60 (б, г, е)[14]

При этом размер зёрен изменяется при 200-400 С⁰ незначительно, и возрастает лишь до 0,49-0,58 и 0,47-0,61 мкм для стали 20 и стали 45 соответственно. При 500 С⁰ увеличение происходит в большой степени и зёрна достигают 0,93 и 0,75 мкм. Однако по прошествии 600 С⁰ размер скачкообразно возрастает до 5,6 - 6 мкм. Так же, авторами было замечено, что в механизме

рекристаллизации данных сталей отсутствуют стадии зародышеобразования, миграция границ [13].

Похожий метод получения УМЗ стали рассмотрен в статьях [15, 16]. Образцы получают в процессе многократной ковки при комнатной температуре. Исследования показали, что за формирования наноструктуры отвечают два механизма. Первый связан с появлением деформационных полос и двойников деформационного происхождения, и фрагментацией за счёт этого исходных зёрен. Второй связан с протеканием фазового превращения $\gamma \rightarrow \alpha'$ по сдвиговому механизму образования мартенсита деформации.

При степени деформации меньших или равных 0,8 протекает процесс формирования деформационных полос, внутри них и происходит процесс нанодвойникования (рис. 1.6).

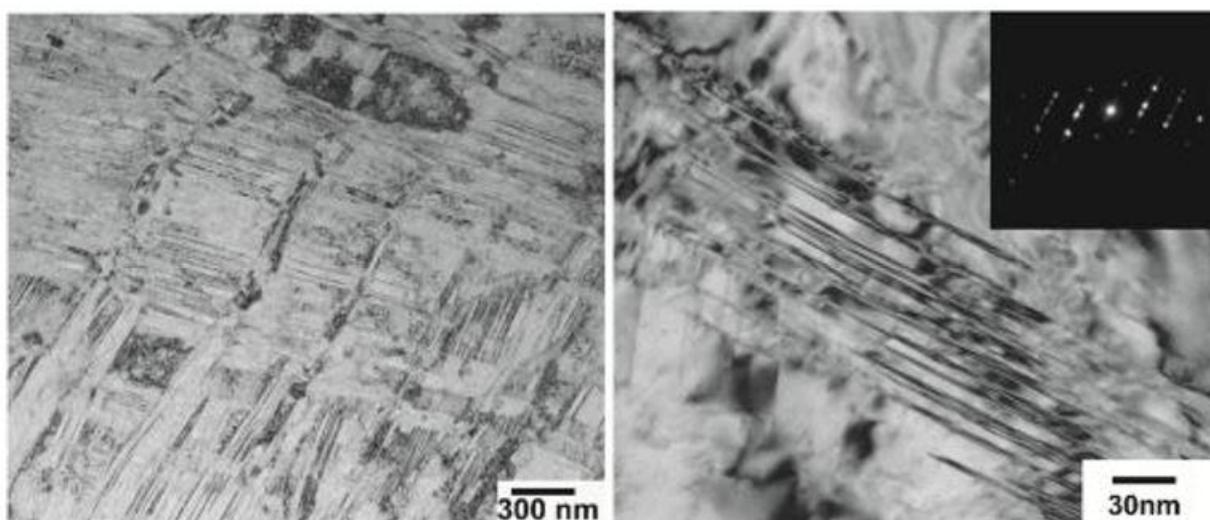


Рисунок 1.6 – Микроструктура стали 10X18H8ДЗБР после многократной ковки при комнатной температуре до степени деформации 0,8 [15, 16]

При деформации $0 < \epsilon < 2$ формирование пространственных сеток большеугловых границ происходит в основном за счёт двойникования. Это приводит к тому, что в деформируемой структуре появляется большое количество двойниковых границ, среднее расстояние между которыми около 30 нм.

Однако после того, как степень деформации становится пропорциональна 1, вступают так же механизмы мартенситного превращения. И когда $\varepsilon \geq 2$ мартенситное превращение обеспечивает основную долю формирования наноструктуры. Зерна α' -мартенсита в первую очередь образуются на деформационных полосах.

Авторы отмечают то, что измельчение фрагментов в стали 10X18H8ДЗБР при $\varepsilon < 2$ происходит значительно быстрее, когда они образуются в результате фрагментации исходных зерен деформационными полосами с последующим их разделением двойниками (рис. 1.7). При увеличении степени деформации скорость образования новых нанозерен падает. При $\varepsilon \sim 4$ структура состоит из нанозерен аустенита и мартенсита, средний размер которых равен 30 нм, причем доля мартенсита составляет 80% (рис. 1.7) [12].



Рисунок 1.7 – График зависимости среднего размера зёрен и плотности дислокаций от истинной степени деформации. [17]

1.3 Равноканальное угловое прессование

Как уже отмечалось ранее, для получения наноструктурированных и УМЗ структур материал подвергают интенсивной пластической деформации. ИПД позволяет получать массивные образцы с практически беспористой структурой материала, чего не удастся достичь компактированием нанопорошков [18].

Один из наиболее широко используемых методов ИПД – Равноканальное угловое прессование. Он был разработан В.М. Сегалом с сотрудниками в 1970-х годах. Основная задача этого деформационного метода состоит в упрочнении заготовок пластической деформацией без изменения поперечного сечения образцов, что обеспечивает возможность его многократного деформирования в одной оснастке. В отличие от многих других способов деформационной обработки (например, наклёп, волочение) РКУП морфологически однородно уменьшает размер зёрен и изменяет их форму. Схематическое представление процесса РКУП показано в рисунке. 1.8.

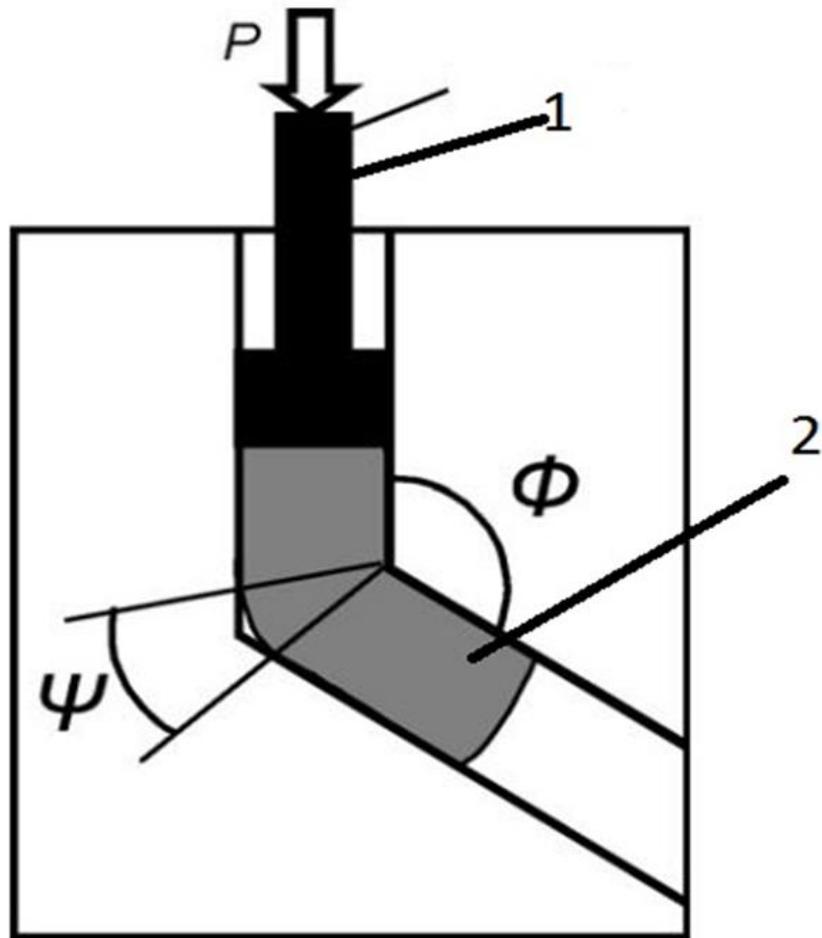


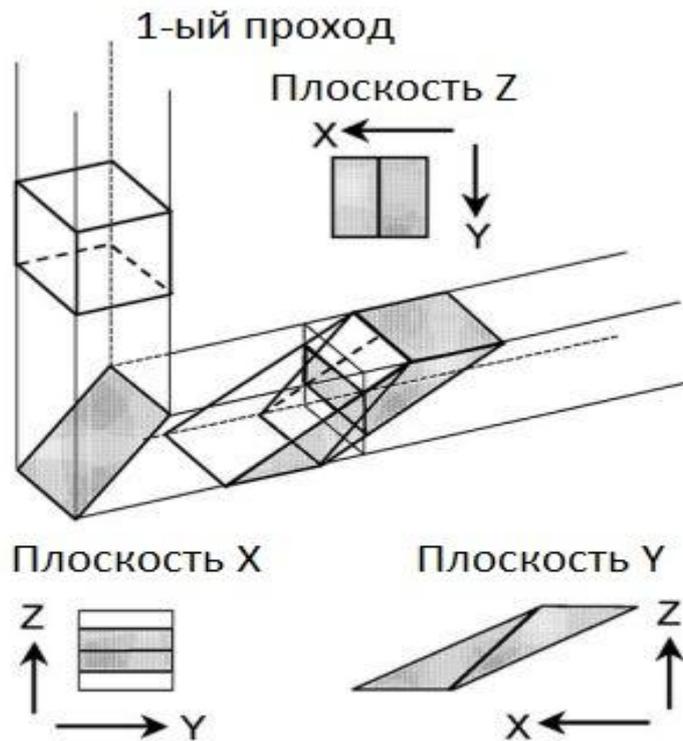
Рисунок 1.8 – классическая схема РКУП, где 1 – пуансон; 2 – образец; Где Φ – угол пересечения двух каналов, а Ψ – угол, образованный дугой кривизны в точке пересечения.

Образец цилиндрической формы продавливается через два канала, находящихся под углом друг к другу, и проходя через точку пересечения данных каналов образец претерпевает деформации сдвига высокой степени. Благодаря тому, что диаметр каналов постоянный на протяжении всего пути образца, его поперечное сечение остаётся неизменным, это позволяет повторять прессование несколько раз.

Деформация сдвига создается при прохождении заготовки через точку пересечения каналов. Так как размеры поперечного сечения заготовки остаются неизменными, операцию прессования можно повторять для достижения

исключительно высокой степени деформации. В ходе многократного прессования в заготовке накапливается деформация сдвига, что в результате приводит к формированию УМЗ и нано структуры.

Рисунок 1.9 показывает фундаментальный процесс течения металла при РКУП [19]. Угол пересечения каналов равен 90° . Образец вставляется в канал и продавливается через матрицу с помощью пуансона. Есть четыре основных маршрута в РКУП. По маршруту «А» образец прессуется без вращения, в маршруте «В_А» образец поворачивается на 90° вокруг своей оси по направлению вращения часовой стрелки между последовательными проходами, по маршруту «В_С» образец поворачивается на 90° против часовой стрелки между каждым проходом, а по маршруту «С» Образец поворачивается на 180° между проходами. На рис. 9, изображено влияние маршрута обработки на развитие ультрамелкозернистой микроструктуры [20, 21]. Авторы статьи [22] сообщили, что микроструктура чистого алюминия после 10 проходов по маршруту А был таким же, как после 4 проходов по маршруту «В_С».



(а) Деформация поперечного сечения образца за один проход

маршрут	плоскость	Номер прохода								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
А	X	□	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭
	Y	□	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭
	Z	□	□	□	□	□	□	□	□	□
B _A	X	□	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭
	Y	□	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭
	Z	□	□	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭
B _C	X	□	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭
	Y	□	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭
	Z	□	□	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭
C	X	□	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭
	Y	□	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭	▭
	Z	□	□	□	□	□	□	□	□	□

(б) Характеристики сдвига для четырёх различных технологических маршрутов

Рисунок 1.9 – Процесс деформации металла во время РКУП. (а) Деформация поперечного сечения образца за один проход [20]. (б) Характеристики сдвига

для четырех различных маршрутов обработки [21].

В ИФПМ УГАТУ реализуется как традиционная обработка РКУП, так и новые разновидности метода РКУП, такие как:

- РКУП в параллельных каналах (рис. 1.10).

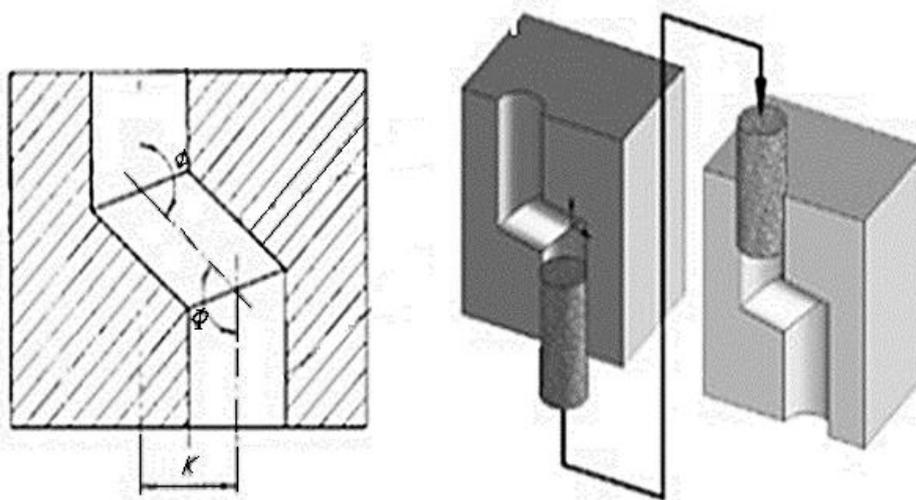


Рисунок 1.10 – Схема РКУП в параллельных каналах.

Преимущества: существенное снижение циклов обработки; сохранение исходной формы и приемлемого внешнего вида обрабатываемых образцов, и, следовательно, существенное повышение коэффициента выхода годного материала. Основные параметры схемы, влияющие на однородность течения материала - расстояние между осями каналов K и угол пересечения каналов Φ .

- РКУП-Конформ (рис. 1.11)

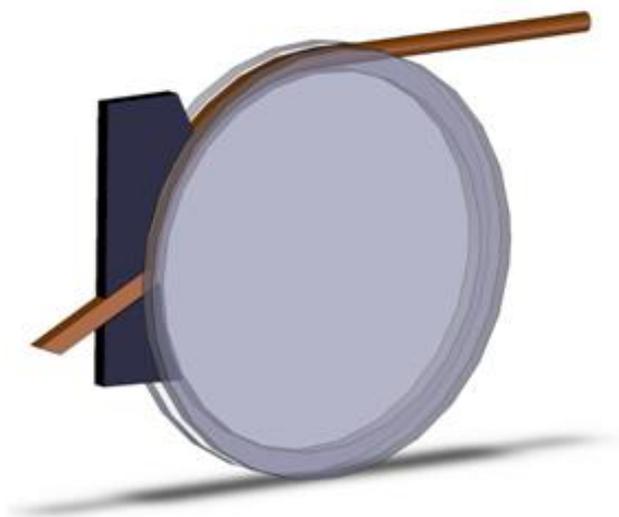


Рисунок 1.11 – схема РКУП конформ.

Преимущества: возможность получения длинномерных образцов; возможность неоднократного продавливания заготовки через оснастку. Непрерывный процесс прессования, в котором активные силы трения обеспечивают силовые условия деформирования заготовки. Метод РКУП-Конформ основан на сочетании процессов РКУП и «конформ» [23, 24].

Глава 2. Материал и методика проведения экспериментов

2.1 Исследуемый материал

В качестве исследуемого материала была использована углеродистая сталь 45 (0,45 % С). Сталь исследовали в двух состояниях: в крупнозернистом (КЗ) состоянии после закалки и высокого ($550\text{ }^{\circ}\text{C}$) отпуска и в ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии после наноструктурирования путем РКУП. РКУП проводили по режиму: закалка от температуры $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в воде + средний отпуск ($350\text{ }^{\circ}\text{C}$) + РКУП при $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (маршрут В_с, n=6, $\varphi = 120^{\circ}$). Полученные заготовки имели вид неправильного (деформированного) цилиндра (рис. 2.1)



Рисунок 2.1 – Заготовка (сталь 45 прошедшая РКУП)

В дальнейшем из подобных заготовок были выполнены образцы в соответствии с [25], пример приведён на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – образец изготовленный в соответствии с ГОСТ 25.506-85 [25] для проведения испытания по определению статической трещиностойкости.

2.2 Исследование тонкой структуры стали 45

Исследование УМЗ структуры проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOLJEM2100 (рис. 2.3) при ускоряющем напряжении 200 кВ.



Рисунок 2.3 – JEM-2100F универсальный 200кВ просвечивающий электронный микроскоп с термополевой пушкой Шоттки.

2.3 Испытание стали 45 на твёрдость

Испытания стали на твердость проводили на твердомере ТН 300 (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – твердомер ТН-300.

2.4 Методика проведения испытаний на статическое растяжение стали

45

Статическое растяжение круглых образцов диаметром 5 мм проводили на универсальной испытательной машине Н50КТ. Скорость растяжения составляла 5 мм/мин. Испытания проводили при комнатной температуре (20 °С) и в среде жидкого азота (-196 °С).



Рисунок 2.5 – Разрывная машина Tinius Olsen H50КТ с нагрузкой до 5 тонн (50кН).

Для проведения испытаний при температуре -196°C было необходимо погрузить образец в среду жидкого азота. В комплектации установки не предусмотрена возможность проведения таких испытаний, так как отсутствует специальный сосуд, который крепится на нижнюю штангу, наполняется жидким азотом и погружает в себя образец и удерживающие этот образец механизмы. Поэтому, перед нами стояла задача изготовить такой сосуд, и было несколько вариантов решения этой задачи:

- Спроектировать и создать сосуд с «нуля»;
- Найти какое-либо изделие похожее по конструкции и параметрам, на необходимый нам сосуд. И модернизировав данное изделие, получить полностью отвечающий нашим требованиям сосуд.

Второй путь решения этой проблемы был более прост и экономичен, поэтому мы предпочли его. В роли потенциального сосуда нами был выбран пенопластовый стакан из-под кофе. Что бы предотвратить образование каких-либо трещин и протечки через них жидкого азота, внутреннюю поверхность мы покрыли тонким слоем эпоксидной смолы. Для возможности его крепления к нижней штанге установки, в дне стаканчика было вырезано отверстие диаметром 10мм. При установке на штангу дно стаканчика «вставало» на широкую шайбу, обеспечивающую поддержку и устойчивость, а сверху прижималось фторопластовой гайкой, которая предотвращала протекание жидкого азота.



Рисунок 2.6 – сосуд для удержания жидкого азота, изготовленный из стакана под кофе.

Испытания при комнатной температуре проводились по следующей методике:

1. Подготовка установки к испытаниям (загрузка необходимой программы, ввод первичных данных);
2. Установка образца в оснастку разрывной машины;
3. Установка датчика деформации;
4. Растяжение образца с последующим разрушением;

5. Снятие разрушенного образца;
6. Повторить пункты 2-5 для каждого образца.
7. По полученным данным построить график и проанализировать его.

Испытания при температуре -196°C проводились по следующей методике:

1. Подготовка установки к испытаниям (загрузка необходимой программы, ввод первичных данных);
2. Установка сосуда для удержания жидкого азота на оснастку
3. Установка образца в оснастку разрывной машины;
4. Наполнение сосуда жидким азотом
5. Выдержка образца в среде жидкого азота в течение 5-7 минут, с периодическим пополнением сосуда;
6. Установка оснастки на разрывную машину
7. Растяжение образца с последующим разрушением;
8. Снятие оснастки и слив жидкого азота
9. Демонтаж разрушенного образца;
10. Повторить пункты 2-9 для каждого образца.
11. По полученным данным построить график и проанализировать его.

2.5 Испытание на статическую трещиностойкость

Статическая трещиностойкость – «способность материала сопротивляться развитию трещин (разрушения) при однократном, циклическом и замедленном разрушении.» [26]

Испытание на статическую трещиностойкость образцов толщиной 10 мм проводили по схеме трехточечного изгиба согласно ГОСТ 25.506-85 [25] на установке Instron 8802 (рис. 2.7) при температуре -196 0С.

Для проведения испытаний при температуре -196°С было необходимо погрузить образец в среду жидкого азота. Для этих целей, совместно с студентом Салиевым Р.М. был разработан (рис. 2.8) специальный сосуд, одевающийся на нижнюю колонку установки помещающий в себя непосредственно сам образец и контактирующие с ним элементы оснастки., но его постройка осуществлялась нами по-разному. Мной был выбран метод вырезания из куба со сторонами 200мм, состоящий из пенополиуретанового герметика (монтажной пены), сосуда нужной нам формы. Выбор данной технологии обоснован тем, что отсутствие швов в конструкции делает невозможным их разрушение при -196°С.

Процесс построения сосуда состоял из двух этапов:

1. Создание куба со сторонами 200мм из пенополиуретанового герметика.

Для этих целей была построена опалубка из досок, внутренний объём которой соответствовал необходимой нам форме. Далее, изнутри все стенки проложили, для более лёгкого извлечения куба. Получившийся объём был заполнен пенополиуретановым герметиком, и помещён в сухое тёплое место до полного засыхания. После засыхания опалубка была разобрана и пенополиуретановый куб извлечён.

2. Вырезка сосуда из куба.

Все необходимые размеры были проставлены на кубе, и по ним осуществлялась вырезка сосуда. Однако на этом этапе было обнаружено, что из-за некачественного материала наполнителя, плотность пенополиуретанового

герметика очень низкая, и поры иногда были в половину ширины стенки сосуда. По этой причине были приняты дополнительные меры нацеленные на повышение герметичности сосуда, такие как: проложить внутри дополнительно полиэтилен и поверх него так же проложить алюминиевую фольгу. Однако все эти меры не имели успех, и в процессе испытания сосуд дал течь, и в результате разрушился.



Рисунок 2.7 – Сервогидравлическая испытательная машина INSTRON 8802.

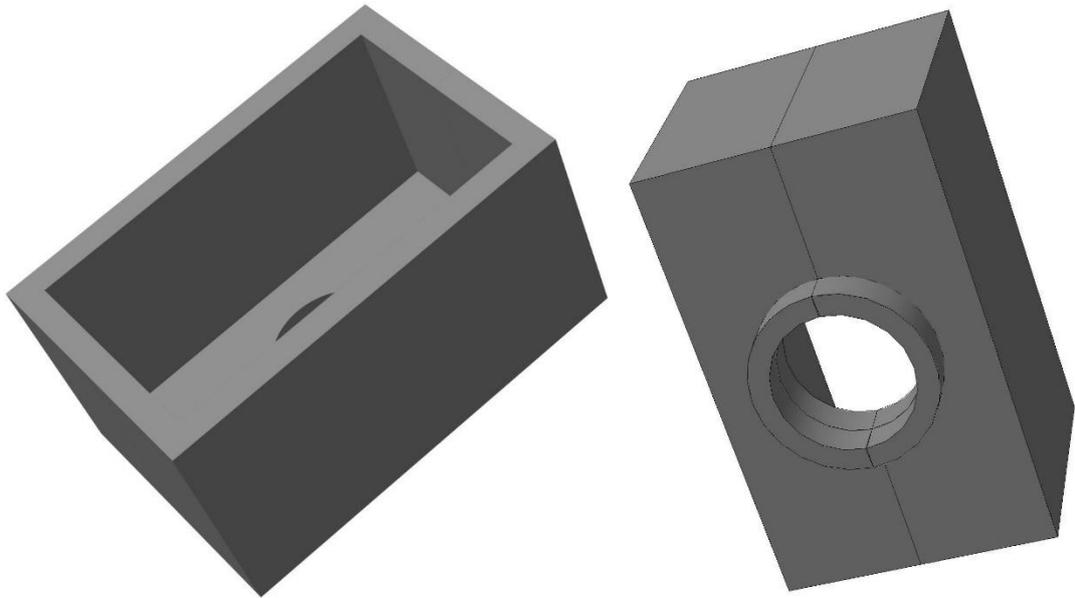


Рисунок 2.8 – Модель сосуда для удержания жидкого азота.

Обработка результатов испытания проводилась в соответствии с ГОСТом 25.506-85 [25].

$$K_Q = \frac{P_Q L}{t b^3} Y_4,$$

где P_Q определяют из графиков построенным по результатам испытаний;

L – расстояние между опорами;

t – толщина образца;

b – высота образца;

$$Y_4 = 3.494 \left(1 - 3.396 \frac{l}{b} + 5.839 \frac{l}{b}^2 \right) \text{ – поправочный коэффициент}$$

2.6 Исследование микростроения

Анализ микростроения проводится в растровом электронном микроскопе SIGMA фирмы «ZEISS» (рис. 2.9). Данный Микроскоп обладает эффективным увеличением проводящих образцов до 1 000 000 раз с разрешением до 1,3 нм.



Рисунок 2.9 – Электронный растровый микроскоп Zeiss SIGMA

2.7 Рентгеноструктурный анализ

«Рентгеноструктурный анализ (рентгенодифракционный анализ) — один из дифракционных методов исследования структуры вещества. В основе данного метода лежит явление дифракции рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решетке.» [27].

Данная процедура проводится для определения глубины пластических зон под поверхностью изломов, используя методику послойного стравливания излома с последующим рентгенографированием его поверхности. О структурных изменениях материала в пластических зонах судили по ширине (β) рентгеновской дифракционной линии (211) $K\alpha_1$. Физическое уширение дифракционной линии рассчитывали по формуле $\Delta\beta = \sqrt{\beta_2^2 - \beta_{эт.2}^2}$, где $\beta_{эт.}$ — ширина линии эталона (ширина линии, полученной после полного стравливания пластических зон с поверхности излома). Съемку поверхности изломов проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0 (рис. 2.10) ($U = 22 \text{ kV}$, $I = 8 \text{ mA}$) в $Fe K\alpha$ излучении.



Рисунок 2.10 – Рентгеновский аппарат ДРОН-2,0

2.8 Критерии механики разрушения

При испытании сплава на статическую трещиностойкость о реализации условий пластической деформации в образцах судили по известным критериям механики разрушения:

- $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 2,5$;
- $\delta < 1,5 \%$;
- $P_{\max}/P_Q \geq 1,1$.

Кроме того, для определения локального напряженного состояния материала у вершины трещины использовали критерий h_{\max}/t , где h_{\max} – максимальная глубина пластической зоны под поверхностью излома, t – толщина образца. Если разрушение произошло в условиях пластической деформации, то отношение $h_{\max}/t < 10^{-2}$; если в условиях плоско напряжённого состояния, то $h_{\max}/t > 10^{-1}$; если в переходной области от ПД к ПН, то $10^{-2} < h_{\max}/t < 10^{-1}$.

Глава 3. Результаты проведённых испытаний

Тонкая структура стали 45 после РКУП показана на рисунке 3.1. 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.

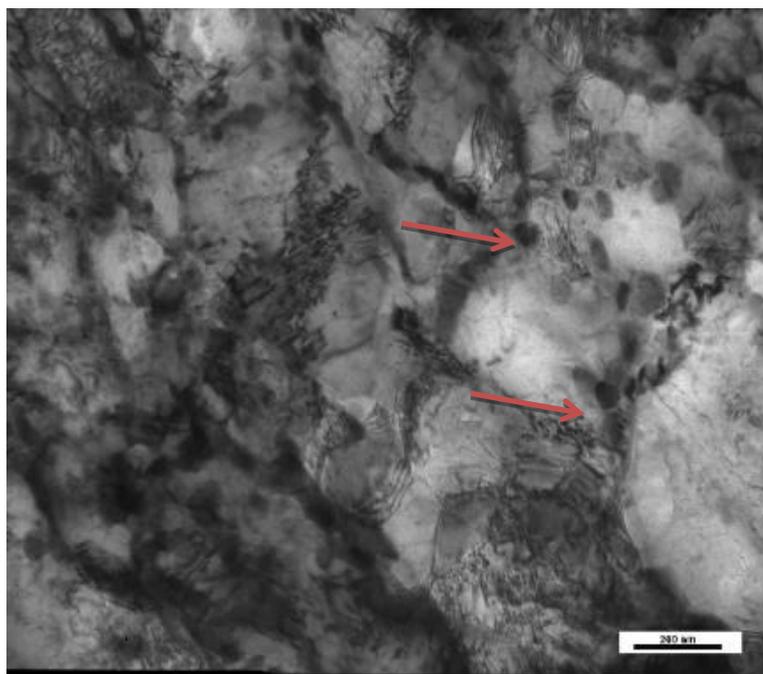


Рисунок 3.1 – Тонкая структура стали 45 (ПЭМ) Стрелками показаны выделившиеся в пластинах мартенсита карбиды

Из таблицы 1 видно, что механические свойства стали 45 после РКУП по вышеуказанным режимам не значительно (в среднем в 1,2 раза) выше по сравнению со стандартной термической обработкой (закалка + отпуск). При этом относительное удлинение стали ниже, примерно в 2 раза.

Таблица 1 – Средний размер зерна и механические свойства стали 45 в различном состоянии при температурах 20 и -196 °С

Состояние	$d_{cp.}$, мкм	T , °С	HRC	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Закалка + отпуск	10	20	31	985	839	8
		-196	-	1263	1195	4
После РКУП	0,56	20	37	1171	1064	5
		-196	-	1438	1360	2

Результаты испытаний образцов на K_{IC} показали (табл. 2), что статическая трещиностойкость стали 45 после РКУП в 1,3 раза ниже по сравнению со стандартной обработкой (закалка + высокий отпуск). Анализ критериев реализации условия плоской деформации (ПД) в образцах показал (табл. 10), что, независимо от состояния сплава, все критерии удовлетворяют условию ПД.

Таблица 2 – Статическая трещиностойкость (K_{IC}) стали 45 и критерии механики разрушения условий реализации ПД,

Состояние	K_{IC} , МПа $\sqrt{м}$	$t/(K_{IC}/\sigma_{0,2})^2$	P_{max}/P_Q	φ_c , %
Закалка + отпуск	67	3,02	1,0	0,5
После РКУП	53	7,90	1,0	0

Все изломы образцов из стали 45, как после РКУП, так и после закалки + отпуска однородные, хрупкие (рис. 3.2 а, в). Утяжка и губы среза отсутствуют. При большом увеличении видно, что в области страгивания статической трещины усталостный микрорельеф сразу переходит в микрорельеф статического разрушения (рис. 3.2 б, г), т.е. зона вытяжки θ отсутствует. Само статическое разрушение стали, как после РКУП, так и после закалки + отпуска произошло по механизму скола (рис. 3.2 б, г), что характерно для разрушения стали в условиях ПД.

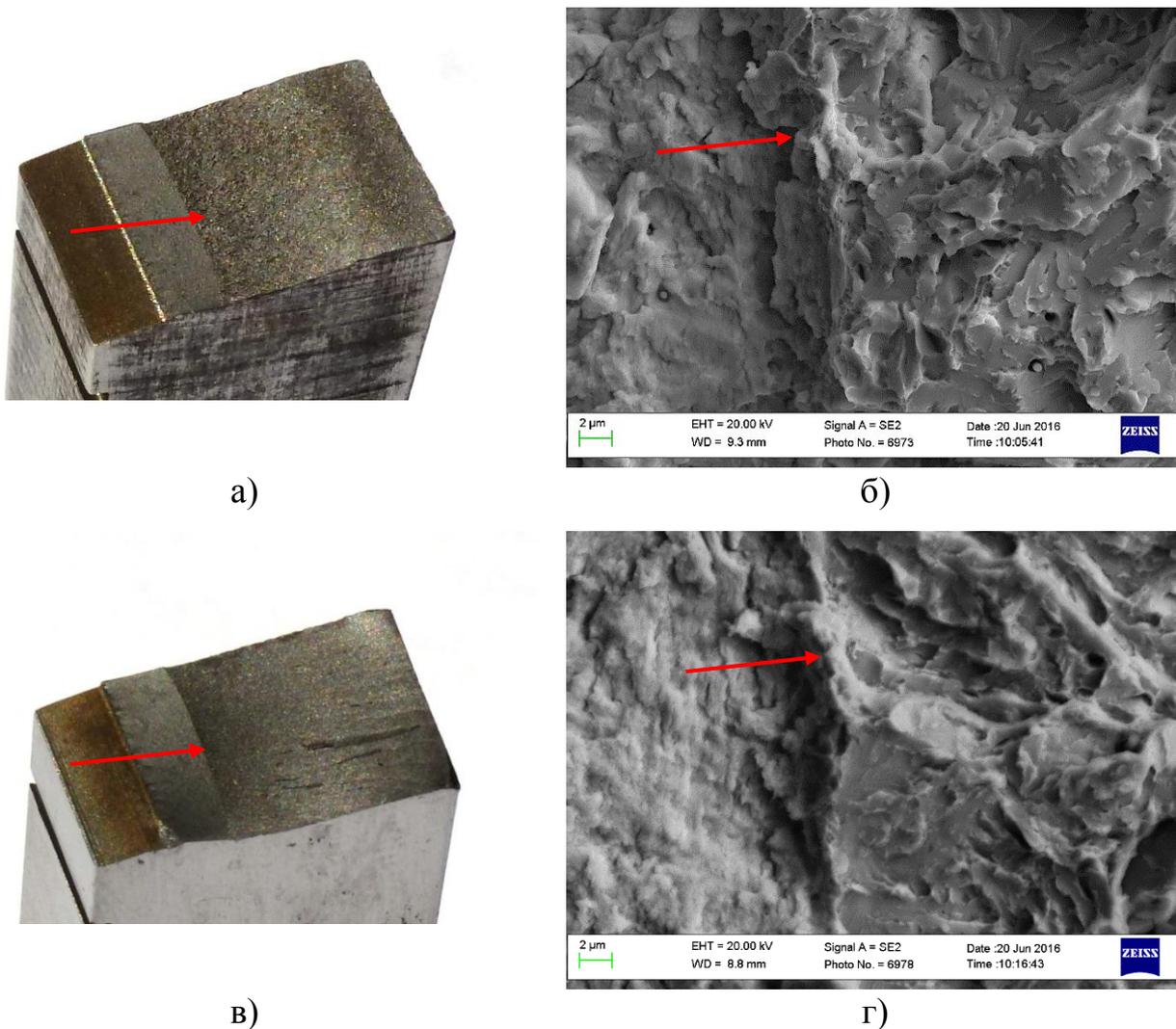


Рисунок 3.2 – Макро- (а, в) и микростроение (б, г) изломов стали 45 после закалки + старения (а, б) и после РКУП (в, г). Стрелками показана область перехода усталостной трещины в статическую.

Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что под поверхностью изломов стали 45, как после закалки + отпуска, так и после РКУП обнаружена одна пластическая зона h_y , глубиной, соответственно, 85 и 60 мкм (табл. 3). В этом случае, отношение h_{max}/t равно, соответственно, $8,5 \cdot 10^{-3}$ и $6,0 \cdot 10^{-3}$, что соответствует разрушению стали в условиях ПД. Степень искаженности кристаллической структуры на поверхности изломов стали после РКУП, оцененная по ширине рентгеновской дифракционной линии (β), несколько выше, чем на поверхности изломов стали после закалки + высокого отпуска. Однако физическое уширение дифракционной линии ($\Delta\beta$),

обусловленное механизмом разрушения стали, практически одинаковое, что хорошо согласуется с данными фрактографического анализа (рис. 3.2 б, г).

Таблица 3 – Глубина пластической зоны под поверхностью изломов (h_y) и отношение h_{max}/t , а также ширина дифракционной линии (211) $K\alpha_1$, полученной с поверхности изломов (β), ширина линии эталона ($\beta_{эт}$) и физическое уширение данной линии ($\Delta\beta$)

Состояние	h_y , мкм	h_{max}/t	β , 10^{-3} рад.	$\beta_{эт}$, 10^{-3} рад.	$\Delta\beta$, 10^{-3} рад.
Закалка+отпуск	85	$8,5 \cdot 10^{-3}$	9,10	5,50	7,25
После РКУП	60	$6,0 \cdot 10^{-3}$	9,70	6,30	7,38

Таким образом, результаты макро- и микрофрактографических исследований, а также рентгеноструктурного анализа, наряду с критериями механики разрушения, показывают, что статическое разрушение образцов из стали 45 как после закалки + отпуска, так и после РКУП произошло в условиях плоской деформации (ПД).

Связь глубины пластической зоны под поверхностью изломов в области срагивания трещины со статической трещиностойкостью стали описывается уравнениями:

- для стали 45 после закалки + высокого отпуска:

$$h_y = \frac{1}{12\pi} \cdot \frac{K_{1C}^2}{\sigma_{0.2}^2}$$

- для стали 45 после РКУП по вышеуказанным режимам:

$$h_y = \frac{1}{8\pi} \cdot \frac{K_{1C}^2}{\sigma_{0.2}^2}$$

Глава 4. Безопасность и экологичность технического объекта

«Технический объект выпускной квалификационной работы (технологический процесс, технологическая операция) характеризуется прилагаемым технологическим паспортом (см. табл. 4.). Наименование должностей и число работников, непосредственно участвующих в реализации производственно-технологического процесса, выполнении технологической операции (нескольких технологических операций) квалифицируется согласно Постановления Госстандарта РФ №367[28]» [32].

Таблица 4 – Технологический паспорт технического объекта.

п / п	«Технологический процесс» [32].	«Технологическая операция , вид выполняемых работ» [32].	«Наименование должности работника, выполняющего технологический процесс, операцию» [32].	«Оборудование, техническое устройство, приспособление» [32].	«Материалы, вещества» [32].
1	Испытания на твердость стали на	Помещение образца на испытательный столик; проведение замера.	«Младший научный сотрудник» [28]	твердомер ТН 300	Образцы
2	Статическое растяжение	Установка оснастки; установка образца; Проведение испытаний; Снятие образца и оснастки.	«Старший научный сотрудник, техник» [28]	универсальная испытательная машина Tinius Olsen H50KT	Образцы

Продолжение таблицы 4.

3	Статическое растяжение при -196°	Установка оснастки; установка образца и набор жидкого азота в оснастку; проведение испытаний; слив жидкого азота и снятие образца и оснастки.	«Старший научный сотрудник, к, техник» [28]	универсальная испытательная машина Tinius Olsen H50KT	Образцы; сосуд для удержания жидкого азота на оснастке; плоскогубцы; жидкий азот; сосуд Дьюара; Специальные температуростойкие варежки;
4	Испытание на статическую трещиностойкость на при температуре -196°C .	Запуск и наладка испытательной испытательной установки; установка оснастки для проведения испытаний; установка образца и набор жидкого азота в оснастку; проведение испытаний; изъятие образца, установка нового и пополнение уровня жидкого азота (несколько циклов); изъятие последнего образца, слив жидкого азота; снятие оснастки, выключение испытательной установки.	«Старший научный сотрудник, к, младший научный сотрудник, к, техник» [28]	установка Instron 8802	образцы толщиной 10 мм; ; сосуд из , для удержания жидкого азота на оснастке; жидкий азот.; Сосуд Дьюара для переноски жидкого азота; Специальные температуростойкие варежки;

«Результаты выполненной идентификации профессиональных рисков приводятся в табличном виде (см. табл. 5). Наименование возникающих опасных и/или вредных производственно-технологических факторов приведены, согласно Гост 12.0.003-74[29]» [32].

Таблица 5 – Идентификация профессиональных рисков.

№п/п	«Производственно-технологическая и/или эксплуатационно-технологическая операция, вид выполняемых работ» [32].	«Опасный и /или вредный производственный фактор» [32].	«Источник опасного и / или вредного производственного фактора» [32].
1	Статическое растяжение при -196 ⁰	«повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования, материалов» [29]	универсальная испытательная машина Tinius Olsen H50KT
2	Испытание на статическую трещиностойкость на при температуре -196 ⁰ С.	«повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования, материалов» [29]	установка Instron 8802

«Организационно-технические методы и средства защиты выбираются с учетом действующих на данный момент времени требований нормативных документов согласно ГОСТ 12.3.004-75[30]. Используемые средства индивидуальной защиты для работников, выполняющих конкретные операции производственно-технологического процесса (при необходимости) приводятся согласно приказу министерства здравоохранения и социального развития российской федерации от 14 декабря № 1104[31].

Результаты проведенных работ отражаются в виде сводной таблицы (см. табл. 6).» [32].

Таблица 6 – Организационно-технические методы и технические средства (технические устройства) устранения (снижения) негативного воздействия опасных и вредных производственных факторов.

№ п/п	«Опасный и / или вредный производственный фактор» [32].	«Организационно-технические методы и технические средства защиты, частичного снижения, полного устранения опасного и / или вредного производственного фактора» [32].	«Средства индивидуальной защиты работника» [32].
1	«повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования, материалов» [29]	«Установка соответствующих ограждений оборудования» [30]	«Специальные температуростойкие варежки» [31]

«Проводится идентификация источников потенциального возникновения класса пожара и выявленных опасных факторов пожара, с последующей разработкой модифицированных или альтернативных технических средств и/или организационных методов по обеспечению (улучшению) пожарной безопасности технического объекта. Возникающие пожары классифицируются по виду горючего материала и подразделяются на несколько классов. В нашем случае возможен пожар, связанный с воспламенением и горением жидкостей или плавящихся твердых веществ и материалов, в соответствие с этим фактором и были выбраны класс пожара, опасные факторы пожара и сопутствующие проявления факторов пожара.» [32].

Таблица 7 – Идентификация классов и опасных факторов пожара.

№ п/п	«Участок, подразделение» [32].	«Оборудование» [32].	«Класс пожара» [32]	«Опасные факторы пожара» [32]	«Сопутствующие проявления факторов пожара» [32]
1	Лаборатория испытания механических свойств	установка Instron 8802	В	«пламя и искры; тепловой поток; повышенная температура окружающей среды; повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения.» [32]	«образующиеся токсичные вещества и материалы, попавшие в окружающую среду из разрушенных пожаром технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества горящего технического объекта» [32]

«Разработка технических средств и организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности заданного технического объекта должна базироваться на ГОСТ Р 12.3.047-2012[33]» [32].

Таблица 8 – Технические средства обеспечения пожарной безопасности.

«Первичные средства пожаротушения» [32]	«Мобильные средства пожаротушения» [32]	«Стационарные установки и системы пожаротушения» [32].	«Средства пожарной автоматики» [32]	«Пожарное оборудование» [32]	«Средства индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре» [32]	«Пожарный инструмент (механизированный и немеханизированный)» [32]	«Пожарные сигнализация, связь и оповещение» [32]
«песок, пенный огнетушитель» [33]	«пожарная мотопомпа» [33]	«аэрозольная система пожаротушения» [33]	«прибор управления пожарной» [33]	«пожарный шкаф» [33]	«противогазы» [33]	«Ломы, багры, топоры, лопаты, комплект диэлектрический» [33]	«Автоматические извещатели» [33]

«Организационные (организационно-технические) мероприятия по предотвращению пожара разрабатываются соответствии с ГОСТ Р 12.3.047-2012[33].» [32]

Таблица 9 – Организационные (организационно-технические) мероприятия по обеспечению пожарной безопасности.

«Наименование технологического процесса, используемого оборудования в составе технического объекта» [32]	«Наименование видов реализуемых организационных (организационно-технических) мероприятий» [32]	«Предъявляемые нормативные требования по обеспечению пожарной безопасности, реализуемые эффекты» [32]
Статическое растяжение при -196 ⁰ ; Испытание на статическую трещиностойкость на при температуре -196 ⁰ С.	«Организация пожарной охраны, организация служб по пожарной безопасности в соответствии с законодательством; организация инструктажей по технике на производстве и общественных объектов пребывания людей; разработка и применение норм и правил по пожарной безопасности, инструкции по эксплуатации пожароопасных веществ, материалов, по соблюдению противопожарного режима и по действиям при возникновении пожароопасной ситуации» [33]	«Устранение возникновения горючей среды должно быть обеспечено одним из следующих способов или их комбинаций: Максимально возможное использование негорючих и трудногорючих веществ и материалов; Максимальное применение механизированных и автоматизированных технологических процессов, использующих горючие вещества; Исключение условий для теплового, химического и микробиологического самовозгорания используемых веществ, материалов, изделий и конструкций» [33]

Заключение по разделу

В разделе «Безопасность и экологичность технического объекта» приведены характеристики производственно-технологических процессов: испытания стали на твердость; статическое растяжение; статическое растяжение при -196°C ; испытание на статическую трещиностойкость при температуре -196°C . Перечислены технологические операции, должности работников, используемое производственно-техническое и инженерно-техническое оборудование, применяемые расходные вещества, материалы и комплектующие изделия.

Заключение

1. Статическая трещиностойкость (K_{1C}) стали 45 после стандартной обработки (закалка + высокий отпуск) равна $69 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а после РКУП по вышеуказанным режимам – $53 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

2. Критерии механики разрушения, данные макро- и микрофрактографического анализа, а также критерий h_{max}/t указывают на то, что статическое разрушение стали 45, как после закалки + высокого отпуска, так и после РКУП произошло в условиях плоской деформации (ПД).

3. Связь глубины пластической зоны под поверхностью изломов в области срагивания трещины со статической трещиностойкостью стали 45, как после закалки + высокого отпуска, так и после РКУП описывается уравнениями

соответственно: $h_y = \frac{1}{12\pi} \cdot \frac{K_{1C}^2}{\sigma_{0,2}^2}$ и $h_y = \frac{1}{8\pi} \cdot \frac{K_{1C}^2}{\sigma_{0,2}^2}$

Список используемой литературы

1. Лякишев, Н.П. Некоторые вопросы металлургической технологии будущего /Н.П. Лякишев, А.В. Николаев. — Москва: Металлы, 2002.
2. Terence G. Langdon. The Current Status of Bulk Nanosrtuctured Materials. Rev.Adv.Mater.Sci. 31(2012) 1-4;
3. R.Z. Valiev, M.J. Zehetbauer, Y. Estrin, H.W. Höppel, Y. Ivanisenko, H. Hahn, G. Wilde, H.J. Roven, X. Sauvage and T.G. Langdon. The Innovation Potential of Bulk Nanostructured Materials//Advanced Engineering Materials. Volume 9, Issue 7, pages 527–533, July, 2007;
4. Углеродистая качественная сталь марки 45 [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: http://spb-stal.ru/stati/uglerodistaya_kachestvennaya_stal_marki_45, свободный
5. Сталь 45 [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Сталь#>, свободный
6. Применение и характеристики стали 45 [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <http://stanok.guru/stal/primenenie-i-harakteristiki-stali-45.html>, свободный
7. Сверхпрочная наноструктурированная сталь [Электронный ресурс] / Росляков Илья Владимирович. — Электрон. журн. — 2008. — Режим доступа: http://www.nanometer.ru/2008/09/17/new_materials_53969.html, свободный
8. Уаноструктурированная сталь [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/1864227/>, свободный
9. Наноструктурированные стали и сплавы [Электронный ресурс] /. — Электрон. журн. — Режим доступа: http://vuzlib.com.ua/articles/book/43092-Nanostrukturirovannye_stali_i_/1.html, свободный
10. Предлагаются наноструктурированные стали [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/predlagayutsya-nanostrukturirovannye-stali>, свободный

11. Колесников, А.В. Новые наноструктурированные высокоазотистые марганцевые стали [Электронный ресурс] / А.В. Колесников. — Электрон. журн. — Режим доступа: http://kolesnikov.ucoz.com/load/novye_nanostrukturirovannye_vysokoazotistye_margancevye_stali/1-1-0-1, свободный
12. Клевцов, Г.В. Прочность и механизмы разрушения объемных наноструктурированных металлических материалов / Г.В. Клевцов, Е.В. Бобрук, И.П. Семенова, и др. — Уфа: РИК УГАТУ, 2016 г
13. Копцева Н. В., Михоленко Д. А., Ефимова Ю. Ю. Эволюция микроструктуры и свойств при нагреве феррито-перлитных углеродистых конструкционных сталей с ультрамелкозернистой структурой, сформированной интенсивной пластической деформацией // Вестник ВГТУ. 2011. №9. Т. 7. С. 85–91.
14. Kim J. K., Jeong H. G., Hong S. I., Kim Y. S., Kim W. J. Effect of aging treatment on heavily deformed microstructure of a 6061 aluminum alloys after equal channel angular pressing // Scripta Materialia, 2001. V. 45. P. 901–907.
15. Yanushkevich Z., Mogucheva A., Tikhonova M., Belyakov A., Kaibyshev R. Structural strengthening of an austenitic stainless steel subjected to warm-to-hot working. Materials Characterization // Materials characterization. 2011. V. 62. P. 432–437.
16. Тихонова М. С. Рекристаллизационные процессы в аустенитной коррозионной стали после больших пластических деформаций: дис. канд. физ.-мат.наук. Москва: МИСИС, 2015. 132 с.
17. Straumal V. B., Baretzky B., Mazilkin A. A., Phillipp F., Kostina O. A., Volkov M. N., Valiev R. Z. Formation of nanograined structure and decomposition of supersaturated solid solution during high pressure torsion of Al–Zn and Al–Mg alloys // Acta Materialia. 2004. № 52. P. 4469–4478.
18. Википедия [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>, свободный

19. Azushima A (2003) Trend of Ultrafine grained steel. Proceedings of the 245th Symposium on Technology of Plasticity, 225, 53–60. (in Japanese).
20. Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG (2001) Review: Processing of Metals by Equal-channel Angular Pressing. Journal of Material Science 36(10):2835–2843.
21. Furukawa M, Iwahashi Y, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG (1998) The Shearing Characteristics Associated with Equal-channel Angular Pressing. Materials Science and Engineering A 257(2):328–332.
22. Nemoto M, Horita Z, Furukawa M, Langdon TG (1998) Equal-channel Angular Pressing: A Novel Tool for Microstructural Control. Metals and Materials International 4(6):1181–1190.
23. Равноканальное угловое прессование (РКУП) [Электронный ресурс] /. — Электрон. журн. — Режим доступа: <http://www.nanospd.ru/ecap.html>, свободный
24. Kamaletdinov I., Dr. Yusupov V., Dr. Biba N. DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING PROCESS [25-27] Russian Academy of Sciences A.A.Baikov Institute of Metallurgy – Moscow, RF
25. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении; Дата введения 1986-01-01. — Москва: Изд-во стандартов, 1985 г.
26. Что такое Трещиностойкость, что означает? [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: URL:http://slovari.bibliofond.ru/metallurgicheskiy_word/%D0%A2%D1%80%D0%B5%D1%89%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B9%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C/, свободный
27. Рентгеновская дифрактометрия [Электронный ресурс] /. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: URL:<http://www.nalkho.com/information/xrd/>, свободный

28. Постановления Госстандарта РФ о принятии и введении в действие Общероссийского классификатора профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов ОК 016-94. — Взамен Общесоюзного классификатора профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов (186 016); Дата введения 1994-26-12. — Москва: Кодекс, 1994 г.

29. ГОСТ 12.0.003-74 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением N 1); Дата введения 1976-01-01. — Москва: 1978 г.

30. ГОСТ 12.3.004-75 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Термическая обработка металлов. Общие требования безопасности (с Изменением N 1); Дата введения 1976-07-01. — Москва: октябрь, 1975 г.

31. Приказ от 14 декабря 2010 г. n 1104 об утверждении типовых норм бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам машиностроительных и металлообрабатывающих производств, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением. — Москва: Минздравсоцразвития РФ, 2011.

32. Л.Н. Горина, М.И. Фесина Раздел выпускной квалификационной работы «Безопасность и экологичность технического объекта». - Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2016.

33. ГОСТ Р 12.3.047-2012 Национальный стандарт Российской Федерации. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. — ВЗАМЕН ГОСТ Р 12.3.047-98; Дата введения 2014-01-01. — Москва: Стандартинформ, 2014. — 3с.