

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

Институт машиностроения

(наименование института)

Нанотехнологии, материаловедение и механика

(наименование кафедры)

22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Современные материалы и технологии их производства

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Прочность и механизм разрушения ультрамелкозернистой
аустенитной стали при статическом и ударном нагружении

Обучающийся

О. В. Купцова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Г.В. Клевцов

(И.О. Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Выпускная квалификационная работа состоит из: 44 страниц, 27 рисунков, 3 таблиц, списка 35 источников, в том числе 5 источника на иностранном языке.

Данное исследование направлено на анализ прочности и механизмов разрушения ультрамелкозерновой (УМЗ) аустенитной стали при различных типах нагрузок (статических и ударных) и сравнение их с крупнозернистой (КЗ) сталью.

Объектом дипломной работы является аустенитная сталь Fe-0.02C 18Cr-8Ni.

Полученные результаты исследования дают сделать вывод, что УМЗ сталь Fe-0.02C-18Cr-8Ni представляет собой более перспективный материал по сравнению с КЗ сталью для производства изделий различного назначения, которые подвергаются разнообразным статическим и циклическим нагрузкам во время эксплуатации. Тем не менее, необходимо избегать ударных нагрузок.

Abstract

Title of the graduate work: “Strength and fracture mechanism of ultrafine-grained austenitic steel under static and impact loading.”

The final qualifying work consists of: 42 pages, 27 figures, 3 tables, a list of 15 sources, including 2 sources in a foreign language.

This study aims to analyze the strength and fracture mechanisms of ultrafine grain (UFG) austenitic steel under various types of loads (static and impact) and compare them with coarse grain (CG) steel.

The object of the thesis is austenitic steel Fe-0.02C 18Cr-8Ni.

The results of the study allow us to conclude that UFG steel Fe-0.02C-18Cr-8Ni is a more promising material compared to CG steel for the production of products for various purposes that are subject to various static and cyclic loads during operation. However, shock loads must be avoided.

Содержание

Введение	5
1 Аналитический обзор. Наноструктурированные аустенитные стали с ультрамелкозернистой структурой	6
1.1 Аустенитные стали: структура, свойство и применение	6
1.2 Современные технологии получения ультрамелкозернистой структуры в сталях	14
2 Материал и методики исследования	25
2.1 Исследуемый материал и методики исследования структуры	25
2.2 Методики определения механических свойств стали	27
2.3 Методика макро- и микрофрактографических исследований	29
3 Результаты исследования.....	30
3.1 Микроструктура, механические свойства и механизм разрушения КЗ и УМЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni при растяжении	30
3.2 Результаты испытания на ударную вязкость образцов из КЗ и УМЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni в широком интервале температур	33
Заключение	40
Список используемой литературы и используемых источников	41

Введение

Стали, содержащие аустенит, железоникелевые и железомарганцевые, являются ключевыми конструкционными материалами, которые широко используются в различных областях техники, включая машиностроение, авиастроение, приборостроение и медицинскую сферу. Это обусловлено их превосходными механическими и технологическими характеристиками в широком температурном диапазоне. Во время использования изделий из аустенитных сталей могут возникать ударные, статистические или циклические напряжения, которые отличаются и по типу нагрузки и по силе. Соответственно сталь должна обладать высокими механическими характеристиками.

Именно поэтому в настоящее время особый интерес представляют собой металлы и сплавы с ультрамелкозернистой структурой (УМЗ), благодаря которой они способны выдерживать большие напряжения при нагрузках чем стандартные материалы [4, 5].

Проведенные исследования последних лет показывают, что создание ультрамелкозернистой структуры в материалах способствует значительному повышению механических свойств, таких как твердость, прочность при растяжении и кручении, усталостная долговечность.

Однако, информация о сопротивлении аустенитных сталей с УМЗ структурой ударным нагрузкам в широком температурном диапазоне практически отсутствует.

В связи с этим, целью работы является оценка прочности и механизмов разрушения при статическом и ударном нагружении УМЗ аустенитной стали по сравнению с крупнозернистой (КЗ) сталью.

1 Аналитический обзор. Наноструктурированные аустенитные стали с ультрамелкозернистой структурой

1.1 Аустенитные стали: структура, свойство и применение

«В материаловедении твёрдый раствор углерода и других компонентов в особой форме железа, известной как гамма-железо (рисунок 1), называется аустенитом. Эта фаза была названа в честь учёного Уильяма Робертса-Остина, который занимался исследованием физических свойств металлов и сплавов» [18].

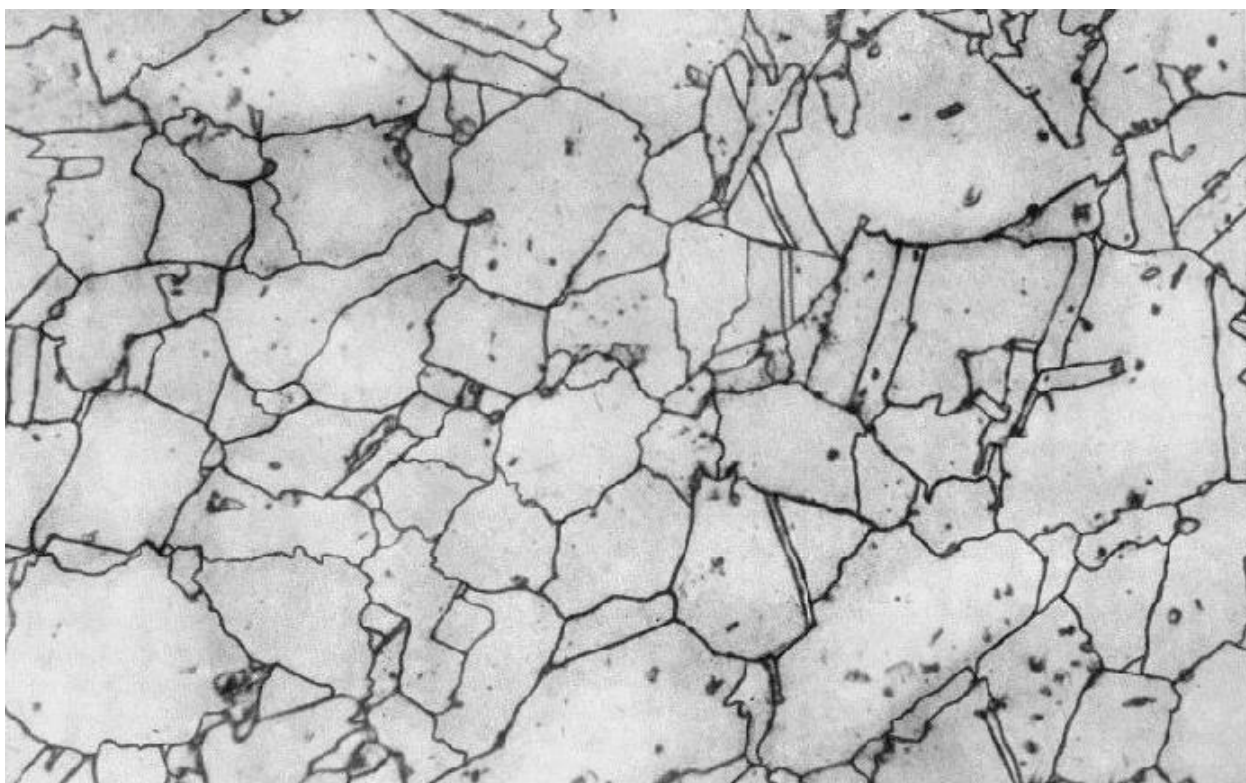


Рисунок 1 – Микроструктура аустенита

Аустенитная сталь - это легированная сталь, которая обладает высокой стойкостью к коррозии, теплостойкостью и прочностью. Ее структура состоит из аустенита, который является одной из модификаций кристаллической

решетки железа. Аустенитная сталь обладает хорошей пластичностью и способностью к обработке при высоких температурах, что делает ее идеальным материалом для производства инструментов, деталей машин, котлов и других изделий, подвергающихся воздействию высоких температур и агрессивных сред [1].

Аустенит образуется при нагреве стали выше 750°C , но не превышая 1450°C . При комнатной температуре форма аустенита сохраняется, если в сплав добавлены определенные легирующие элементы.

Структура аустенитной стали представляет собой сплав железа с добавлением углерода (обычно до 2%) и других легирующих элементов, таких как хром, никель, марганец и молибден. Химический состав стали может варьироваться в зависимости от требуемых свойств и области применения.

Микроструктура аустенитной стали состоит из гранцентрированной кубической кристаллической решетки [29, 31].

Аустенит характеризуется высокой упругостью, пластичностью и теплопроводностью. Он обладает также высокой твердостью и устойчивостью к коррозии [18].

Одним из главных преимуществ аустенитной стали является ее способность к обработке путем нагрева и охлаждения. Благодаря этому процессу, известному как отжиг, сталь может претерпевать изменения в своей микроструктуре, что позволяет добиться определенных характеристик, таких как повышенная прочность или улучшенная коррозионная стойкость.

Как говорилось ранее, сталь представляет собой составную решетку кристаллов железа, сплетенных с атомами примесей. Эти кристаллы, называемые зернами, имеют важное значение, поскольку их размер оказывает влияние на обработку, твердость, прочность и коррозионную стойкость материала. Контроль размера зерна является ключевым фактором и может быть достигнут как добавлением легирующих элементов, так и тщательным управлением процессами нагрева и охлаждения в производстве стали, а также последующим тепловым обработкой, включая отжиг и закалку, после

первоначального производства, сварки или других методов обработки стали [21, 24, 28].

«Оценивается взаимодействие легирующих элементов на конечную структуру с помощью хромоникелевого эквивалента, который определяется соотношением $Cr_{ЭКВ}$ и $Ni_{ЭКВ}$, а также использованием структурных диаграмм Шеффлера. На этой диаграмме (рисунок 2) структура стали определяется значениями координат $Cr_{ЭКВ}$ и $Ni_{ЭКВ}$.

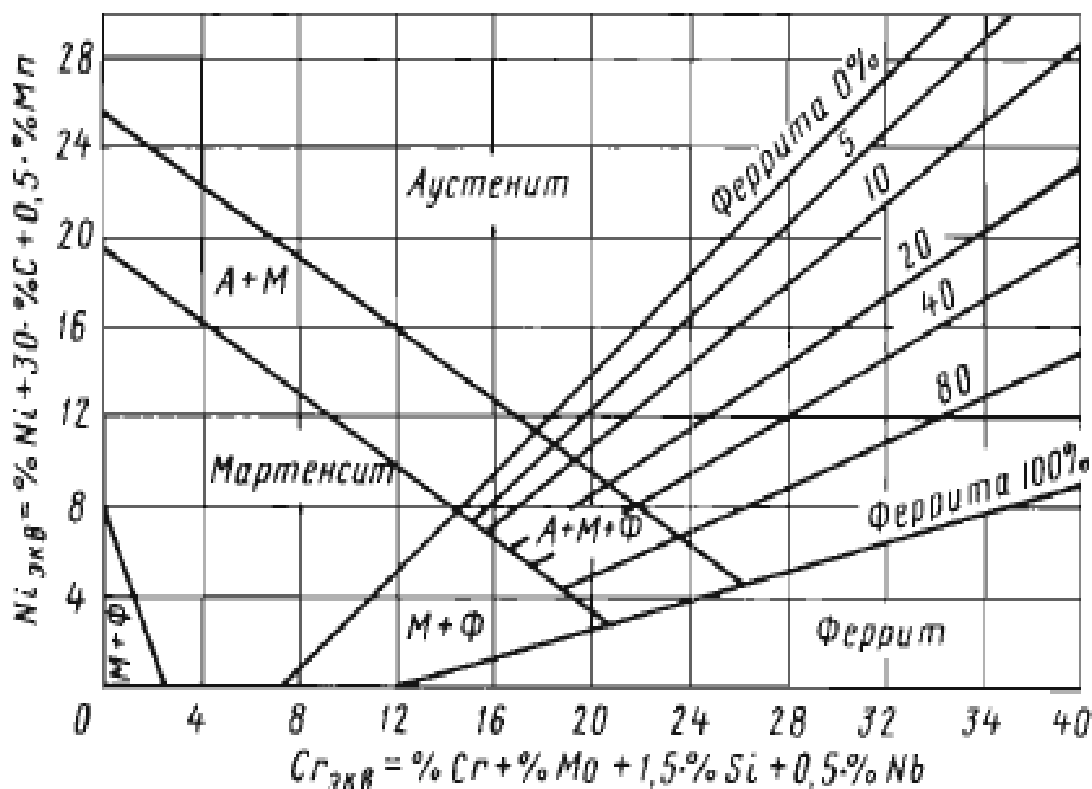


Рисунок 2 – Структурная диаграмма Шеффлера для определения фазового состава стали

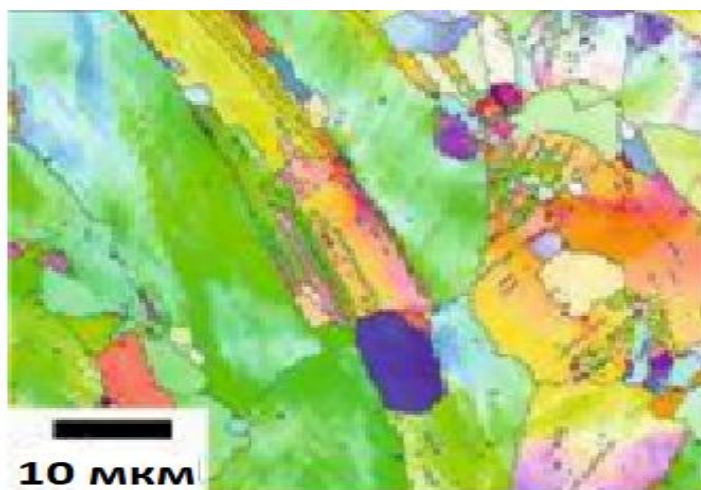
Стали, находящиеся в областях «Аустенит», «Феррит», «Мартенсит» имеют равномерную структуру, соответствующую их названиям.

Стали, которые попадают в переходные области «А + Ф», «А + М», «А + М + Ф», имеют смешанную структуру аустенита с ферритом, аустенита с мартенситом, аустенита с мартенситом и ферритом соответственно. Количественное соотношение между аустенитом и ферритом представлено

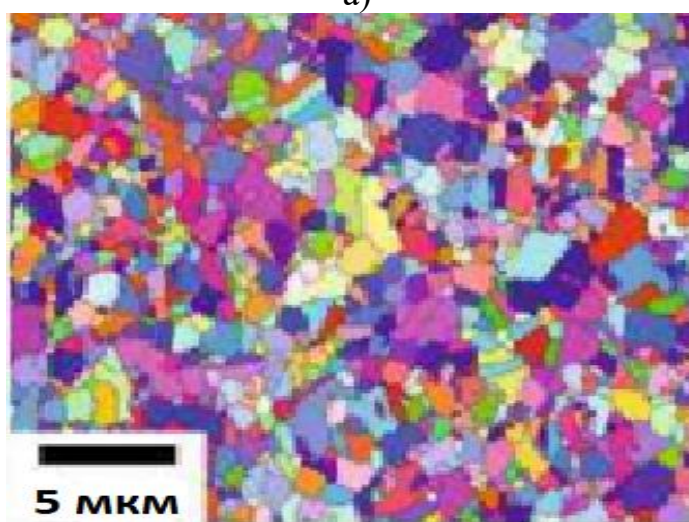
рядом линий, указывающих количество высоколегированного феррита в стали наряду с аустенитом» [15].

Необходимо учесть, что при нагревании аустенит, образующийся из исходного перлитного зерна, становится более мелкозернистым. Размер зерен аустенита зависит от размера перлитных пластинок.

«На рисунке 3 показана структура стали, которая была подвергнута холодной прокатке и отжигу. Из микроструктуры видно, что процент рекристаллизованных зерен и их размер зависят как от температуры отжига, так и от предыдущей степени деформации.



а)



б)

Рисунок 3 – Микроструктура стали после прокатки до истинных степеней деформации $\varepsilon = 0.2$ (а) и $\varepsilon = 3$ (б)

Образцы, которые были подвергнуты прокатке с степенью деформации 0,2, имеют частично рекристаллизованную микроструктуру, что соответствует пределу текучести выше 600 МПа и относительно низкому удлинению примерно 40%. При увеличении степени деформации, процессы рекристаллизации становятся более интенсивными. Полностью рекристаллизованная структура имеет высокую пластичность, а мелкий размер зерна обеспечивает высокую прочность.

Нельзя не отметить, что наилучшая комбинация механических свойств достигается в результате прокатки до истинной степени деформации 3 и отжига. Данная деформационно-термическая обработка позволяет получить предел прочности 1000 МПа и предел текучести 600 МПа, в то время как удлинение достигает 60 %» [2].

Изучение структуры аустенитной стали имеет важное значение для оптимизации ее свойств и создания новых материалов с улучшенными характеристиками. Дальнейшие исследования в области аустенитной стали могут привести к разработке новых технологий производства и использования этого материала в различных отраслях промышленности.

Братухин А. утверждает, что аустенитная нержавеющая сталь обладает важными свойствами, которые способствуют эффективности в применении данного материала. Рассмотрим основные свойства аустенитной стали подробнее:

- высокая прочность и твердость: аустенитная сталь обладает высокими механическими свойствами, что делает ее идеальным материалом для изготовления инструментов, механизмов и других изделий, где требуется высокая прочность;
- хорошая устойчивость к коррозии: аустенитная сталь содержит хром и никель, что делает ее устойчивой к воздействию окружающей среды, включая влагу, кислоты и другие агрессивные вещества. Это позволяет использовать такой материал в условиях высокой влажности или химической активности;

- жаропрочность: аустенитная сталь обладает хорошей теплопроводностью, что позволяет эффективно отводить тепло от рабочих поверхностей и предотвращать перегрев материала;
- холодностойкость: аустенитная сталь обладает высокой устойчивостью к низким температурам и может сохранять свои механические свойства даже при эксплуатации в холодных условиях. Это делает ее идеальным материалом для использования в морских и арктических условиях, а также в применениях, где требуется стойкость к низким температурам;
- долговечность: благодаря сочетанию высокой прочности, устойчивости к коррозии и хорошей обрабатываемости, аустенитная сталь имеет долгий срок службы и сохраняет свои качества на протяжении длительного времени.

Данные свойства способствуют активному применению аустенитной нержавеющей стали в различных отраслях, включая бытовые, промышленные, транспортные и архитектурные сферы, благодаря их отличной коррозионной стойкости, а также пластичности, прочности и устойчивости к экстремальным температурам. Пищевая, фармацевтическая, химическая, целлюлозно-бумажная и нефтехимическая промышленность широко зависят от аустенитных нержавеющей сталей из-за их способности обеспечивать низкие эксплуатационные расходы, сохранять чистоту продукции, предоставлять высокую степень стойкости к коррозии и обеспечивать длительный срок службы. Важны также простота сварки и удобство использования в данных отраслях.

Высокостабильные марки аустенитных сталей применяются в изготовлении деталей, которые подвергаются глубокой вытяжке, а также для изделий с низкой магнитной проницаемостью. Примерами таких изделий могут быть корпуса автомобильных фильтров, картриджи для ручек, кастрюли и детали компьютерных дисководов.

Благодаря высокой прочности холоднодеформированной аустенитной нержавеющей стали, она является основным материалом для применения в автотранспорте, пружинах, анкерах для ремней безопасности и лезвиях ножей.

Сегал В. в своей работе говорит, что аустенитные материалы обладают высокой устойчивостью даже при экстремальных температурах, что делает их популярными в криогенных применениях. Использование сталей с аустенитной структурой также эффективно как при нагреве до 800 °С (в теплообменниках, котлах, турбинах), так и в производстве автомобильных выхлопных систем, где требуется повышенная пластичность и устойчивость к деформации.

Аустенит присутствует в составе некоторых видов нержавеющей сталей, которые применяются при производстве кухонных принадлежностей, медицинского оборудования и посуды для общественного питания.

Данный материал также активно применяется при изготовлении болтов, винтов, шпилек и креплений [17]. На примере этой области применения рассмотрим, какие марки аустенитной стали существуют, а также сравним их между собой. Исходя из современного международного стандарта ISO 3506 и его российским аналогом ГОСТ Р ИСО 3506, существуют следующие марки, представленные в таблице 1:

Таблица 1 – Марки стали по ГОСТ Р ИСО 3506 и их аналоги

Марка стали по ГОСТ Р ИСО 3506	Аналоги по DIN	Аналоги по ГОСТ	Аналоги по AISI
A1	1.4305	12X18H9	302
A2	1.4301	08X18H10	304
	1.4306	03X18H11	304L
	1.4303	06X18H11	305
A3	1.4541	08X18H10T	321
		12X18H9T	
		12X18H10T	
A4	1.4401	03X17H14M3	316
	1.4404		316L
	1.4436		319
A5	1.4571	08X17H13M2T	316Ti
		10X17H13M2T	
		10X17H13M3T	

Марка А1: этот материал отличается от других меньшей стойкостью к коррозии из-за повышенного содержания серы. Однако его основные преимущества заключаются в высокой износостойкости и твердости. Он используется для изготовления деталей в машиностроении или подвижных соединений, таких как штифты, шпильки, шайбы и некоторые саморезы. Крепеж из этого материала рекомендуется использовать в сухих и неагрессивных средах, но не подходит для работы в кислотах или средах с хлором, таких как морская вода или бассейны.

Марка А2: одним из наиболее популярных и универсальных видов нержавеющей стали считается «пищевая сталь», которая широко используется в производстве столовых приборов и посуды. Этот вид нержавеющей стали может применяться во влажных помещениях, в воде, на улице, а также в низкоконцентрированных щелочах и кислотах. Важно помнить, что данная марка стали не подходит для работы с высококонцентрированными солями или кислотами. Основные области применения этого вида стали - пищевая и машиностроительная промышленности, а также приборостроение.

Марка А3: базовым материалом для нее служит сталь марки А2, к которой могут добавляться титан, ниобий или тантал для улучшения ее коррозионной стойкости при высоких температурах свыше 350 °С, когда сталь А2 может подвергаться коррозии. Крепежи из стали марки А3 не так популярны из-за их применения в экстремальных температурных условиях, где чаще используются крепежи из мартенситных жаропрочных сталей.

Марка А4: отличается от марки А2 тем, что содержит молибден, который значительно улучшает его устойчивость к коррозии в кислотах и средах с хлором, таких как морская вода и бассейны. По всем остальным параметрам эти марки схожи, поэтому крепеж из марки А4 может заменить крепеж из марки А2. Эта сталь может использоваться в более агрессивных условиях эксплуатации, таких как в судостроении, химической, бумажной, атомной промышленности, а также нефтегазовой отрасли. Марка стали А4 также известна как кислотоупорная.

Марка А5: Эта сталь имеет лучшие показатели среди всех марок аустенитного класса. Химический состав А5 может быть улучшен за счет

добавления титана, ниобия или тантала, что значительно повышает ее коррозионную стойкость при высоких температурах, превышающих 350 °С. В то время как обычные марки А4 могут проявлять признаки коррозии и потерю прочности при таких условиях. Закаленный вид выпуска крепежа является наиболее дорогой и редкой альтернативой для марки А4.

1.2 Современные технологии получения ультрамелкозернистой структуры в сталях

Ультрамелкозернистая структура в материалах играет ключевую роль в обеспечении высоких механических свойств, таких как повышенная прочность, твердость и усталостная стойкость, а также способствует улучшению деформационных характеристик. Это делает технологии формирования ультрамелкозернистых структур актуальными и востребованными в различных отраслях промышленности, включая авиацию, автомобилестроение, судостроение и прочие.

«В течение последних 15-20 лет наблюдается растущий интерес во всем мире к методам производства наноструктурированных материалов. Этот интерес вызван стремлением улучшить функциональные характеристики материалов и изучить особенности нанокристаллического состояния [11].

Наноструктурированными материалами называются материалы, размер структурных элементов (зерен, фаз) которых не превышает 100 нанометров по крайней мере в одном измерении. К ним также относятся материалы, содержащие структурные элементы размером менее 100 нанометров, такие как частицы интерметаллидов, оксидов, карбидов, нитридов, боридов и других. В настоящее время исследования в области наноматериалов и методов их производства считаются одними из самых важных и приоритетных.

Интерес к наноструктурированным материалам растет, что отражается в увеличении количества научных публикаций и проведении отечественных и международных конференций. Лидирующие страны, такие как США, Япония, Китай, активно занимаются фундаментальными исследованиями и

разработкой нанотехнологий, направленных на создание и использование наноструктурированных материалов.

В США с 2000 года активно действует программа "Национальная технологическая инициатива", получающая государственное финансирование. Ежегодные объемы финансирования этой программы постоянно расширяются и в 2008 году достигли величины в 9 миллиардов долларов» [19].

«Основу научно-технического прогресса составляют металлы и сплавы, поэтому большое внимание уделяется наноструктурным металлическим материалам, которые обладают уникальными функциональными характеристиками.

Существует несколько способов получения наноструктурированных металлов и сплавов, причем одним из самых простых и универсальных является компактирование нанопорошков. Однако, этот метод имеет серьезные недостатки и ограничения в применении.

Горелик С. с соавторами в своем исследовании отмечают, что при уменьшении размеров частиц, поверхность и количество адсорбированных паров воды и газов увеличивается, что может превысить массу частиц и превратить их в остаточное загрязнение. При этом, компактированные заготовки и изделия сохраняют остаточную пористость, а также возникают экологические проблемы, так как мелкодисперсные порошки могут возгораться и вызывать взрывы при контакте с воздухом, требуя выполнения работ в особых условиях.

В настоящее время наиболее эффективными и широко используемыми для получения и изучения свойств наноструктурированных металлов и сплавов являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД). Они позволяют проводить работу при температурах, не вызывающих рекристаллизацию и не приводящих к увеличению размеров зерен при нагреве до таких температур.

Следует отметить, что пластическое деформирование и термическая обработка влияют на свойства материала путем структурных изменений и фазовых превращений, вызванных изменением количества дислокаций,

вакансий и других дефектов кристаллической решетки. Это приводит к полигонизации, двойникованию и раздроблению зерен на мелкие фрагменты и блоки. Кроме того, пластическое деформирование может также вызвать термодинамически неустойчивое состояние, ускорить диффузионные процессы и способствовать образованию новых фаз в результате активации элементов, входящих в состав материала» [6-8].

Таким образом, при изготовлении или на стадии разработке технологических процессов производства деформированных металлических полуфабрикатов, следует уделять внимание не только процессам, которые связаны с формированием требуемой формы и геометрических размеров заготовки, но также и процессам, позволяющим добиться наилучшего набора физико-механических свойств материала, за счет формирования определенной структуры.

На сегодняшний момент известно, что для выбора требуемого метода и типа изменения структуры в металлах и сплавах путем пластической деформации нужно учитывать термомеханические параметры процесса (температуру, скорость и степень деформации, нагрузку и другие) [33, 35].

Существуют следующие виды деформации, зависящие от температуры процесса:

- холодная, при температурах ниже 0.3 температуры плавления;
- теплая, в интервале от 0.3 до 0.5 температуры плавления;
- полугорячая, в интервале от 0.5 до 0.7 температуры плавления;
- горячая, при температурах от 0.7 температуры плавления до величины температуры плавления.

Из этих видов можно выделить горячую деформацию, так как ее отличает от остальных является то, что при наличии динамической рекристаллизации в структуре, упрочнение материала после такой обработки может быть незначительным, а в некоторых случаях и вовсе отсутствовать.

Благодаря исследованиям Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов, были созданы эффективные методы и способы получения УМЗ структур, позволяющих добиться размера зерен от

10 до 20 микрон не только в сталях, но и в никелевых, титановых, алюминиевых, магниевых и интерметаллических сплавах. Что позволило не только получить материалы с наилучшими технологическими и эксплуатационными свойствами, но также вызвало рост интереса к данным методам и материалам.

Из всех методов получения УМЗ структуры можно выделить равноканальное угловое прессование (РКУП), а также кручение с высоким осевым сжатием, которые широко применяются в исследовательской деятельности [10].

Использование РКУП позволяет измельчить структуру благодаря сдвиговой деформации в зоне пересечения каналов (рисунок 4). Поворот заготовки после каждого прохода приводит к уменьшению зерна без изменения формы и размеров заготовки в поперечном сечении [22, 32].

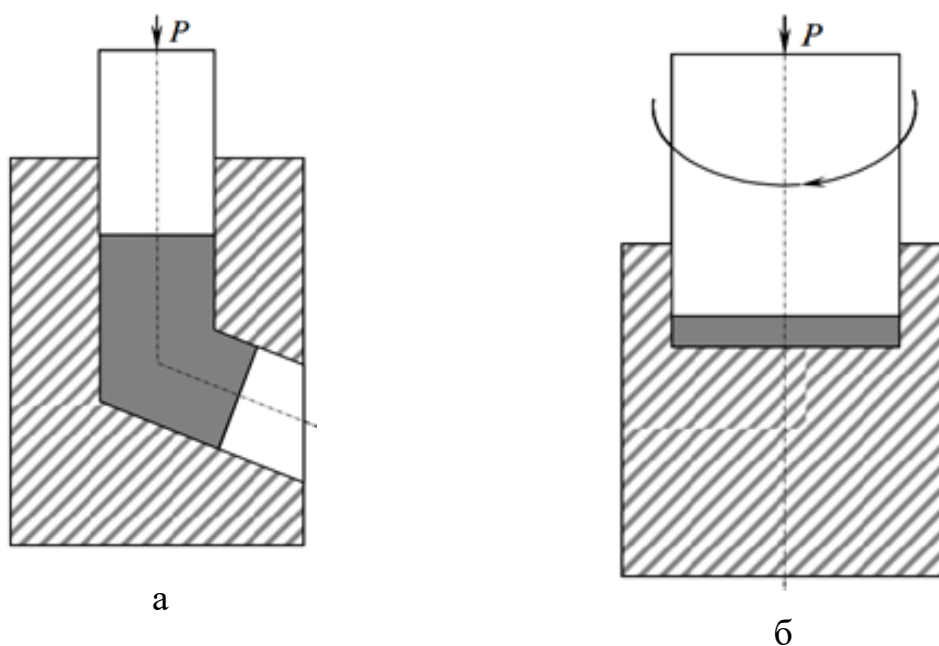


Рисунок 4 - Схема интенсивной пластической деформации равноканальным угловым прессованием (а) и кручением под высоким давлением (б)

«Одним из значительных преимуществ метода РКУП является способность получать наноструктурированные заготовки больших размеров по сравнению с изделиями, созданными другими методами. Было

продемонстрировано, что возможно производство наноструктурированных заготовок из алюминиевых сплавов и титана с диаметром 40 миллиметров и длиной 150-160 миллиметров для практического применения» [9].

Васильев Л. в своей работе указывает, что исследования чистых металлов (алюминий, магний, титан, железо, никель) и сплавов в области РКУП «показали, что уменьшение размера структуры до 10-20 нанометров приводит к значительному увеличению предела прочности на 1,5-2 раза, твердости на 2-7 раз, критической плотности тока сверхпроводящего сплава на 2-5 раз. Кроме того, данный метод приводит к повышению износостойкости на десятки раз, улучшению магнитных свойств, коррозионной стойкости, проявлению низкотемпературной и высокоскоростной сверхпластичности. Однако, наноструктурированные материалы имеют более низкую пластичность.

Среди недостатков РКУП следует выделить потребность в использовании многопрокатных проходов, что приводит к искажению формы заготовки и требует дальнейшей механической обработки для загрузки ее при следующем цикле продавливания, без замены контейнера на более крупный» [16, 20, 26, 30].

Также, стоит отметить один из методов изменения структуры материалов для снятия неравновесного состояния и уменьшения внутренних напряжений - это отжиг. Однако в процессе отжига может происходить увеличение размеров зерен, что приводит к потере определенной части высокой прочности УМЗ материалов, необходимой для повышения их пластичности.

«Применение комбинированных процессов, включающих операции регламентированного отжига и дополнительной пластической деформации при низких температурах, является перспективным направлением совершенствования процессов ИПД. Такая обработка позволяет сохранить мелкозернистую структуру, образованную предыдущей сдвиговой деформацией, и увеличить пластичность при сохранении высокой прочности» [9].

Стоит упомянуть и перспективный метод воздействия на микроструктуру материалов, которым является ультразвуковая обработка (УЗО). Исследования в проекте по ультразвуковой обработке и сварке

ультрамелкозернистых металлов и сплавов для улучшения их механических свойств показывают, что ультразвуковая обработка оказывает значительное влияние на структуру материала, способствуя релаксации внутренних напряжений и избыточной энергии.

По результатам исследований, проведенных на технически чистом никеле НП2, полученном методом КВД, с использованием различных методов анализа, было установлено, что ультразвук может привести к формированию различных дислокационных структур и улучшить структуру материала.

Другим способом для получения УМЗ структуры является интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК). При этом методе заготовки, которые обычно выполнены в виде диска, подвергаются сдвиговой деформации по средствам кручения и одновременного приложения гидростатического давления, значение которого может достигать до 10 ГПа. Схема данного метода представлена на рисунке 5:

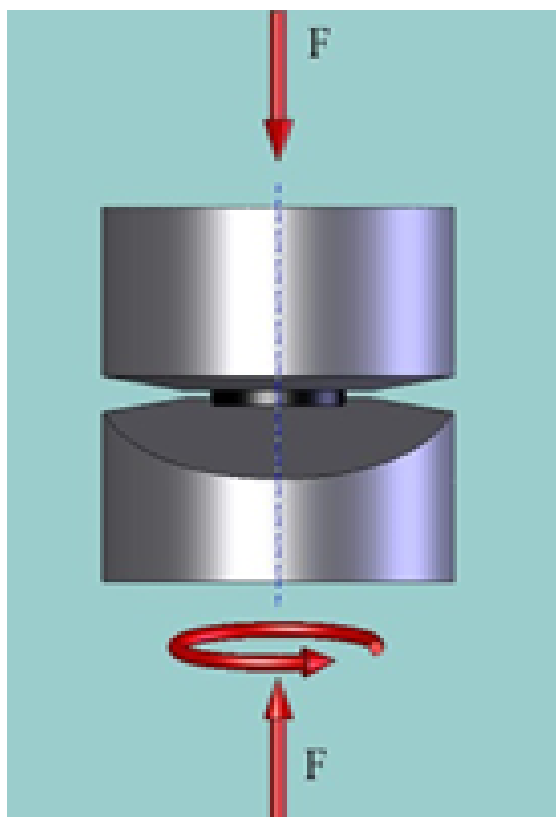
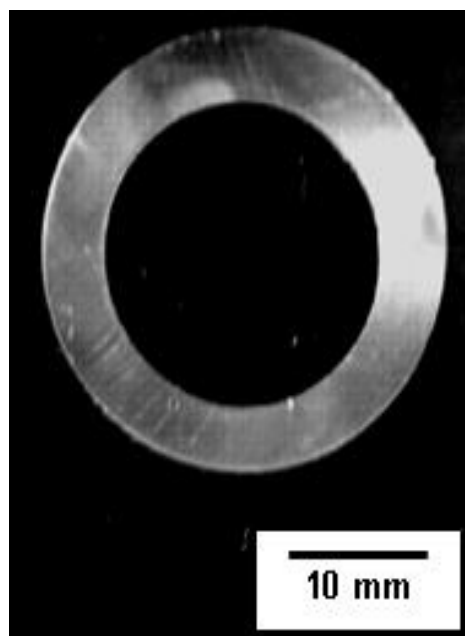
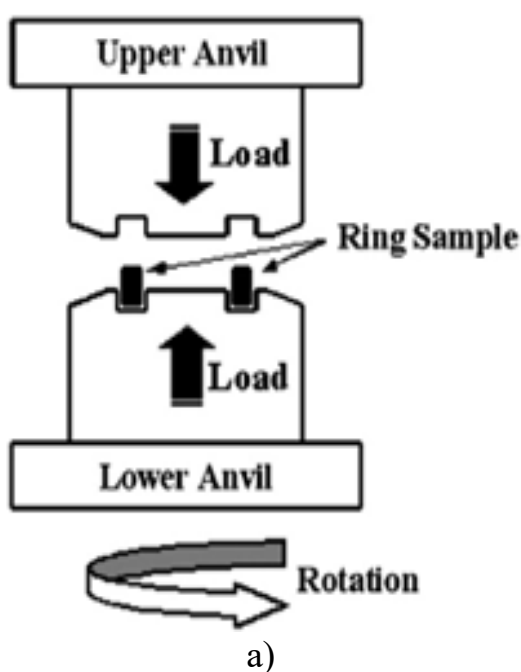


Рисунок 5 – Схема ИПДК

При ИПДК измельчение микроструктуры образца начинается при деформации в половину или один полный оборот, однако для достижения однородной структуры со средним размером зерна в 100 нм требуется деформация в несколько оборотов [23].

В наше время, благодаря разработке специальных оснасток, используя метод ИПДК можно применять не только к дисковым образцам, но и к образцам, имеющим цилиндрическую форму и в виде колец диаметром до 100 мм (рисунок 6).



а – схема ИПДК кольцевых образцов, б – кольцевой образец после ИПДК

Рисунок 6 – Обработка колец методом ИПДК

С целью обеспечить достаточное трение между кольцом и бойком для протекания деформации на поверхности образцов делают конический выступ.

С целью получения УМЗ структуры в листовых длинномерных изделиях существует способ многократной прокатки. Сущность которого заключается в разрезки листа после деформационной обработки, путем прокатывания через

ролики, зачистки поверхностей, сборки полученных заготовок в пакет и повторный прокат через ролики (рисунок 7).

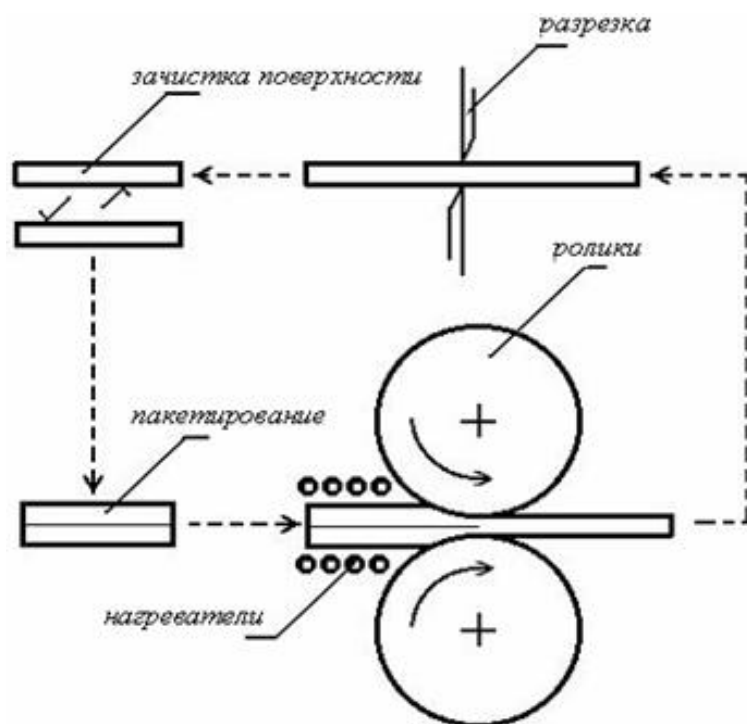


Рисунок 7 – Схема многократной прокатки

Благодаря пакетированию перед каждым циклом обработки можно обеспечить большую степень деформации изделия, сохранив при этом ее размеры.

В свою очередь соединение листов и измельчение структуры происходит за счет диффузионных процессов, протекающих в твердой фазе [25].

Одним из способов, позволяющим получать УМЗ структуры в изделиях с длинномерным профилем и разной формой, является метод винтовой экструзии.

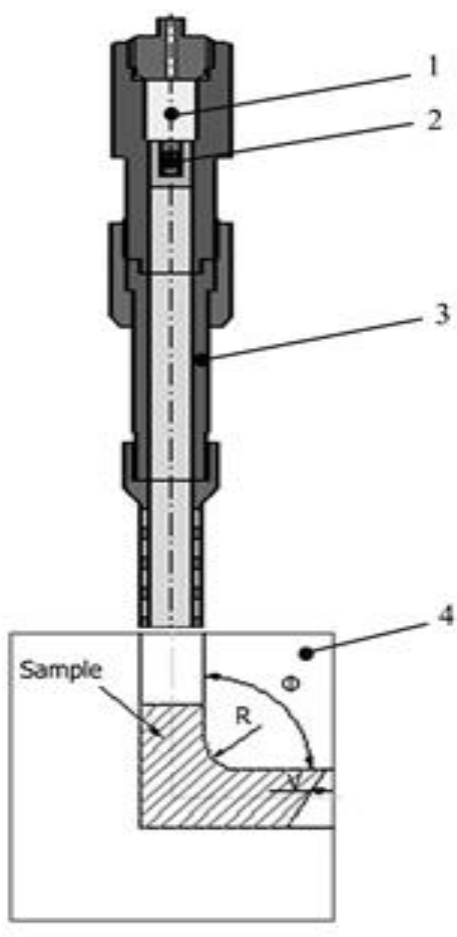
К его преимуществам можно отнести:

- аккумулярование больших степеней деформации в образце;
- заметное измельчение микроструктуры;

– реализуемость в установках гидроэкструзии.

Однако, винтовая экструзия может вызывать сильную анизотропию. Кроме того, она имеет ограничения в отношении уровня деформационного воздействия за один цикл обработки, что не позволяет обеспечить значительные суммарные деформации.

Другим методом получения УМЗ структуры является, динамическое канальное-угловое прессование (ДКУП), на рисунке 8 представлена схема процесса. Данный способ отличается от остальных тем что продавливание заготовки или образцы через матрицу происходит благодаря импульсным источникам энергии.



1 – заряд, 2 – заготовка, 3 – оснастка, 4 – матрица

Рисунок 8 – Схема обработки ДКУП

Благодаря такому импульсному воздействию на образец, достигается высокая скорость деформации, примерно 10^4 с^{-1} , при очень малых значениях длительности процесса от 0.5 мкс до 0.5 мс.

Существуют две схемы обработки образцов методом ДКУП:

- поршневая, когда продавливание заготовки осуществляется за счет постоянно действующего давления пороховых газов на поршень;
- инерционная, когда разгон заготовки выполняют до продавливания его через каналы.

Для получения крупногабаритных заготовок с УМЗ структурой из малопластинных и высокопрочных металлов и сплавов существует метод многократной всесторонней изотермическойковки (рисунок 9) [34].

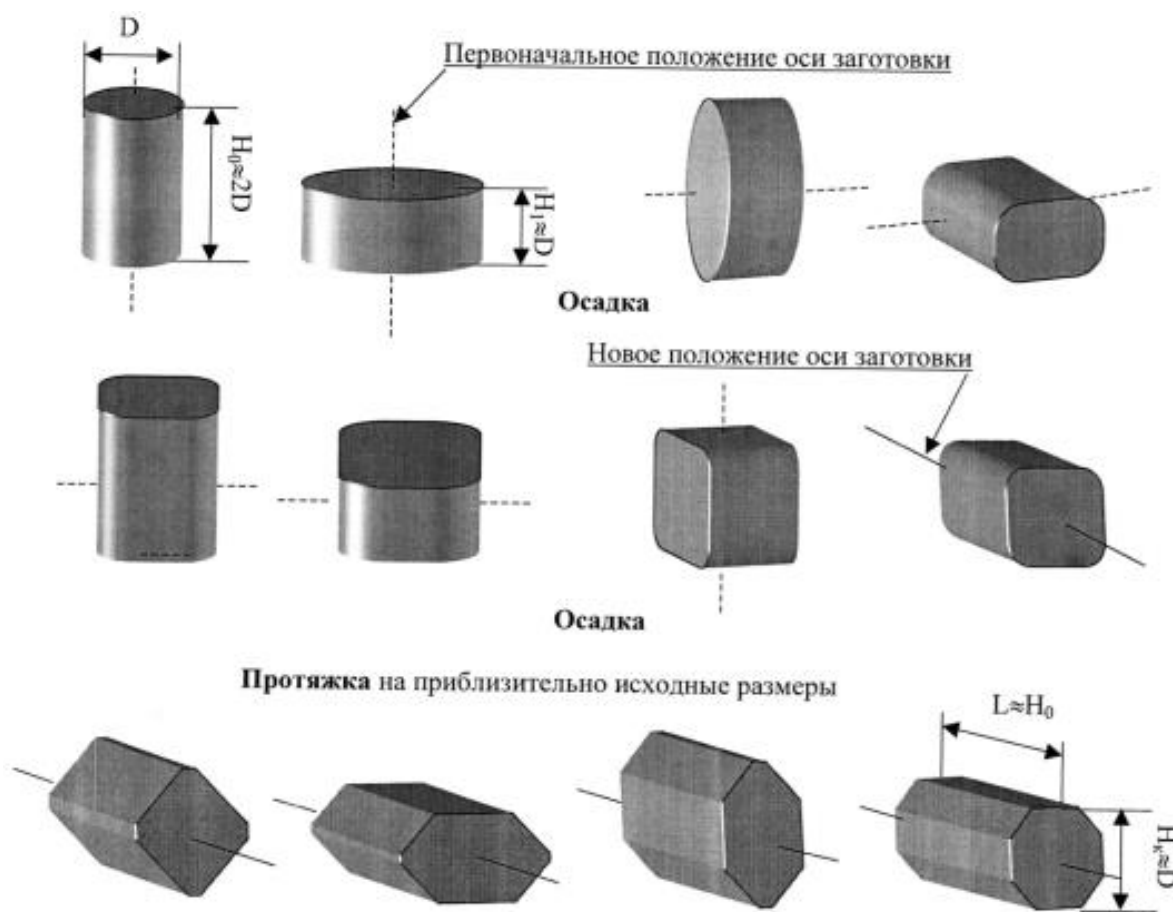


Рисунок 9 – Схема всесторонней изотермическойковки

«Всесторонняя ковка - это процесс изотермической деформации заготовок, который включает в себя последовательное проведение операций протяжки и осадки. При этом процесс проводится при повышенной температуре, которая постепенно снижается.

Температурно-скоростной интервал деформации выбирается таким образом, чтобы на каждом этапе обработки обеспечить формирование однородной структуры в материале за счет прохождения фрагментации и динамической рекристаллизации.

Одно из главных преимуществ метода заключается в том, что он позволяет равномерно обрабатывать все стороны заготовки, а также не требует изготовления специального инструмента для деформирования.

Однако, недостатком метода является ограничение степени деформации, которую можно внести в материал за одну операцию осадки, что связано с необходимостью сохранения начальной формы объемной заготовки» [13, 27].

2 Материал и методики исследования

2.1 Исследуемый материал и методики исследования структуры

Для проведения исследований свойств была выбрана широко используемая для изготовления медицинских изделий аустенитная сталь Fe-0.02C-18Cr-8Ni. Данный материал испытывали как с крупнозернистой, так и ультрамелкозернистой структурой

Химический состав выбранной стали приведен в таблице 2:

Таблица 2 – Химический состав стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni

C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Cu	Co
0,023	17.95	7.95	1.85	0.35	0.38	0.6	0.15

Исследование КЗ структуры стали в горячекатаном состоянии проводили с помощью металлографического микроскопа Axiovert 40 MAT, представленного на рисунке 10.

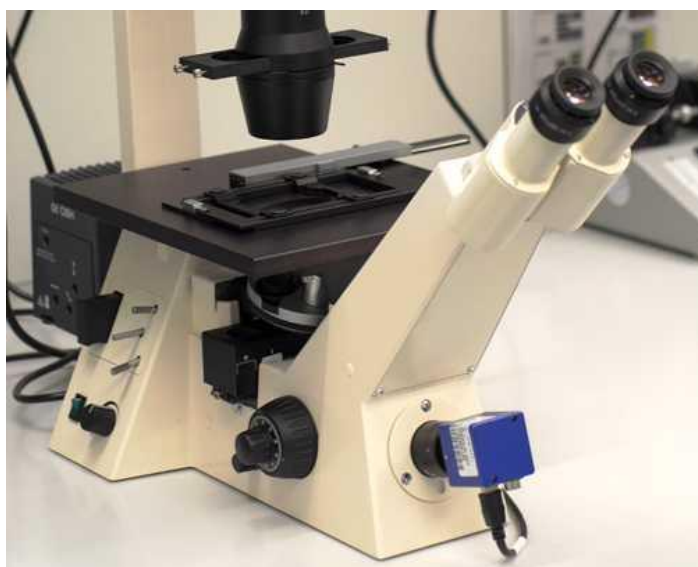


Рисунок 10 – Микроскоп Axiovert 40 MAT

Тонкую структуру УМЗ стали исследовали в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-2100, изображенном на рисунке 11:



Рисунок 11 – Микроскоп JEM-2100

В КЗ состоянии сталь исследовали после закалки в воду от температуры 1050 °С.

УМЗ состояние было получено путем следующей обработки: закалка от температуры 1050 °С с предварительной выдержкой 1 час плюс равноканальное угловое прессование при температуре 350 °С (маршрут Вс, $n=4$, $\varphi=120^\circ$) [15, 5].

2.2 Методики определения механических свойств стали

Испытания материалов на твердость проводили на твердомере ТН 300, изображенный на рисунке 12:



Рисунок 12 – Стационарный твердомер ТН300

Испытания на статическое растяжение цилиндрических образцов диаметром 3 мм были проведены при температурах 20 °С и -196 °С на универсальной испытательной машине Н50КТ (рисунок 13) в соответствии с ГОСТ 1497-84. Испытания образцов при температуре -196 °С были проведены в среде жидкого азота с использованием специального дюара из пенопласта.

Испытания на ударную вязкость (KCV) были проведены с использованием маятникового копра JB-W300 с компьютерным управлением (рисунок 14). Для охлаждения образцов до низких температур использовался жидкий азот и бензин, охлажденный в парах азота (ГОСТ 9454-78). Охлаждение проводилось в специально изготовленных дюарах. Испытания образцов при повышенных температурах проводились после нагрева образцов в муфельной печи (ГОСТ 9454-78).



Рисунок 13 – Универсальная испытательная машина Н50КТ



Рисунок 14 – Маятниковый копер с компьютерным управлением предназначен для определения ударной вязкости материалов

2.3 Методика макро- и микрофрактографических исследований

Макроанализ изломов проводили визуально. Микрофрактографические исследования при различном увеличении проводили в растровом электронном микроскопе (РЭМ) SIGMA фирмы «ZEISS» (рисунок 15).



Рисунок 15 – Электронный микроскоп (РЭМ) SIGMA фирмы «ZEISS»

3 Результаты исследования

3.1 Микроструктура, механические свойства и механизм разрушения КЗ и УМЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni при растяжении

Сталь Fe-0.02C-18Cr-8Ni в исходном состоянии имеет однофазную структуру γ -железа (рисунок 16).

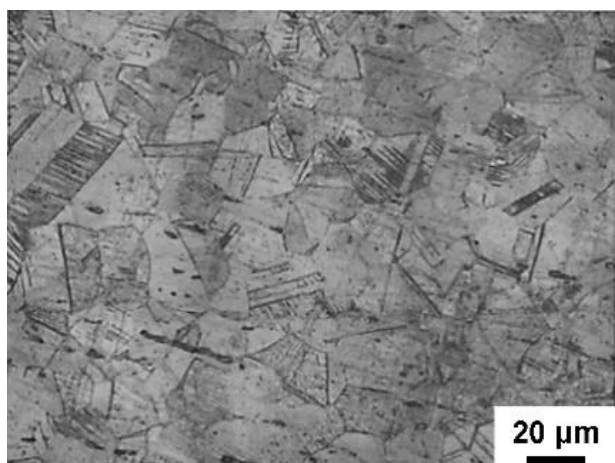


Рисунок 16 – Структура стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni в исходном состоянии

После РКУП наблюдалась вытянутая полосовая УМЗ структура, которую можно наблюдать на рисунке 17:

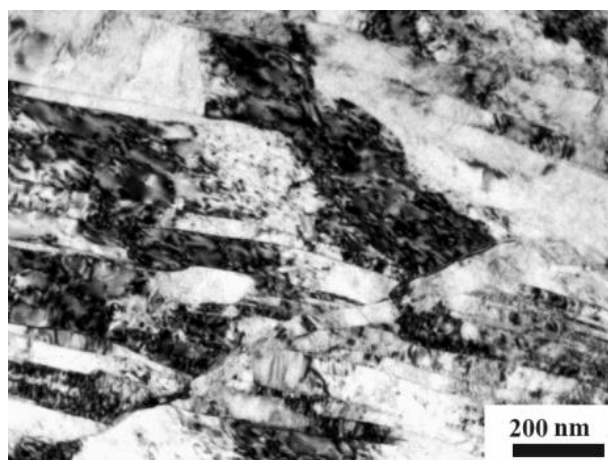


Рисунок 17 – Полосовая УМЗ структура после РКУП

На фоне развивающейся ячеистой структуры образуются микрополосы и полосы сдвига. В теле мезополос имеет место высокая плотность дислокаций, их скопления и клубки (рисунок 18).

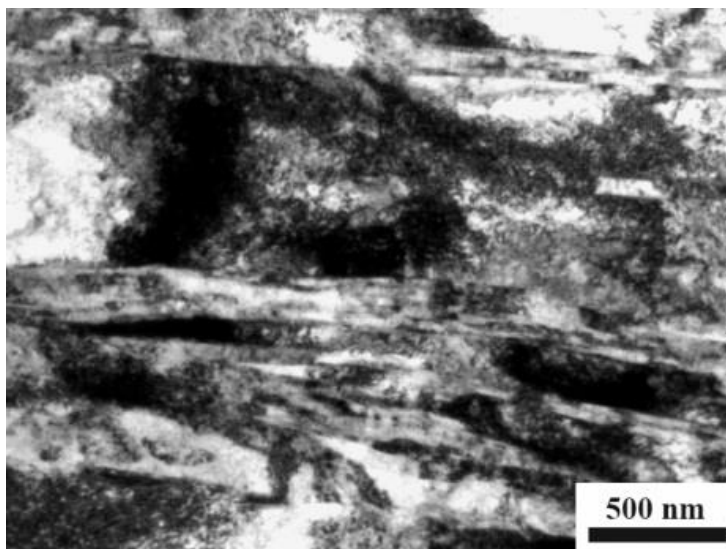


Рисунок 18 – Микрополосы после РКУП

Средний размер зерна и механические свойства стали при растяжении в исходном состоянии и после РКУП представлены в таблице 3.

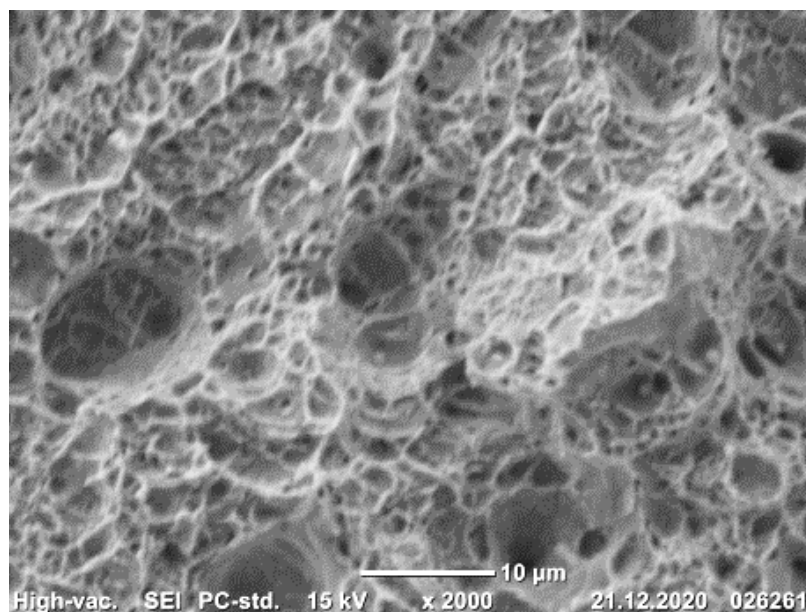
Таблица 3 – Механические свойства стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni при растяжении

Состояние	$d_{\text{ср.}}$, мкм	НВ	T °C	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
КЗ (исходное)	30	159	20	624±6	283±2	65±0.7
			-196	1600±15	605±23	44±0.9
УМЗ (РКУП)	0.55	363	20	1112±15	1065±15	20±0.5
			-196	1964±26	1282±57	38±0.7

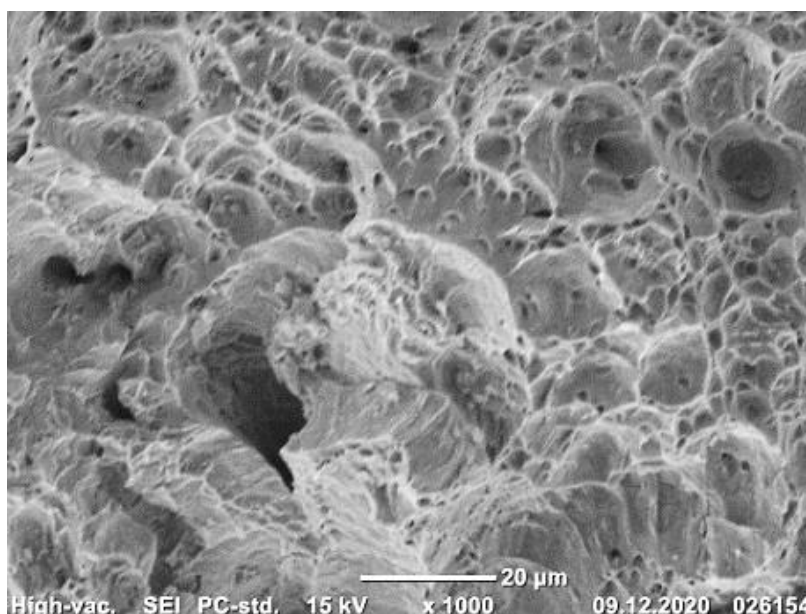
Видно, что сталь в исходном состоянии имеет невысокую твердость, прочность и высокую пластичность. После РКУП твердость и прочность стали при растяжении повышаются в 1.8-3.8 раза, а пластичность снижается в 4 раза.

Понижение температуры испытания до $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ дополнительно повышает прочностные свойства стали.

Микрофрактографический анализ показал, что сталь как в КЗ (рисунок 19а), так и УМЗ (рисунок 19б) состоянии при одноосном статическом нагружении разрушается вязко с образованием ямочного микрорельефа.



а



б

Рисунок 19. Микрорельеф в центральной части изломов образцов на растяжение из стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni в КЗ (а) и УМЗ (б) состоянии

3.2 Результаты испытания на ударную вязкость образцов из КЗ и УМЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni в широком интервале температур

Испытания на ударную вязкость образцов из стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni показали, что с повышением температуры испытания от -196 до 20 °С ударную вязкость (KCV) КЗ стали возрастает от 1.8 до 2.9 МДж/м² (рисунок 20). При температурах выше 20 °С образцы из КЗ стали полностью не разрушились.

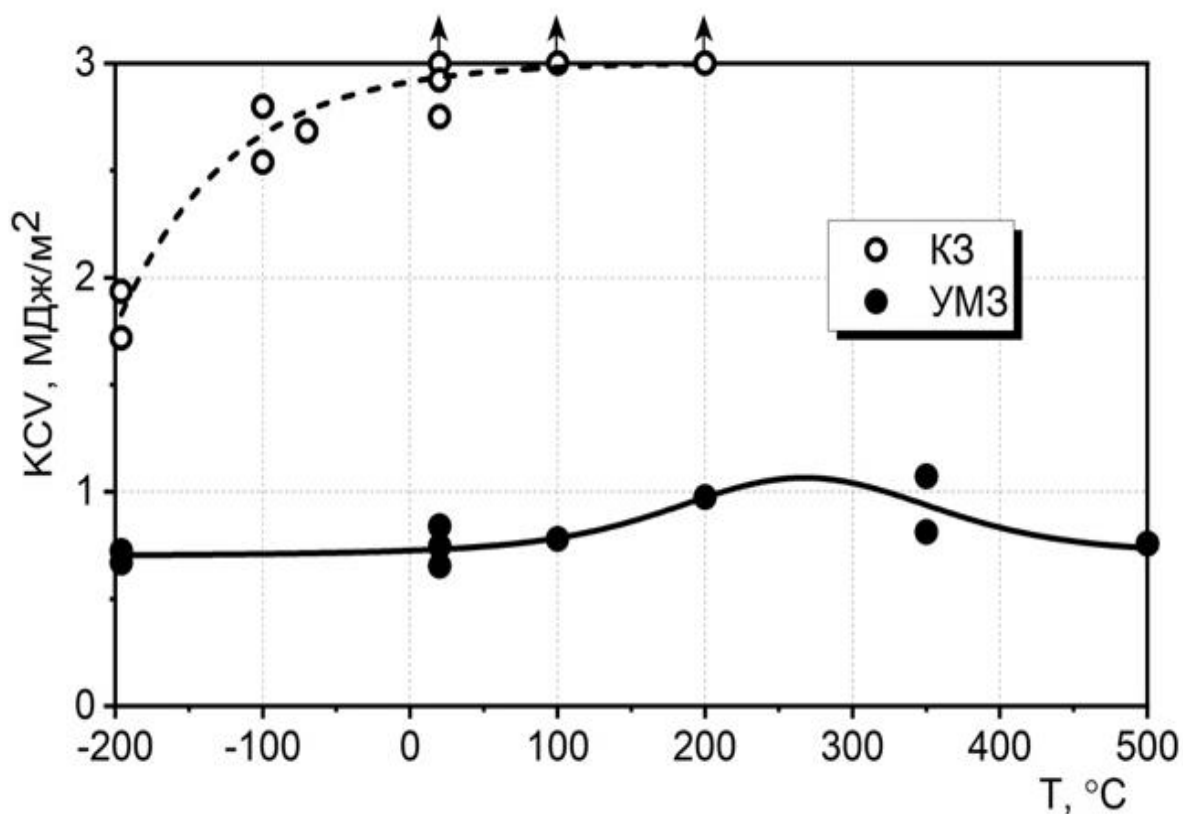


Рисунок 20 – Температурная зависимость ударной вязкости (KCV) КЗ и УМЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni

Ударную вязкость (KCV) УМЗ стали изменяется незначительно в интервале температур от минус 196 до 500 °С, оставаясь на уровне 0.7-1.1 МДж/м². Чтобы понять причину низкой ударной вязкости УМЗ стали по сравнению с КЗ сталью, был проведен макро- и микрофрактографический анализ изломов.

Все изломы, полученные в результате испытаний, стали в различных состояниях и при различных температурах, имели волокнистую структуру и

губы среза [3, 12], размеры которых увеличивались с повышением температуры испытания. На поверхности изломов КЗ стали, полученных при положительных температурах, в месте зарождения трещины можно наблюдать зону L, длиной примерно 2 мм, описанную авторами в работе [14]. Данная зона имеет значительную шероховатость в виде параллельно расположенных вязких гребней, которые видны на рисунке 21:

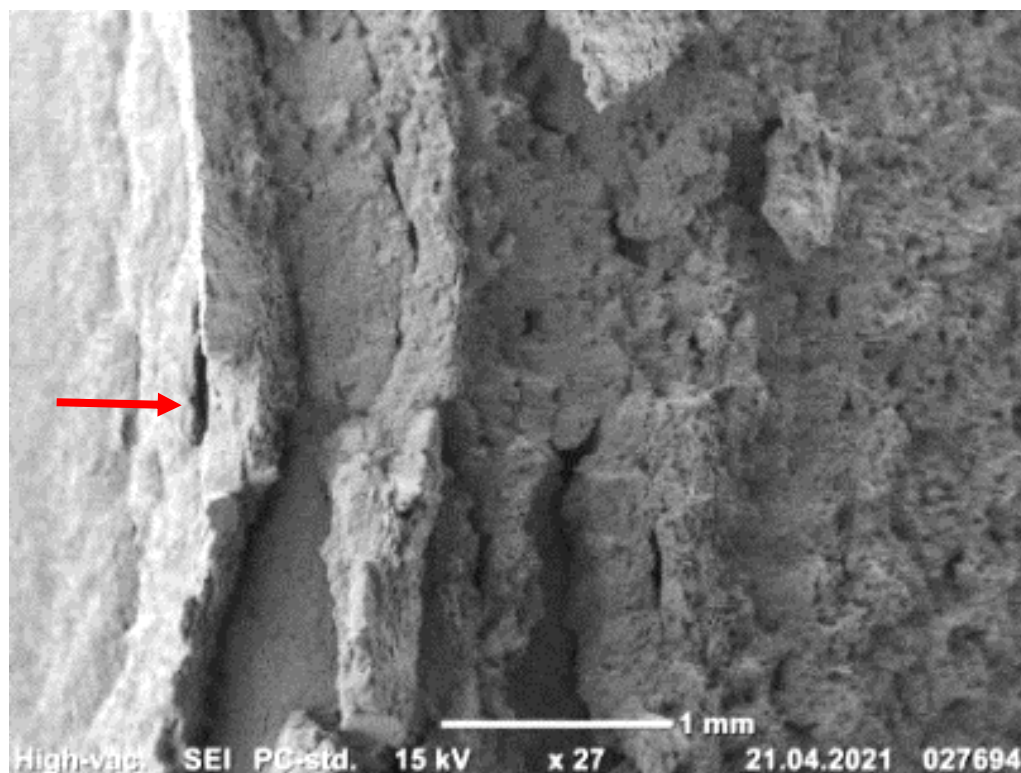


Рисунок 21 – Микрорельеф излома КЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni, при температуре 20 °С, в очаге зарождения трещины (очаг отмечен стрелкой) при увеличении x27 (РЭМ)

Микрорельеф данной зоны состоит из глубоких и гладких равноосных ямок отрыва. Образование зоны L по данным авторов работы [15] свидетельствует о высоком значении работы зарождения трещины при ударном нагружении образцов.

При понижении температуры испытания вплоть до -196 °С зона L в очаге разрушения сохраняется, хотя длина ее при -196 °С уменьшается до 0.5 мм (рисунок 22).

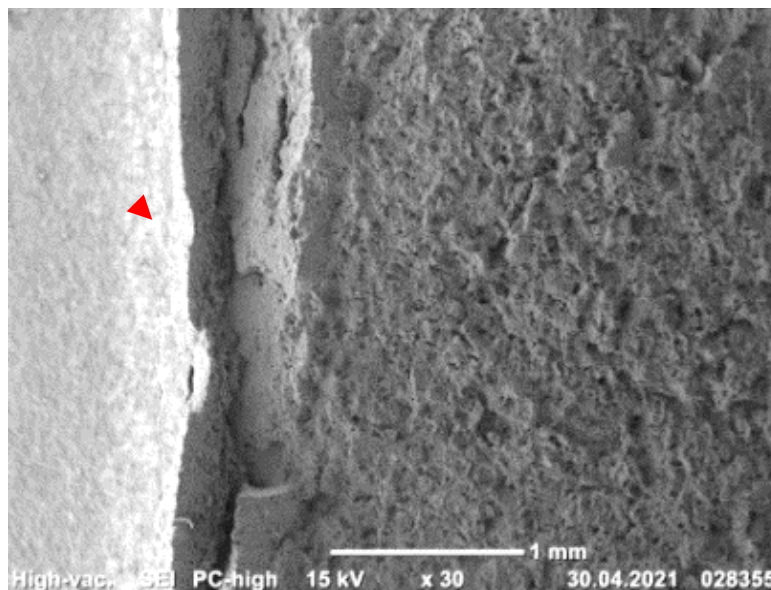


Рисунок 22 – Микрорельеф излома КЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni, при температуре -196 °С, в очаге зарождения трещины (очаг отмечен стрелкой) при увеличении x30 (РЭМ)

Микрорельеф в центральной части изломов КЗ стали, полученных при температурах 20 и -196 °С состоит из глубоких и гладких равноосных ямок отрыва различного размера (рисунок 23).

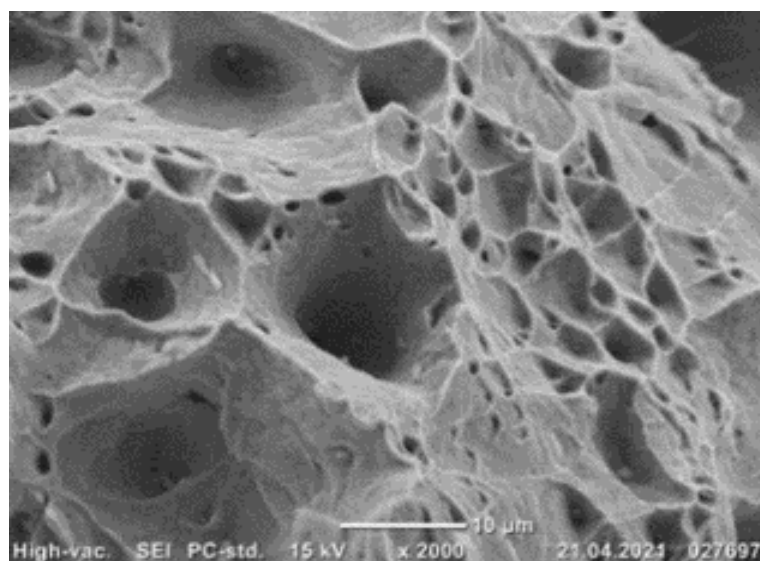
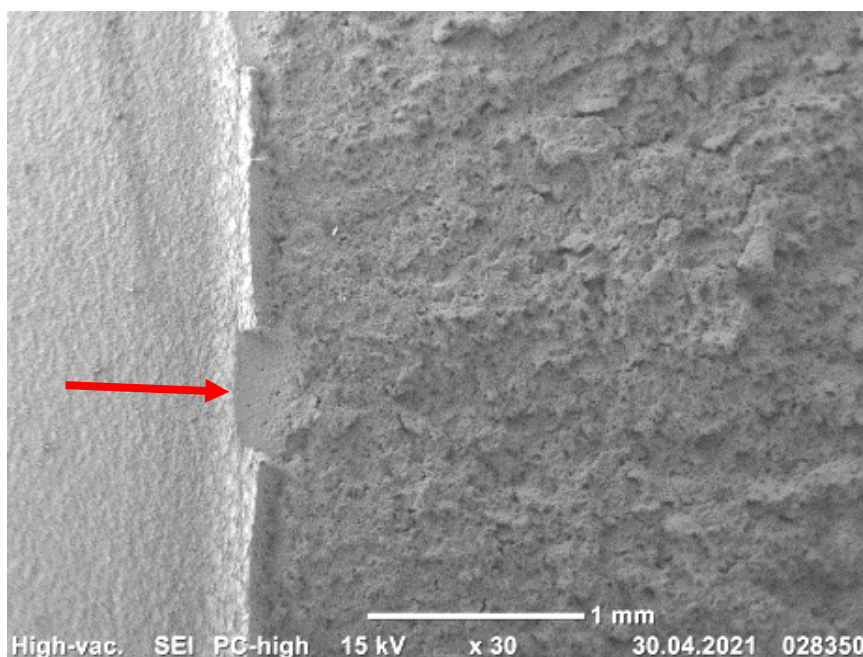
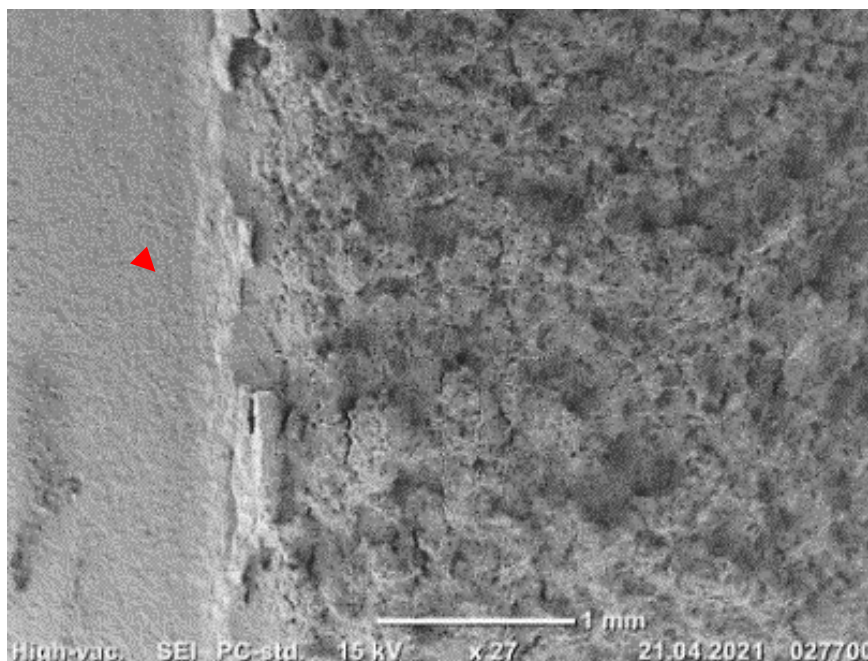


Рисунок 23 – Микрорельеф излома КЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni, полученный при температуре 20 °С, в центральной части излома при увеличении x2000

На поверхности всех изломов УМЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni, зона L в очаге разрушения отсутствует (рисунок 24).



а



б

Рисунок 24 – Микрорельеф ударных изломов УМЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni, при температурах -196 °С (а) и 20 °С, (б), в очаге зарождения трещины (очаг отмечен стрелкой), при увеличении x27

Однако при всех положительных температурах испытания в очаге зарождения трещины можно выявить микрону вытяжки Θ [14], длиной 40-60 микрометров, с микрорельефом, состоящим из неглубоких ямок сдвига (рисунок 25).

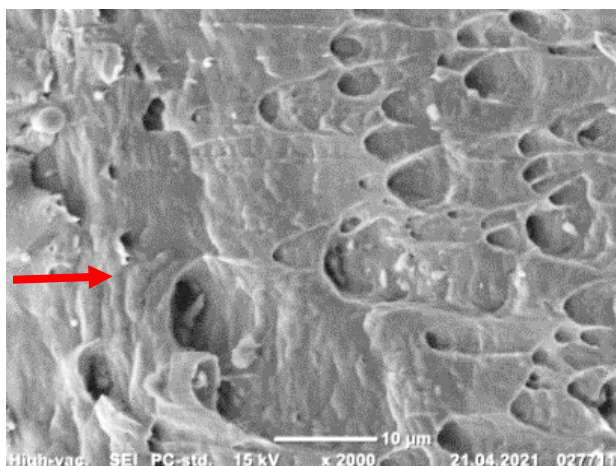


Рисунок 25 – Микрорельеф микрзоны вытяжки Θ в изломе УМЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni, полученном при температуре 20 °С, в очаге зарождения трещины (очаг отмечен стрелкой), при увеличении x2000

Микрорельеф в центральной части излома при отрицательной температуре представлен на рисунке 26.

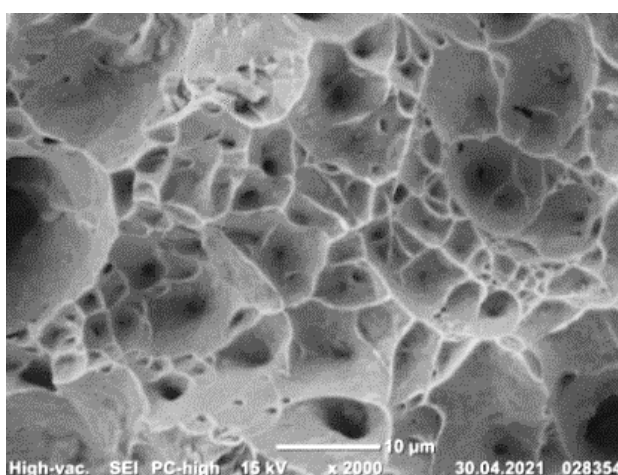
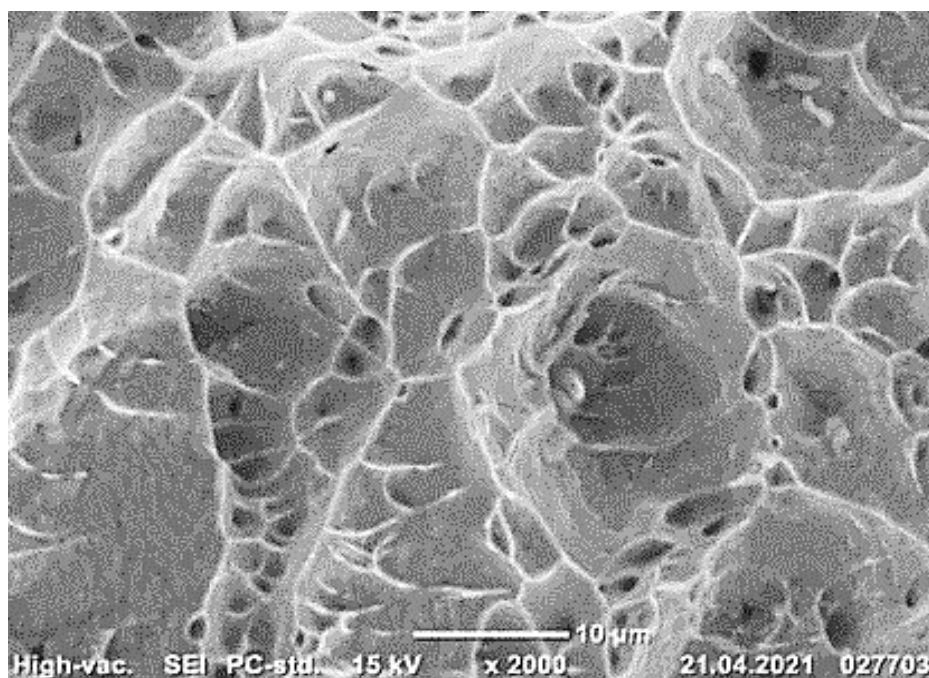
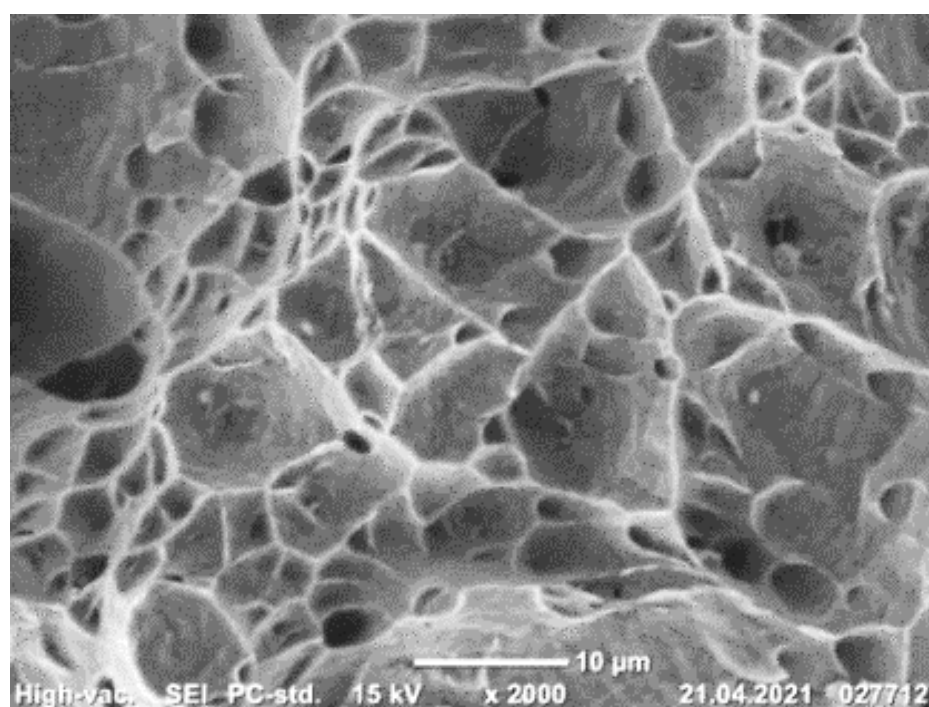


Рисунок 26 – Микрорельеф центральной части излома УМЗ стали, полученной при температуре -196 °С

Микрорельеф в центральной части излома при положительных температурах представлен на рисунке 27:



а



б

Рисунок 27 – Микрорельеф центральной части излома УМЗ стали, полученного при температурах 20 °С (а) и 350 °С (б)

Как видно из рисунков 26 и 27 в низкотемпературных изломах микрону Θ выявить не удалось.

Также в центральной части излома образцов микрорельеф состоит из различных по размеру ямок отрыва, которые наблюдаются независимо от температуры испытания.

Отсутствие в очаге разрушения образцов из стали, имеющих ультрамелкозернистую структуру, зоны L свидетельствует о более низкой энергоемкости разрушения [3, 12] по сравнению со сталью, имеющей крупнозернистую структуру.

Данные показатели, в свою очередь, обусловили проявление более низких значений ударной вязкости у стали с ультрамелкозернистой структурой чем у стали с обычной структурой.

Заключение

По результатам работы были сформулированы основные выводы:

1. РКУП аустенитной стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni, формируя УМЗ структуру со средним размером зерна 0,55 мкм и высокой плотностью дефектов кристаллического строения, повышает твердость и прочностные свойства стали при растяжении в 1,8-3,8 раз, при этом пластичность снижается в 4 раза.

2. Испытания на растяжение стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni показали, что после РКУП твердость и прочностные характеристики стали повышаются в 1,8-3,8 раза, а пластичность снижается в 4 раза. При этом независимо от состояния стали и вида нагружения, сталь разрушается вязко с образованием ямочного микрорельефа.

3. Испытания на ударную вязкость (KCV) образцов из Fe-0.02C-18Cr-8Ni показали, что с повышением температуры испытания от -196 до 20 °C, KCV КЗ стали возрастает от 1.8 до 2.9 МДж/м². При температурах выше 20 °C, образцы из КЗ стали не разрушались. КСВ УМЗ стали изменяется незначительно в интервале температур от -196 до 500 °C, оставаясь на уровне 0.7-1.1 МДж/м².

4. На поверхности ударных изломов КЗ стали Fe-0.02C-18Cr-8Ni, полученных при положительных температурах, в очаге зарождения трещины можно наблюдать зону L, что свидетельствует о высоком значении работы зарождения трещины при ударном нагружении образцов. На поверхности всех изломов УМЗ стали, зона L в очаге разрушения отсутствует.

5. УМЗ сталь Fe-0.02C-18Cr-8Ni является более перспективным материалом по сравнению с КЗ сталью для изготовления изделий различного назначения, испытывающих в процессе эксплуатации разнообразные статические и циклические нагрузки. Однако, следует избегать ударных нагрузок при эксплуатации.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Безетной В.П. Технологический анализ равноканального углового прессования заготовок // Технология легких сплавов. 2007. №1. С. 109–117.
2. Братухин А.Г. Высокопрочные коррозионностойкие стали современной авиации. М. : МАИ, 2006. 656 с.
3. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. М. : Наука, 1989. 230 с.
4. Глезер А.М., Метлов Л.С. Мегапластическая деформация твердых тел // Физика и техника высоких давлений. 2008. № 4. С. 21–35.
5. Васильев Л.С., Ломаев И.А. О возможных механизмах эволюции наноструктур при интенсивной пластической деформации металлов и сплавов // ФММ. 2006. Т. 101. №4. С. 417–424.
6. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М. : Логос, 2000. 272 с.
7. Валиев Р.З., Наймарк О.Б. Объемные наноструктурные материалы: уникальные свойства и инновационный потенциал // Инновации. 2007. № 110. С. 70–76.
8. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивную пластическую деформацию // Российские Нанотехнологии. 2006. Т.1. № 1–2. С. 208–217.
9. Валитов В.А., Мухтаров Ш.Х., Раскулова Ю.А. Формирование нанокристаллической структуры при интенсивной деформации и термической обработке и ее влияние на сверхпластические свойства никелевых сплавов с неизоморфным выделением второй фазы // ФММ. 2006. Т.103. №1. С. 93–104.
10. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. М. : МИСИС, 2005. 432 с.
11. Гулин А.Е., Полякова М.А. Анализ эффективности метода деформационного наноструктурирования с использованием математического

планирования эксперимента // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения. 2011. С. 99–105.

12. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. М. : МИСИС, 1998. 400 с.

13. Клевцов Г.В., Бобрук Е.В., Семенова И.П., Клевцова Н.А., Валиев Р.З. Прочность и механизмы разрушения объемных наноструктурированных металлических материалов : учеб. пособие. Уфа : РИК УГАТУ, 2016. 240 с.

14. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М. : МИСиС, 2007. 264 с.

15. Клевцова Н.А., Фролова О.А., Клевцов Г.В. Разрушение аустенитных сталей и мартенситные превращения в пластических зонах. М. : Изд-во Академии Естествознания, 2005. 155 с.

16. Колмогоров Г.Л. Технологические особенности получения наноструктурных материалов методом интенсивной пластической деформации кручением // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2008. №9. С. 8–10.

17. Котов А.В., Миков В.В. Равноканальное угловое прессование: технология и оборудование // Металлургия. 2007. С. 320–324.

18. Петухов А.Н. Роль деформационных и структурных факторов в формировании прочности деталей ГТУ // Конференция в машиностроении. 2006. №6. С. 5–6.

19. Потехин Ю.И., Шутов К.В., Балакин Г.А. Моделирование равноканального углового прессования. // Материаловедение и технология материалов. 2015. С. 150–155.

20. Разуваев Е.И., Лебедев Д.Ю., Бубнов М.В. Формирование ультрамелкозернистой и наноразмерной структуры в металлах и сплавах методами деформации // Авиационные материалы и технологии. 2010. С. 3-8.

21. Рыбин В.В., Золоторевский Н.Ю., Жуковский И.М. Эволюция структуры и внутренние напряжения на стадии развитой пластической деформации кристаллических тел // ФММ. 1990. Т. 69. №1. С. 5–26.
22. Рыбин В.В., Золоторевский Н.Ю., Ушанова Э.А. // Анализ разориентированных структур в модельном соединении медь–медь, полученном сваркой взрывом // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. №12. С. 81–95.
23. Сарафанов Г.Ф., Перевезенцев В.Н. Экранирование полей напряжения дисклинаций ансамблем дислокаций и формирование разориентированных структур в процессе пластической деформации // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 5 (2). С. 82–90.
24. Саркисян С.О. Краевые задачи несимметричной теории упругости для тонких пластин // ПММ. 2008. Т. 72. №1. С. 129–147.
25. Сегал В.М. Процессы обработки металлов интенсивной пластической деформацией // Металлы. 2006. №5. С. 130–141.
26. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Известия АН СССР. Металлы. 1981. №1. С. 115–123.
27. Ситдииков О.Ш. Влияние всестороннейковки на формирование мелкозернистой микроструктуры в высокопрочном алюминиевом сплаве // Письма о материалах. Т.3. 2013. С. 215-220.
28. Смирнов А.С., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю. Идентификация модели сопротивления деформации металлических материалов с учетом объемной доли динамически рекристаллизованных зерен // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 9. С. 7–13.
29. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение : учебник для вузов. СПб. : Химиздат, 2007. 784 с.

30. Чутман М.Ю., Миноелян К.Н., Овидько И.А. Рост зерен и миграция границ при пластической деформации нанокристаллических материалов // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. №7. С. 1216–1229.

31. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science // Acta Mater. Volume 61. 2013. P. 782–817.

32. Lakes R. S. Torsion Testing of Materials // Journal of Engineering Materials and Technology. Volume 107. Issue 2. 1985.

33. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. New Jersey. : John Wiley & Sons, 2014. 440 p.

34. Tencer A. F. Biomechanics of internal fixation of fractures: the role of the implant in the healing process // J Orthop Res. 1985. Volume 3. № 3. P. 292–300.

35. Terence G. Langdon Equal Channel Angular Pressing (ECAP) of Materials // Materials Science and Engineering: A. Volume 462. Issues 1-2. 2007.