



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Влияние исходного структурно-фазового состояния низкоуглеродистых малолегированных сталей на формирование, структуры и свойств лазерных сварных соединений

УДК 669.14.018:621.791.725.052

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б71	Панюхина Альбина Дмитриевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Гордиенко А.И.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Маланина В.А.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М.С.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов	Ваулина О.Ю.	К.т.н., доцент		

Планируемые результаты обучения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке (-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
ОПК(У)-2	Способен использовать в профессиональной деятельности знания о подходах и методах получения результатов в теоретических и экспериментальных исследованиях
ОПК(У)-3	Готов применять фундаментальные математические, естественнонаучные и общеинженерные знания в профессиональной деятельности
ОПК(У)-4	Способен сочетать теорию и практику для решения инженерных задач

ОПК(У)-5	Способен применять в практической деятельности принципы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской и расчетно-аналитической деятельности в области материаловедения и технологии материалов
ПК(У)-2	Способен осуществлять сбор данных, изучать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию по тематике исследования, разработке и использованию технической документации, основным нормативным документам по вопросам интеллектуальной собственности, подготовке документов к патентованию, оформлению ноу-хау
ПК(У)-3	Готов использовать методы моделирования при прогнозировании и оптимизации технологических процессов и свойств материалов, стандартизации и сертификации материалов и процессов
ПК(У)-4	Способен использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств веществ (материалов), физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации
ПК(У)-5	Готов выполнять комплексные исследования и испытания при изучении материалов и изделий, включая стандартные и сертификационные, процессов их производства, обработки и модификации
ПК(У)-6	Способен использовать на практике современные представления о влиянии микро - и нано- структуры на свойства материалов, их взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями
ПК(У)-7	Способен выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов
ПК(У)-8	Готов исполнять основные требования делопроизводства применительно к записям и протоколам; оформлять проектную и рабочую техническую документацию в соответствии с нормативными документами
ПК(У)-9	Готов участвовать в разработке технологических процессов производства и обработки покрытий, материалов и изделий из них, систем управления технологическими процессами

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ О.Ю.Ваулина
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4Б71	Панюхина Альбина Дмитриевна

Тема работы:

Влияние исходного структурно-фазового состояния низкоуглеродистых малолегированных сталей на формирование, структуры и свойств лазерных сварных соединений	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 57-51/с от 26.02.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Образцы со сварным швом стали 10Г2ФБЮ после обработки поперечно-винтовой прокаткой и лазерной сварки; образцы стали категории прочности Х80 со сварным швом, полученным методом лазерной сварки.
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Анализ литературы и написание литературного обзора по современным исследованиям, направленным на изучение структуры и свойств сварных соединений; 2. Проведение структурных исследований с помощью оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии в зонах лазерных сварных соединений исследуемых сталей с разным исходным структурным состоянием; 3. Измерение микротвердости в сварных соединениях сталей; 4. Проведение механических испытаний на статическое растяжение.
Перечень графического материала	Изображения микроструктур сталей, полученные с помощью оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии; графики распределения микротвердости.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
<i>Финансовый менеджмент</i>	Маланина В.А., доцент ОСГН ШБИП, к.э.н.
<i>Социальная ответственность</i>	Черемискина М.С., ассистент ОТД ШБИП
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Реферат/Abstract	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Гордиенко А.И.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б71	Панюхина Альбина Дмитриевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 99 страниц, 33 рисунка, 25 таблиц, 78 источников, 0 прил.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, поперечно-винтовая прокатка, лазерная сварка, сварной шов, микроструктура, структурно-фазовое состояние.

Объектом исследования являются лазерные сварные соединения стали 10Г2ФБЮ после поперечно-винтовой прокатки при температурах 920°С и 850°С и стали категории прочности X80 после контролируемой продольной прокатки и последующего ускоренного охлаждения.

Цель работы – изучение влияния разного исходного структурно-фазового состояния низкоуглеродистых сталей 10Г2ФБЮ и X80 на закономерности формирования структур и механические свойства сварных соединений, полученных с помощью лазерной сварки.

В процессе исследования проводились работы по изучению структуры образцов с помощью оптического микроскопа Zeiss Axiovert 25, растровых электронных микроскопов (РЭМ) марок 'Philips SEM 515' и 'LEO EVO 50' и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) HT-7700. С целью локального исследования структур в областях сварного шва для вырезки фольг использовали систему фокусированного ионного пучка FIB (FIB2100). Проведены измерения микротвердости на приборе ПМТ-3 и испытания на статическое растяжение на установке типа Поляни. Проведен анализ всех полученных результатов.

В результате комплексных структурных исследований показано, что исходное структурно-фазовое состояние определяет формирование разного типа структур в зоне сплавления, зонах термического влияния и разный уровень микротвердости стали. В стали с меньшим содержанием углерода и исходной мелкозернистой, однородной феррито-бейнитной структурой при лазерной сварке сформирован сварной шов с лучшими механическими свойствами за счет получения в структуре феррита и гранулярного бейнита, чем в стали с более высоким содержанием углерода и феррито-перлитной крупнозернистой структурой.

Область применения: результаты работы могут иметь практическое использование в виде разработки технических рекомендаций по выбору материалов при внедрении технологии лазерной сварки для получения качественных сварных соединений.

Значимость работы заключается в обосновании возможностей внедрения лазерной сварки для получения неразъемных соединений из малоуглеродистых низколегированных сталей.

Abstract

Final qualifying work 99 pages, 33 figures, 25 tables, 78 sources, 0 annex.

Key words: low-carbon steel, helical rolling, laser welding, weld joint, microstructure, structural-phase state.

The object of the research is laser welded joints of 10G2FBYu steel after helical rolling at temperatures of 920°C and 850°C and steel of strength category X80 after controlled longitudinal rolling and subsequent accelerated cooling.

The purpose of this work is to study the effect of different initial structural-phase states of low-carbon steels 10G2FBYu and X80 on the patterns of structure formation and mechanical properties of welded joints obtained by laser welding.

In the course of the study, work was carried out to study the structure of the samples using an optical microscope Zeiss Axiovert 25, scanning electron microscopes (SEM) brands 'Philips SEM 515' and 'LEO EVO 50' and a transmission electron microscope (TEM) HT-7700. For the purpose of local investigation of structures in the areas of the weld joint, a focused ion beam FIB (FIB2100) system was used for cutting out foils. Microhardness measurements were carried out on a PMT-3 device and static tensile tests on a Polyani-type installation. All the results obtained were analyzed.

As a result of complex structural studies, it has been shown that the initial structural-phase state determines the formation of different types of structures in the fusion zone, heat-affected zones and different levels of steel microhardness. Steels with a lower carbon content and an initial fine-grained homogeneous ferrite-bainite structure during laser welding form a weld with better mechanical properties due to the production

of ferrite and granular bainite in the structure than steels with a higher carbon content and a ferrite-pearlite coarse-grained structure.

Field of application: the results of the work can have practical use in the form of developing technical recommendations for the choice of materials when introducing laser welding technology to obtain high-quality welded joints.

The significance of the work lies in substantiating the possibilities of introducing laser welding to obtain permanent joints from low-carbon low-alloy steels.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	6
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	11
ВВЕДЕНИЕ.....	12
1 Литературный обзор	14
1.1 Лазерная сварка и структура сварных швов	14
1.2 Факторы, определяющие формирование структуры и свойств сварного соединения	21
2 Материалы и методы исследования	35
3 Результаты исследований.....	38
3.1. Аттестация исходного структурного состояния сталей.....	38
3.2. Структурные исследования в зоне сплавления лазерных сварных швов сталей.....	39
3.3. Структурные исследования в зонах термического влияния сварных швов сталей.....	46
3.4 Механические испытания на статическое растяжение	58
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	60
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	60
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	60
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	61
4.1.3 SWOT- анализ.....	62
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	63
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	63
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	64
4.3 Бюджет научно-технического исследования	68
4.3.1 Расчет материальных затрат НТИ	69
4.3.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	70
4.3.3 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы	72
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	72
4.3.5 Накладные расходы	73
4.3.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования ...	74
5 Социальная ответственность.....	78

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	78
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства	79
5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны	79
5.2 Производственная безопасность	81
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	81
5.3 Экологическая безопасность.....	85
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	85
5.4.1 Анализ возможных чрезвычайных ситуаций.....	86
5.4.2 Мероприятия по предотвращению ЧС	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	87
Список публикаций студента.....	90
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	91

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЛС – лазерная сварка;

ОМ – основной материал;

ЗС – зона сплавления;

ЗТВ – зона термического влияния;

УЗО – ультразвуковая обработка;

ПВП820 – сталь 10Г2ФБЮ после поперечно-винтовой прокатки при температуре 920°C;

ПВП850 – сталь 10Г2ФБЮ после поперечно-винтовой прокатки при температуре 850°C;

ОМ - оптическая металлография;

РЭМ – растровая электронная микроскопия;

ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия;

М-А составляющая – мартенситно-аустенитная составляющая;

GB – гранулярный бейнит;

DUB – (degenerate upper bainite) верхний вырожденный бейнит.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с активным развитием газо- и нефтедобывающей отрасли на территориях Крайнего Севера вопросы повышения экономичности производства и надежности эксплуатации материалов для трубопроводов являются актуальными. Основными тенденциями в повышении свойств трубных сталей является снижение уровня углерода, применение комплексного микролегирования и специальных термомеханических обработок, включающих ускоренное охлаждение. Однако улучшенные свойства трубных сталей могут существенно изменяться при проведении сварки, которая всегда сопровождает процесс прокладки трубопровода. Среди разнообразных видов сварки менее исследованной является лазерная сварка, которая имеет преимущества по сравнению с другими видами сварки (электродуговая, импульсно-дуговая, контактная стыковая сварка оплавлением и др.): возможность соединения заготовок больших толщин, высокая производительность за счет большой скорости сварки, низкий коэффициент удельного тепловложения, кратковременное пребывание металла в расплавленном состоянии, высокое качество сварного шва. Однако такие соединения часто отличаются от основного металла повышенной твердостью, хрупкостью и меньшей коррозионной стойкостью.

При сварке низкоуглеродистых малолегированных сталей разные факторы играют роль в формировании структуры и механических свойств сварных соединений. Основные из них: уровень содержания углерода и микролегирующих элементов, условия сварочного процесса: тип сварки и ее энергетические параметры, а также исходное структурное состояние стали. В зоне сплавления (ЗС) лазерных сварных швов происходит перегрев существенно выше критической точки A_{c3} . Это приводит к полной гомогенизации аустенита, после чего следует стремительное охлаждение от высоких температур. Такие высокие скорости охлаждения приводят к повышенной микротвердости в сварном шве. Изучение возможностей снижения хрупкости лазерных сварных соединений за

счет изменения химического состава и структурного состояния сталей представляет собой научный и практический интерес.

В связи с этим, **целью настоящей работы** являлось изучение влияния разного исходного структурно-фазового состояния низкоуглеродистых сталей 10Г2ФБЮ и Х80 на закономерности формирования структур и механические свойства сварных соединений, полученных с помощью лазерной сварки.

1 Литературный обзор

1.1 Лазерная сварка и структура сварных швов

Лазер – это тепловой источник с высокой плотностью энергии [1]. Лазерный или электронный луч с высокой плотностью мощности может создавать глубокий и узкий парогазовый канал и формировать глубокую и узкую область проплавления. Скорость лазерной сварки выше, чем скорость дуговой или плазменной сварки.

Так как лазерную технологию легко можно автоматизировать, ее внедрение в автомобильную, компьютерную, авиакосмическую, медицинскую, судостроительную, электронную и другие отрасли получило особый приоритет. Лазерная сварка (ЛС) позволяет сваривать самые разнообразные соединения их металлов или пластиков толщиной от очень тонких листов (примерно 0,01 мм) до толстых пластин (50 мм) [2]. ЛС проводится на воздухе, но чаще – в среде защитных газов Ar, He, CO₂, N₂ и др.

Для сварки металлов используются твердотельные (в том числе волоконные) и газовые лазеры периодического (импульсного) и непрерывного действия. Скорости ЛС с непрерывным излучением довольно высока и в несколько раз превышают традиционные методы сварки плавлением – около 50–200 и более м/ч. Это означает не только высокую производительность процесса, но и малые затраты энергии, т.е. отношение мощности излучения к скорости сварки, что обуславливает экономическую эффективность ЛС [3]. При лазерной сварке периодическим излучением скорость процесса существенно ниже, чем при сварке непрерывным излучением, и практически сопоставима со скоростями при традиционных способах сварки.

На сегодняшний день в промышленном производстве для сварки применяют несколько основных видов лазеров. Наиболее часто встречаются углекислотные (CO₂), твердотельные (с ламповой или диодной накачкой), и волоконные лазеры.

Газовые CO₂-лазеры, излучающие на длине волны 10,6 мкм в инфракрасном диапазоне, обладают лучом высокого качества и легко достигают высокой мощности 1-15 кВт.

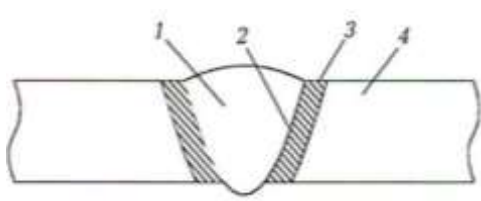
Преимуществами газовых CO₂-лазеров являются: способность создания глубоких сварных швов с высоким аспектным отношением; посредством замены комплекта фокусирующих линз один и тот же лазер может использоваться как для резки, так и для сварки. Во время лазерной сварки при необходимости лазерный луч может быть сфокусирован до диаметра, равного одной сотой микрометра, что способствует минимальному нагреванию поверхностей, граничащих со сварным швом. Такой подход гарантирует не только превосходные механические свойства за счёт возможности управления нагреванием и охлаждением при сварке, но и приводит к незначительному изменению формы, что особенно важно, учитывая требования, предъявляемые к качеству и эффективности определенных видов оборудования. Ограниченный подвод тепла является основным фактором при сварке деталей, в состав которых входят термочувствительные материалы и/или электронные компоненты, т.к. он исключает повреждение таких деталей [4].

Существенным недостатком CO₂-лазеров является их низкий КПД равный менее 10% (мощность излучения, отнесенная к электрической мощности), а, следовательно это приводит к высокой эксплуатационной стоимости. Еще один минус мощных газовых лазеров – их значительные габаритные размеры [5]. Но, несмотря на эти недостатки лазерную сварку с углекислотными лазерами используют при сварке сталей, автомобильных деталей, самолетов, судов и т.д.

В твердотельном лазере используется активная среда твердого состояния, например различные стекла, кристаллы, которые активируются редкоземельными элементами. Разновидностями твердотельного лазера являются волоконный лазер и полупроводниковый лазер. Твердотельный лазер имеет большие преимущества перед газовым лазером. Например, он применяется для работы с конструкционной стали любой толщины. Аккуратно справляется с тонкой сталью, оставляя кромку чистой. Режет тонкий алюминий, качественно обрабатывает цветные металлы.

Волоконные лазеры имеют преимущество перед твердотельной и CO_2 -лазерами, так как у энергетическая эффективность волоконных лазеров высокая (КПД 25%) [6]. Принципиально конструкция резонатора волоконного лазера мало чем отличается от того, что используется в обычном твердотельном лазере с диодной накачкой. Основная конструкция резонатора также состоит из мощных диодов накачки и схемы ввода энергии накачки в активную среду. Конфигурация резонатора имеет зеркала и проработанную схему отвода избыточного тепла. Есть, конечно, и элементы тонкой настройки всего устройства для получения оптимальных характеристик волоконного лазера. Активной средой является оптическое волокно с добавлением редкоземельных компонентов [7].

Закономерности формирования структуры при проведении лазерной сварки в общем случае подчиняются тем же закономерностям, что и при других видах сварки. Сварное соединение включает в себя зону сварки (ЗС), зону термического влияния (ЗТВ) и примыкающие к ней участки основного металла (ОМ) (рисунок 1).



1 – сварной шов, 2 – зона сплавления, 3 – ЗТВ, 4 – ОМ
Рисунок 1 – Схема сварного соединения [8]

Л.М. Выбойщик и А.В. Иоффе в своей работе [9] представили схему формирования структуры сварного соединения (рисунок 2). На первом этапе структура будет зависеть от таких параметров и процессов как: внешнее силовое поле, вводимая удельная мощность, термический цикл сварки, изменение химического состава, превращения при нагреве, превращения при охлаждении.



Рисунок 2 – Схема формирования структуры сварного соединения

Далее структура формируется при послесварочной обработке (например, ТО). В итоге будет получен сварной шов, имеющий новые измененные механические и физико-химические свойства.

В сварочном шве может наблюдаться широкий спектр структур благодаря тому, что охлаждение жидкой ванны осуществляется неравномерно. ЗТВ материала, полученного методом дуговой сварки, делится на участки в зависимости от воздействия температуры и получаемой структуры: участок неполного расплавления, участок перегрева, участок нормализации, участок неполной кристаллизации, участок рекристаллизации и участок синеломкости (рисунок 3) [10]. Перечисленные участки являются основными, их наличие или отсутствие зависит от применяемой технологии сварочного процесса.

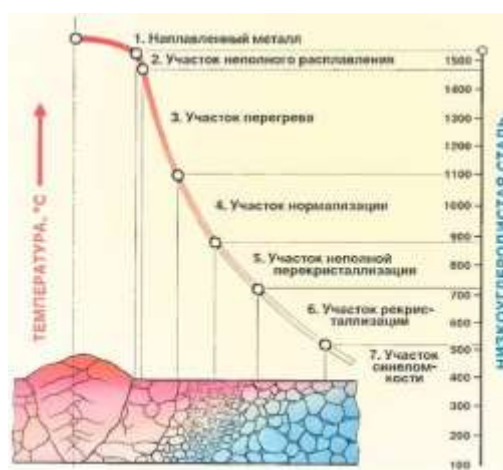


Рисунок 3 – Участки зон сварного соединения, полученного методом дуговой сварки [10]

Зона, прилегающая к металлу шва, называется участком неполного расплавления. В этой области происходит нагрев близкий к температуре

плавления металла, этот участок важен и от него часто зависит качество сварного соединения, так как здесь происходит сплавление материала шва с основным металлом.

Участок перегрева – зона сильно перегретого основного металла (1100-1500 °С), структура крупнозернистая. В этой области происходит значительное понижение пластичности и ударной вязкости разрушения. При образовании сварных соединений с большим содержанием углерода в участке перегрева могут появиться закалочные структуры.

Участок нормализации подвергается нагреву от 930 до 1100 °С, для него характерна более мелкозернистая структура. Механические свойства участка значительно повышаются в сравнении с участком перегрева.

Участок неполной перекристаллизации нагревается до 720-850 °С. В данной области происходит неполное превращение в аустенит. В итоге при последующем охлаждении вокруг основных зерен феррита наблюдаются мелкие зерна феррита, перлита или бейнита.

В участке рекристаллизации температура доходит до 450-720 °С. Этот участок можно наблюдать при сварке сталей, подвергавшихся пластическим деформациям (при сварке проката). На этом участке наблюдаются процессы возврата и рекристаллизации зерен, сформированных при пластическом деформировании. Последний участок синеломкости лежит в промежутке температур от 200 до 450 °С. Здесь наблюдаются синие цвета побежалости. Структурных изменений в этой области нет, но происходит значительное снижение пластичности.

В работе [11] была получена похожая классификация подзон сварного соединения, полученного методом однопроходной электродуговой сварки (рисунок 4). Однако есть некоторые отличия в терминологии, авторы выделяли зону крупного зерна (CGHAZ), зону полной перекристаллизации (мелкозернистую зону – FGHAZ), зону частичной перекристаллизации (межкритическую зону - ICHAZ) и зону отпуска (субкритическую зону – SCHAZ).

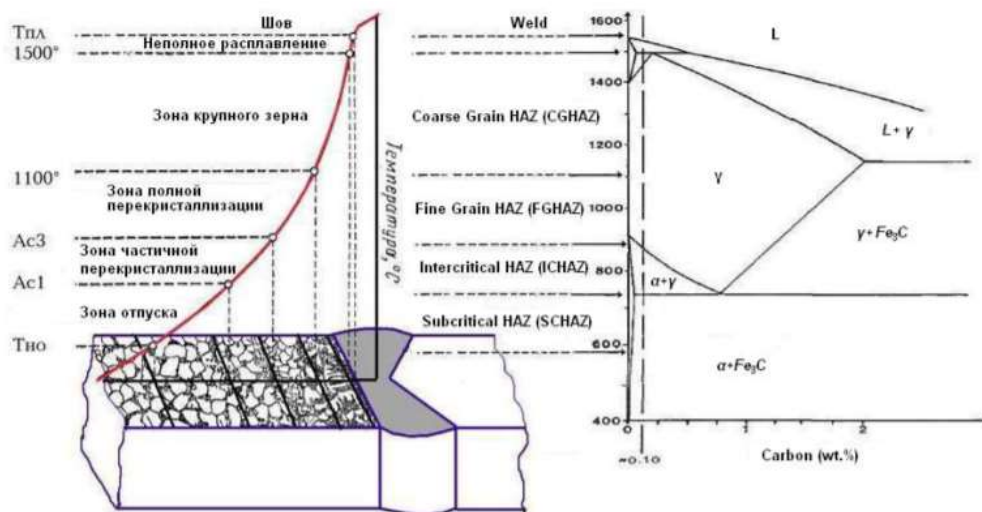


Рисунок 4 – Участки ЗТВ

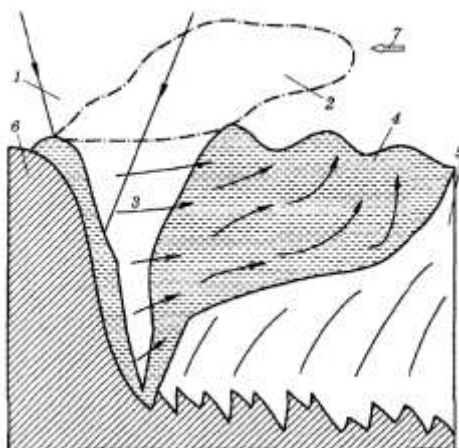
За счет того, что при лазерной сварке достигаются более высокие скорости нагрева и охлаждения ширина зон сплавления и термического влияние существенно меньше, и не все участки ЗТВ могут присутствовать. На рисунке 5 представлено макроскопическое строение ЗТВ, типичное для сварных швов после лазерной сварки. ЗТВ включает крупнозернистую зону (coarse-grained – CGHAZ), мелкозернистую зону (fine-grained – FGHAZ) и смешанную зону (mixed-grained – MGHAZ). В процессе сварки температурное поле имеет тенденцию к уменьшению с увеличением расстояния от центра зоны плавления (FZ) [12].



Рисунок 5 – Макроструктура зоны термического влияния лазерного сварного шва [12]

На особенности формирования сварного шва после лазерной сварки большое влияние оказывают параметры режима сварки. Пугачева Н.Б. с соавторами [13] подробно описали особенности лазерной сварки в воздушной атмосфере или в среде защитных газов (CO_2 , Ar) Схема сварочной ванны во время

лазерной сварки представлена на рисунке 6. Форма сварочной ванны будет вытянутой в направлении сварки.



1 – лазерный луч; 2 – плазменный факел; 3 – парагазовый канал; 4 – хвостовая часть ванны; 5 – закристаллизовавшийся металл шва; 6 – свариваемый металл; 7 – направление сварки (движение лазерного луча)

Рисунок 6 – Схема сварочной ванны при лазерной сварке [13]

В головной части сварочной ванны образуется парагазовый канал (3). Лазерный луч (1) расплавляет металл, который по краю вихревыми потоками уходит в хвостовую часть ванны (4) и частично выходит на поверхность. Над парагазовым каналом образуется светящийся плазменный факел (2), который состоит из продуктов испарения, мелких капель металла, выбрасываемых из ванны, и частиц конденсированного пара. Парагазовый канал позволяет лазерному лучу действовать на глубине металла, за счет чего образуется узкий, но глубокий сварной шов. Такой эффект называется кинжальное проплавление.

Основными характеристиками лазерного излучения являются мощность лазерного излучения P и скорость сварки V . При некоторой скорости сварки форма канала приобретает динамическую устойчивость, т.е. в передней части сварочной ванны металл плавится, а в задней кристаллизуется. При высоких скоростях плазменный факел поглощает энергию лазера и снижает его проплавляющую способность.

Wei Guo и др. исследовали сварной шов стали QR980 после волоконной лазерной сварки [14]. Зона сплавления, состоящая полностью из мартенситной структуры, показала высокую твердость (495 HV) по всему стыку (рисунок 7). В

субкритической зоне твердости снижается до 420 HV, за счет формирования частичного отпущенного мартенсита. В ЗТВ в результате отпуска мартенсита образовалась зона размягчения (327 Hv), но ее формирование не повлияло на предел прочности соединения. Предел прочности образцов со сварным швом находится на уровне прочности основного металла. Все образцы при растяжении разрушались в основном металле.

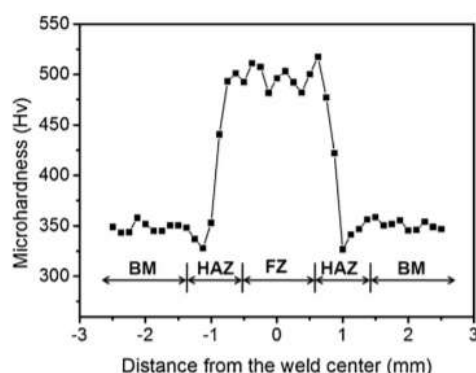


Рисунок 7 – Профиль микротвердости по стыку [14]

В ряде работ отмечается, что высокие скорости формирования сварного шва при лазерной сварке дают возможность увеличить производительность по сравнению с другими методами сварки [15-17].

1.2 Факторы, определяющие формирование структуры и свойств сварного соединения

При сварке низкоуглеродистых малолегированных сталей разные факторы играют роль в формировании структуры и механических свойств сварных соединений. Основные из них: условия сварочного процесса: тип сварки и ее энергетические параметры, химический состав стали (уровень содержания углерода и микролегирующих элементов), а также исходное структурное состояние стали.

Использование разных видов сварки и изменение их энергетических параметров позволяет контролировать уровень тепловложения и скорость охлаждения в ЗТВ. Это дает возможность изменять размеры зон термического влияния, уровень внутренних напряжений, получать широкий спектр структур от

феррито-перлитных до бейнитно-мартенситных и управлять механическими характеристиками полученных соединений [18-22]

Для грамотного анализа структурно-фазового состояния в сварном шве необходимо уделить внимание описанию существующих классификаций бейнитных структур. В литературе представлено несколько классификаций [23-28]. Согласно классификации, представленной в работе [25], существует пять основных морфологий низкоуглеродистого бейнита: гранулярный бейнит (GB), верхний бейнит (UB), вырожденный верхний бейнит (DUB), нижний бейнит (LB) и вырожденный нижний бейнит (DLB) (рисунок 8).

Гранулярный бейнит определяется как микроструктура, состоящая из квазиполигонального бейнитного феррита со второй фазой – участками мартенситно-аустенитной составляющей, состоящей из островков аустенита или мартенсита. Характерной особенностью гранулярного бейнита является отсутствие карбидов в микроструктуре.

Верхний бейнит имеет речную морфологию бейнитного феррита, поскольку он образуется при более низкой температуре по сравнению с гранулярным бейнитом. Вторая фаза, сформированная в верхнем бейните, образуется из обогащенного углеродом остаточного аустенита по границам реек бейнитного феррита и всегда представляет собой цементит.

Вырожденный верхний бейнит (DUB) формируется, когда образование цементита подавляется, и представляет собой микроструктуру, состоящую из параллельных реек бейнитного феррита, между рейками которого расположены участки MA составляющей, состоящей из остаточного аустенита и/или мартенсита.

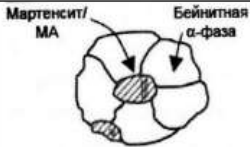





Продукт	Названия и обозначения	Морфология	Схематичное изображение
Гранулярный бейнит	Бескарбидный бейнит	Феррит неправильной формы и МА	
Верхний бейнит	ВII бейнит в низкоуглеродистых сталях B2	Реечный феррит с цементитом по границам реек	
Вырожденный верхний бейнит	VI бейнит в низкоуглеродистых сталях B3	Реечный феррит с МА по границам реек	
Нижний реечный бейнит	VIII бейнит в низкоуглеродистых сталях B1	Реечный феррит с цементитом внутри реек	
Нижний бейнит		Пластинчатый феррит с цементитом внутри реек	
Реечный мартенсит		Отпущенный реечный мартенсит	

Рисунок 8 – Классификация бейнитных структур сталей [25]

Нижний бейнит, который образуется в низкоуглеродистых сталях, также имеет реечную морфологию бейнитного феррита. Существенная разница между верхним и нижним бейнитом заключается в расположении карбидов. В нижнем бейните цементит выпадает внутри ферритных реек (рисунок 8). Частицы цементита наклонены под углом около 60° к направлению роста ферритных реек.

Другие варианты классификаций описаны у исследователей М.А. Смирнова [26], G. Krauss [27], B.L. Bramfit [28]. Эти авторы представили более расширенную и детальную классификацию, чем в работе [25] но основные типы бейнитных структур совпадают.

В формировании того или иного типа бейнитной фазы играет роль скорость охлаждения при сварке. При медленной скорости охлаждения формируются феррита-перлитные структуры, либо структура гранулярного бейнита. При увеличении скорости охлаждения формируются реечный бейнит или мартенсит [29].

В работе П.П. Полецкова [30] при имитации сварочного процесса с помощью комплекса Gleeble 3500 была исследована кинетика формирования бейнитных структур в низкоуглеродистой комплексно-легированной трубной стали, содержащей 0,062 % С; 1,80 % Мn; 0,120 % Мо; 0,032 % Cr; 0,90 % Ni при изменении скоростей охлаждения. Было показано, что в интервале малых скоростей от 0,05 до 0,5 °С/с наблюдается преимущественно феррито-бейнитная структура с темными составляющими, которые представляют собой участки перлита (П), участки МА составляющей и «островки второй фазы» смешанного типа, состоящие из перлита и МА-составляющей (П + МА). При увеличении скорости охлаждения (выше 0,5 °С/с) формируется преимущественно феррито-бейнитная структура различной морфологии, а участки перлита пропадают. В диапазоне скоростей от 0,05 до 6 °С/с может образоваться зернистый или глобулярный, а также игольчатый бейнит. Такие структуры бейнита появляются в одном температурном интервале, однако игольчатый бейнит возникает при более быстром охлаждении, чем зернистый [31, 32]. В интервале 6 – 16 °С/с формируется реечный бейнит с частицами карбида и остаточного аустенита. По мере увеличения скорости охлаждения температура начала выделения феррита понижается и при 50 °С/с его выделение подавлено полностью.

Изменение химического состава стали (концентрации углерода и легирующих элементов) дает возможность управлять точками фазовых превращений, и типом получаемых бейнитных структур, объемной долей и размерами вторых фаз (карбидов, мартенситно-аустенитной (М-А) составляющей). Образование карбонитридов позволяет контролировать размер зерна при нагреве и охлаждении. Так, в работах [33-35] было показано, что введение Al, Mo, Ni положительно влияет на формирование однородной

структуры в ЗТВ, способствует уменьшению доли и размеров хрупкой М-А составляющей и повышению ударной вязкости разрушения.

В работе [36] было исследовано влияние содержания углерода в стали на особенности формирования структур в крупнокристаллической зоне термического влияния при межкритическом отжиге (в интервале A_{c1} - A_{c3}) и уровень механических свойств при статическом растяжении и ударном нагружении. Было показано, что уменьшение объемного содержания углерода в стали с 0.063 и 0.028 % мас. приводит к:

- повышению критической точки фазового превращения A_{c1} на 18°C ;
- снижению содержанию углерода в МА составляющей с 0.30 до 0.13% масс.;
- к улучшению пластических свойств стали, за счет меньших напряжений на границе М/А составляющей и бейнита, которые ускоряют зарождение пустот или трещин на межфазной границе.

Banerjee K. [37] отмечал, что чем ниже содержание углерода в стали, тем больше нужна степень переохлаждения, чтобы избежать формирования перлита и бейнита. В работе было показано, что введение оптимального количества бейнита в исходную феррито-мартенситную структуру привело к удовлетворительным характеристикам свариваемости стали. Тогда как микроструктура с содержанием мартенсита больше 30% в исходном металле при скорости охлаждения больше $30^{\circ}\text{C}/\text{c}$ отрицательно сказывалась на свариваемости.

Карбиды, нитриды и карбонитриды, находящиеся в сварном шве, сильно влияют на его свойства. Костин В.А. с соавторами исследовали влияние карбидного и карбонитридного упрочнения на механические свойства сварных швов низкоуглеродистых сталей [38]. Так при нагреве под закалку или нормализацию могут образовываться карбонитриды и сдерживать рост аустенитных зерен. Однако крупные зерна карбонитридов приводят к охрупчиванию стали. Для стали 10Г2ФБ моделирование кинетики изменения карбидных фаз, таких как Fe_3C , VC , NbC показало, что растворение этих фаз происходит при скорости охлаждения меньше $10^{\circ}\text{C}/\text{c}$ (или $9^{\circ}\text{C}/\text{c}$ [39]). Таким

образом, управляя распределением частиц вторых фаз и их размерами возможно получение высокого комплекса механических при температурах до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В работе Яворовского Н.А. и его коллег [40] с применением дуговой сварки под флюсом было показано, что ударная вязкость сварного шва повышалась за счет модифицирования металла шва наноразмерными частицами карбида вольфрама и нитрида титана. В работе ввод наноразмерных тугоплавких частиц в сварочную ванну происходит при помощи «лигатуры». «Лигатура» – это композиционные гранулы с наноразмерными частицами, которые предварительно укладывают в разделку перед сваркой (рисунок 9). Влияние дисперсных тугоплавких частицам заключается, в том, что частицы поглощаются на границе дендритов и задерживают их рост, либо при охлаждении расплава выступают в качестве центров кристаллизации. При введении карбида вольфрама ширина первичных кристаллов становится меньше в 2 раза. Структура становится более однородной, что положительно сказывается на пластических характеристиках. Наночастица нитрида титана также способствуют уменьшению ширины кристаллитов.

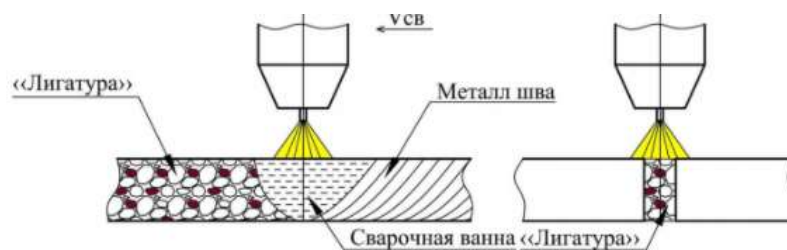


Рис. 1.

Схема механизированной сварки с «Лигатурой»

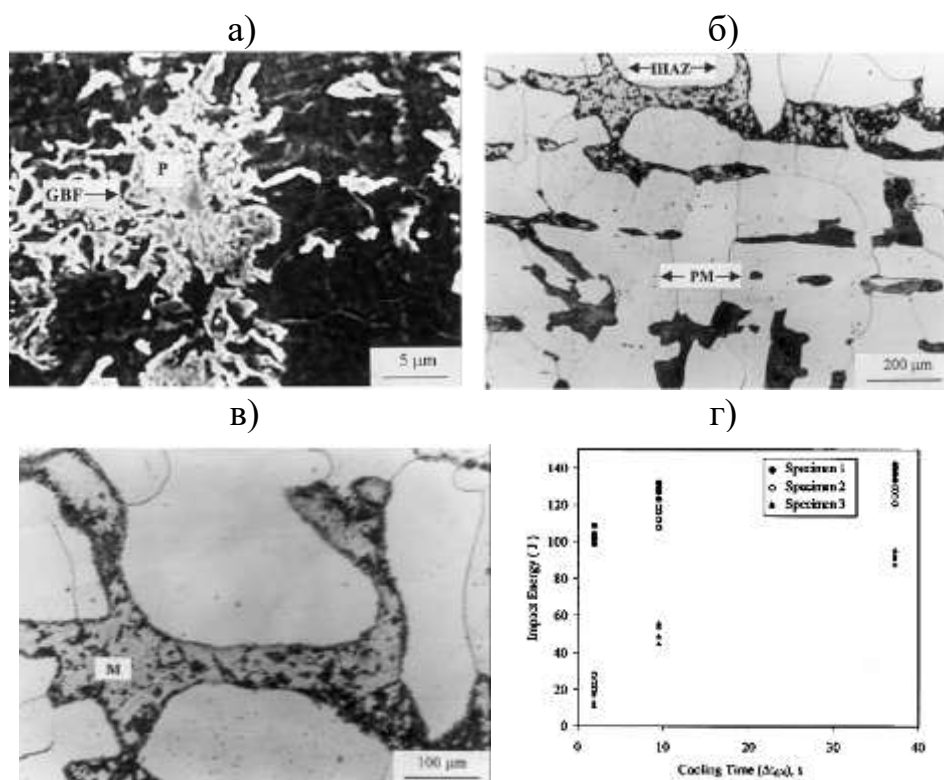
Рисунок 9 – Схема механизированной сварки с «лигатурой»

В работе [41] Кузнецов В.Д. и др. изучили влияние нанодобавок при автоматической дуговой сварке на структуру шва стали 09Г2С. В сварочную ванну вводились порошки Al_2O_3 и комплексного оксида системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-YO}_2$. Без введения нанодобавок микроструктура шва состоит в основном из полигонального феррита, игольчатого и пластинчатого феррита с упорядоченными и неупорядоченными фазами. Микротвердость изменяется от 145 до 187 МПа. При добавлении 0,5 об.% Al_2O_3 структура шва становится мелкодисперсной и состоит из верхнего бейнита, частично нижнего и игольчатого

феррита, микротвердость сварного шва повышается и составляет 264-304 МПа. При введении комплексного оксида алюминия, циркония и иттрия в соответствующем количестве формируется дисперсная структура игольчатого феррита и феррита с неупорядоченными вторичными фазами. Микротвердость составляющих изменяется от 189 до 202 МПа. Применяя данный метод сварки, можно использовать более дешевые отечественные сварочные материалы, при этом сварной шов не будет уступать по механическим свойствам.

В работе [42] было показано, что фазовые превращения и структура в ЗТВ управляются исходной структурой материала. В случае неоднородного распределения углерода в структуре при нагреве в межкритический интервал (A_{c1} - A_{c3}) и быстром охлаждении в структуре наблюдается формирование большей доли участков М-А составляющей.

Eroglu M. с соавторами [43] исследовали влияние размера зерна на микроструктуру и вязкость разрушения межкритической зоны термического влияния низкоуглеродистой стали. Изучали сталь в разном структурном состоянии: в исходном крупнозернистом, горячекатаном состоянии и с мелким зерном. Сварной шов получали дуговой сваркой под флюсом. Было показано, что малый начальный размер зерна эффективен для образования пластичных фаз, таких как феррит-перлит (рисунок 10, а) и способствует повышению вязкости разрушения. Напротив, крупное исходное зерно приводит к образованию хрупких фаз – мартенситных областей наряду с ферритом (рисунок 10, б, в) и более низкой вязкости разрушения. Применение низкой степени тепловложения приводит к более высокой скорости охлаждения, что должно привести к образованию мартенсита. Однако в случае мелкозернистой структуры, большое количество границ зерен препятствует образованию мартенсита и способствуют образованию перлита и более высокому уровню вязкости разрушения (рисунок 10, г).



а – мелкозернистая структура; б, в – крупнозернистая структура; г – зависимость ударной вязкости разрушения от скорости охлаждения

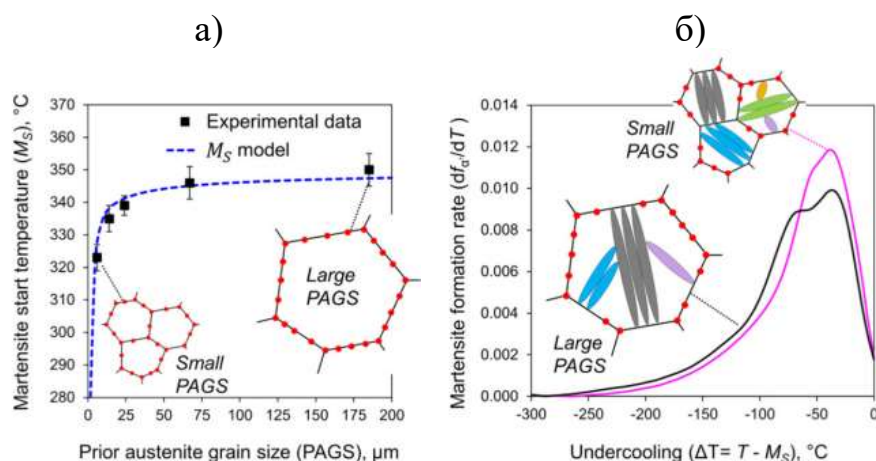
Рисунок 10 – Оптические микрофотографии межкритической ЗТВ и основного металла с $0,5 \text{ кДж} \cdot \text{мм}^{-1}$ (а-в); *PM* - parent metal, *GBF* – grain boundary ferrite

Эти выводы согласуются с работой Т.Ля [44], который при исследовании процессов модификации структуры при термомеханической обработке низкоуглеродистых сталей показал, что измельчение зерна – главный фактор в повышении предела текучести и снижении температуры вязко-хрупкого перехода.

Akselsen O.M. с соавторами [45,46] показали, что микроструктура в межкритической зоне термического влияния низкоуглеродистых микролегированных сталей зависит от исходной объемной доли и размеров ферритной и перлитной составляющих, химического состава и скорости охлаждения при сварке. Было обнаружено, что высокая объемная доля участков МА-составляющей (выше 6%) и двойникового мартенсита в межкритической зоне ЗТВ приводит к охрупчиванию сварного шва.

Авторы работ [47,48] исследовали влияние размера аустенитного зерна на формирование мартенситной структуры малоуглеродистой стали. Было показано,

что уменьшение размера аустенитного зерна приводит к снижению температуры начала мартенситного превращения M_s (рисунок 11, а). При этом скорость роста мартенситных реек на начальной стадии образования мартенсита выше в мелкодисперсной структуре (рисунок 1, б) за счет большей плотности границ зерен и потенциальных центров зарождения мартенситных реек. Однако при 30% превращения скорость превращения замедляется. В случае крупнозернистой структуры скорость превращения остается высокой по мере увеличения доли мартенситной структуры. Было также показано, что ширина мартенситных реек не зависит от размера аустенитного зерна, но их длина увеличивается при увеличении размера аустенитного зерна [47,48].



а – зависимости температуры начала образования мартенсита от размера аустенитного зерна; б – зависимость скорости образования мартенсита от степени переохлаждения

Рисунок 11 – Графики зависимости [47]

В статье [49] при изучении процесса сварки С-Мn сталей было показано, что малый размер аустенитного зерна уменьшает склонность стали к закалке.

С целью управления и улучшения свойств сварного шва применяют дополнительные после сварочные обработки. Одним из наиболее часто применяемых методов является термическая обработка.

Л.М. Выбойщик и А.В. Иоффе [9] исследовали влияние разных режимов отпуска сварных швов стали 13ХФА, полученных с применением высокочастотной сварки на водородное и сульфидное-коррозионное растрескивание. После высокочастотной сварки в ЗС и ЗТВ формируется

неравновесная бейнитная структура, характеризующаяся низкой стойкостью к водородному охрупчиванию. Высокотемпературный отпуск (680-800°C) приводит к образованию в этих зонах равновесных структур с зернистой формой цементита и высокой коррозионной стойкостью. Установлена оптимальная температура отпуска (720 °C с ускоренным охлаждением), после которого образцы со сварным швом демонстрируют наименьшую потерю пластичности после выдержки стали в коррозионной среде и последующем растяжении.

В работе [50] было показано, что дополнительный отпуск при 600°C сварного шва стали 10Г2ФБЮ, полученного методом лазерной сварки, приводит к распаду мартенситной структуры, снятию внутренних напряжений и формированию мартенсита отпуска в зоне сплавления и сорбита отпуска в ЗТВ, вследствие чего распределение микротвердости выравнивается, а ее средние величины не превышают 300 HV. При этом существенно улучшаются величины ударной вязкости разрушения отожженных образцов со сварным швом в интервале испытаний от +20°C до -40°C и вся поверхность излома характеризуется вязким микромеханизмом разрушения.

Для увеличения производительности или улучшения свойства лазерных сварных соединений разрабатываются различные усложненные варианты лазерной сварки и гибридные варианты сварки: лазерно-дуговая сварка, сварка двойным лучом (twin bean), сварка трением с перемешиванием с предварительно оплавлением лазерным лучом, сварка волоконным лазером с режимом сканирования лучом [51].

При использовании однолучевой сварки твердость в зоне сплавления может достигать 400 HV. Поскольку допустимая твердость сварных швов при для труб не должна превышать 275 HV [52], такой уровень твердости является недопустимым и в последующем такой шов нужно подвергать термической обработке.

Двулучевая лазерная сварка в защитном газе (He) полностью удовлетворяет допустимые значения твердости. Так, Грезев Н.И. с соавторами [53] разработал способ двулучевой сварки (рисунок 12). При введении

дополнительного второго лазерного излучения под определенным углом в сварочную ванну, объем жидкого металла хвостовой части увеличивается, что влияет на скорость охлаждения сварного шва и ЗТВ. Скорость охлаждения снижается в 1,5-2 раза. Способ двулучевой лазерной сварки на низколегированных перлитных и бейнитных трубных сталях, в отличие от однолучевой, обеспечивает отсутствие закалочных структур и снижение микротвердости в 1,5-2 раза (до 210-220 HV). Прочность сварного соединения при этом методе остается на уровне свариваемого металла.

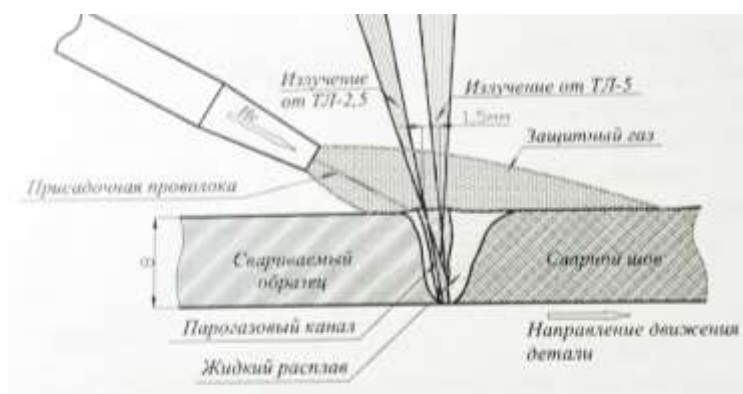
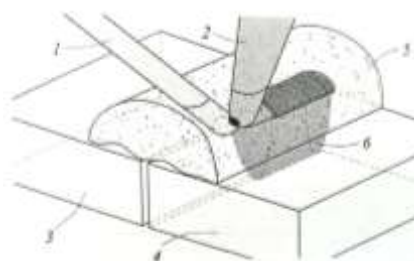


Рисунок 12 – Оптимальная схема двулучевой лазерной сварки [53]

Использование гибридного метода лазерно-дуговой сварки позволяет не допустить образование заниженного сварного шва, что является дефектом. Но применять два источника – лазерный луч и дугу – технологически энергозатратнее и сложнее [54-56].

Шиганов и его соавторы в своей статье [57] предложили метод лазерной сварки с применением присадочной проволоки, а в качестве защиты от окисления использовать керамические флюсы. На рисунке 13 представлена схема лазерной сварки.



1 – присадочная проволока, 2 – лазерный луч, 3,4 – свариваемые детали, 5 – флюс, 6 – шов

Рисунок 13 – Условная схема процесса лазерной сварки по слою флюса [57]

После сварки стали 09Г2С, предложенным методом, поверхностные дефекты сварного шва сглажены, переход к основному материалу плавный. В зоне сварного шва микротвердость составляет 260-280 HV, а в ЗТВ твердость выше и достигает 360 HV (рисунок 14). Меньший уровень микротвердости шва свидетельствует о влиянии флюса на скорость охлаждения сварного шва и формирование благоприятных структур.

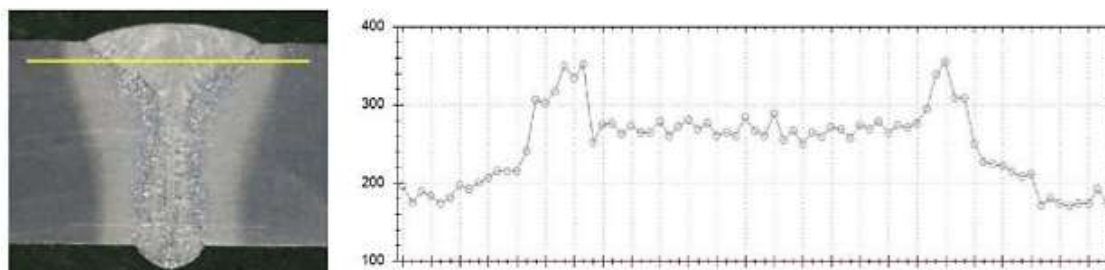
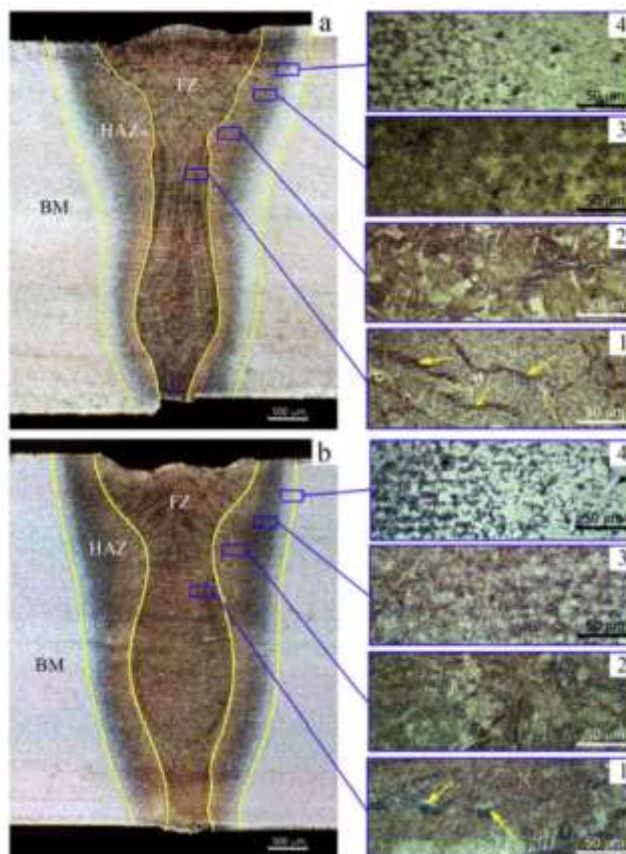


Рисунок 14 – Макроструктура лазерного сварного соединения и график микротвердости [57]

Шамов Е.М разработал процесс многослойной сварки для толстостенных труб толщиной 25,8 мм большого диаметра с применением волоконной лазерной сварки с присадочной проволокой и колебаниями луча [58]. Показано, что для снижения твердости сварного шва стали 08ГФБАА класса прочности К60 нужно применять предварительный подогрев до температуры 170-180°C. Благодаря этому в шве и зоне термического влияния образуется бейнитная структура с размером пакетов 40-50 мкм, что значительно повышает ударную вязкость. Твердость сварного соединения при предложенном методе составляет 260-280 HV₁₀, что всего на 12-20 % больше, чем при дуговой сварке.

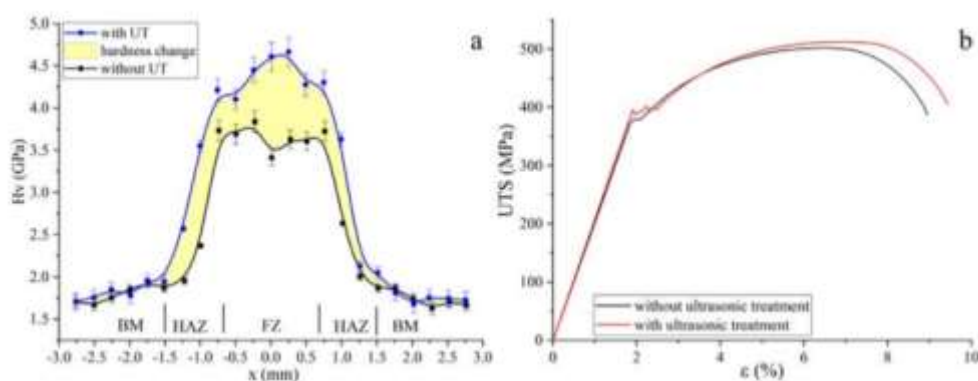
В статье Колубаева А.В. с соавторами [59] изучены особенности формирования структуры низкоуглеродистой стали с применением лазерной сварки с помощью СО₂-лазера, совмещенной с ультразвуковой обработкой (УЗО) стали. В сварном шве, полученном без ультразвуковой обработки, пластины Видманштеттова феррита в зоне сплавления ярко выражены, на рисунке 15-а они показаны стрелками. Между пластинами Видманштеттова феррита присутствует перлит. Кроме того, зона шва имеет большие поры и скопления мелких пор. При лазерной сварке с УЗО пластины Видманштеттова феррита фрагментированы,

структура более дисперсная (рисунок 15, б). Вследствие этого, микротвердость сварных соединений, полученных лазерной сваркой с УЗО, выше по сравнению с традиционной лазерной сваркой и составляла 4 – 4,6 HV (ГПа) (рисунок 16, а). Тогда как твердость зоны сплавления шва без УЗО составляла 3,5 – 3,8 HV (ГПа).



а - лазерная сварка без ультразвуковой обработки, б - лазерная сварка с ультразвуковой обработкой

Рисунок 15 – Поперечный разрез макроструктуры и микроструктуры в зонах оплавления и термического влияния [59]



а - Микротвердость сварного шва; б - предел прочности на разрыв
Рисунок 16 – Графики микротвердости и предела прочности [59]

Таким образом, на основании приведенного литературного обзора можно заключить, что лазерная сварка позволяет получать качественные сварные швы, имеет высокую производительность при низком тепловложении, быстрое действие, однако недостатком лазерной сварки является большая твердость и хрупкость сварных швов. Поэтому актуальной задачей является поиск путей снижения хрупкости лазерных сварных швов. Этого можно добиться путем изменения химического состава стали, изменения фазового и зеренного состояния материала, что позволяет управлять точками фазовых превращений и условиями последующей кристаллизации. Поэтому данная работа посвящена изучению влияния разных структурных факторов низкоуглеродистых сталей на структуру и свойства лазерных сварных соединений.

2 Материалы и методы исследования

Для исследований были выбраны две трубные стали, отличающиеся содержанием углерода, легирующими элементами и классом прочности:

1. низкоуглеродистая сталь 10Г2ФБЮ категории прочности К60 (Х70);
2. низкоуглеродистая сталь категории прочности К65 (Х80).

Составы сталей приведены в таблице 1 и 2.

Таблица 1 – Химический состав стали 10Г2ФБЮ

Элементы	C	Mn	V	Nb	Si	Ti	Cu	Al	P	S
Состав (мас.%)	0.13	1.6	0.05	0.04	0.4	0.05	0.3	0.03	0.013	0.01

Таблица 2 – Химический состав стали Х80

Элементы	C	Mn	Si	Cr + Ni +Mo	V+Ti+Nb	Cu	Al	P	S
Состав (мас.%)	0.055	1.59	0.073	0.397	0.07	0.12	0.03	0.0062	0.0043

Сталь 10Г2ФБЮ была поставлена после горячей прокатки. Для изучения влияния исходного структурного состояния сталь 10Г2ФБЮ была подвергнута обработке поперечно-винтовой прокаткой при температурах 920°C (ПВП920) и 850 °C (ПВП850). Температурные режимы прокатки приведены в таблице 2. В обоих случаях осуществляли 6 проходов поперечно-винтовой прокатки с последующим непрерывным охлаждением на воздухе.

Таблица 3 – Температурные режимы прокатки стали 10Г2ФБЮ

Режимы прокатки	Температура начала прокатки, °C	Температура завершения прокатки, °C	Диаметр исходного прутка, мм	Диаметр конечного прутка, мм	Степень деформации
№I	920, в γ -области	γ -области, вблизи A_{r3}	40	17,4	1,66
№II	850, в $(\gamma+\alpha)$ -области, вблизи A_{c3}	$(\gamma+\alpha)$ -области	38	17,2	1,58

Заготовки трубной стали категории прочности Х80 были поставлены после контролируемой продольной прокатки с окончанием прокатки в $(\gamma+\alpha)$ -области и

последующим ускоренным охлаждением. Ускоренное охлаждение проводили до температур бейнитного превращения с выдержкой для протекания бейнитного превращения. Дальнейшее охлаждение проводили на воздухе. Для оценки влияния термической обработки на свойства сварного шва стали X80 после лазерной сварки проводили отпуск в трубчатой печи СУОЛ-0,4.2,5/15-И при температуре 550 °С в защитной среде Ar в течении 1 часа. Охлаждение осуществляли на воздухе.

Прямоугольные пластины для сварки вырезали из прутка и пластин сталей вдоль направления прокатки. Сварка осуществлялась в направлении перпендикулярном оси заготовки.

Лазерную сварку пластин проводили на автоматизированном лазерном технологическом комплексе «Сибирь-1», включающем непрерывный CO₂-лазер. Характеристики генерируемого излучения следующие: длина волны излучения $\lambda = 10.6$ мкм; максимальная мощность излучения до 8 кВт. Для защиты сварного шва и корня шва использовали инертный газ (гелий). Сварные соединения получали за один проход при заглублении фокуса внутрь листа в режиме кинжального или глубокого проплавления. Оптимальные условия сварки: мощность излучения P , скорость сварки V , место расположения фокусного пятна Δf относительно верхней границы листа и размеры пластин для сварки приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Размеры пластин и основные параметры лазерной сварки

Размеры пластин, мм	P , kW	V , м/мин	Δf , мм
55×17×1.2	1.2	1	-2

Микроструктуры в зоне сварного шва исследовали с использованием оптического микроскопа (ОМ) Zeiss Axiovert 25, растровых электронных микроскопов (РЭМ) марок 'Philips SEM 515' и 'LEO EVO 50', просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) HT-7700. Травление шлифов для металлографических исследований проводили в 3% спиртовом растворе HNO₃. Средний размер зерен определяли с помощью ОМ, РЭМ, ПЭМ-

изображений используя метод случайных секущих линий. С целью локального исследования структур в областях сварного шва для вырезки фольг использовали систему фокусируемого ионного пучка FIB (FIB2100). Фольги вырезали из зоны сплавления и разных зон термического влияния сварного шва.

Микротвердость по Виккерсу измеряли с помощью прибора ПМТ-3 с нагрузкой 50 г (для исходных образцов) и 100 г (для сварных швов). Микротвердость в сварных швах измеряли вдоль горизонтальной оси сварного шва. Для определения микротвердости проводили не менее 5 измерений на одну исследуемую точку. Механические испытания на статическое растяжение образцов с центральным сварным швом с размерами рабочей части $15 \times 3 \times 1$ мм проводили на установке типа Поляни при комнатной температуре и скорости растяжения 0.002 мм/сек.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4Б71	Панюхина Альбина Дмитриевна

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30,2 %</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Анализ конкурентоспособности SWOT-анализ</i>
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования. Расчет бюджетной стоимости НИ</i>
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.</i>

Перечень графического материала:

<i>1. Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
<i>2. Матрица SWOT</i>
<i>3. Альтернативы проведения НИ</i>
<i>4. График проведения и бюджет НИ</i>
<i>5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б71	Панюхина Альбина Дмитриевна		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» включает в себя анализ оценки практичности и целесообразности научно-исследовательской работы, коммерческой привлекательности конечной продукции данной НИР. Также рассматривается востребованность продукта на рынке, бюджет научного исследования, время необходимое для продвижения разработанного продукта на рынок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- провести оценку коммерческого потенциала и ресурсной, экономической эффективности научно-исследовательской работы;
- составить календарный план работ;
- оценить стоимости материально-технических, человеческих и финансовых ресурсов для исполнения проекта

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для дальнейшего внедрения метода лазерной сварки в промышленность необходимо определиться с потенциальными потребителями.

Данная сварка обладает высокой мощностью, скоростью, а, следовательно, и производительностью. Механические свойства шва сохраняются на уровне основного металла, что говорит о его качестве. Процесс сварки происходит без предварительной обработки кромок.

Потребителями исследуемого метода могут стать предприятия нефтегазовой промышленности, изготовители трубопроводов, предназначенных для эксплуатации в суровых условиях крайнего севера.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В качестве конкурентов выбраны следующие технологии сварных соединений (таблица 9):

- Лазерная (исследуемая) сварка (1)
- Плазменная сварка (2)
- Дуговая сварка (3)

Таблица 9 – Оценочная карта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б ₁	Б ₂	Б ₃	К ₁	К ₂	К ₃
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,2	5	4	2	1,0	0,8	0,4
2. Энергоэкономичность	0,3	4	3	3	1,2	0,9	0,9
3. Уровень шума	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
4. Безопасность	0,2	4	3	3	0,8	0,6	0,6
5. Автоматизация процесса	0,1	5	5	1	0,5	0,5	0,1
6. Простота эксплуатации	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
7. Конкурентоспособность технологии	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
Итого	1	33	28	19	4,6	3,75	2,55

По производительности труда плазменная сварка уступает лазерной за счет скорости получения сварного шва. Также лазерная сварка очень универсальна, помимо металла ей можно сваривать керамику, пластмассу, стекло и другие материалы, в отличие от остальных методов. Не требуются дополнительные присадочные материалы.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B \cdot \Gamma, \quad (1)$$

Где К – конкурентоспособность научно-исследовательской разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

4.1.3 SWOT- анализ

SWOT-анализ позволяет провести оценку сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта.

В этом разделе будут описаны положительные и отрицательные стороны исследуемого метода, какие могут возникнуть угрозы со стороны внешней и внутренней среды, а также возможности применения данной технологии.

Таблица 10 – Матрица SWOT-анализа

	<p><i>Сильные стороны:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая скорость процесса сварки 2. Точность 3. Высокая производительность 4. Высокие показатели механических и эксплуатационных свойств шва 5. Экологичность технологии 	<p><i>Слабые стороны:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Большая стоимость лазерных установок, 2. Сложность и несовершенство конструкции
<p><i>Возможности:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Получение качественных сварных соединений 2. Возможность сварки в труднодоступных местах 	<p>Высокие показатели точности, производительности и безопасность для окружающей среды позволяют использовать данный метод для получения качественных сварных соединений и в дальнейшем его совершенствовать</p>	<p>Высокая стоимость установки. Следовательно, целесообразно ее применять на промышленных предприятиях.</p>
<p><i>Угрозы:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Развитие конкуренции в связи с разработкой новых технологий сварочного процесса 	<p>Появление или улучшение других видов сварки, что приведет к бессмысленности дальнейшего исследования</p>	<p>Появление новых технологий и по более низкой цене снизит заинтересованность потребителей в данном исследовании.</p>

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам деятельности приведен в таблицах 10 и 11.

Таблица 11 – Состав рабочей группы

№ п/п	Ф.И.О, место работы, должность	Роль в проекте	Основные обязанности
1	Гордиенко А. И., ИФПМ СО РАН н.с., к.т.н.	Руководитель проекта	Координация деятельности исполнителя; проверка и анализ результатов проекта
2	Панюхина А.Д., ТПУ ИШНПТ ОМ, инженер	Исполнитель проекта	Выполнение проекта

Таблица 12 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор направления и темы исследований	1	Выбор направления исследований	Научный руководитель, инженер
	2	Выбор темы исследования	Научный руководитель, инженер
	3	Изучение литературы по заданной тематике исследования	Инженер
Проведение НТИ			
Разработка технического задания	4	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, инженер
	5	Календарное планирование работ	Научный руководитель
Проведение исследования	6	Подготовка образцов к исследованию	Инженер
	7	Проведение испытаний на ударную вязкость образцов после сварки	Инженер
	8	Исследование микроструктуры низкоуглеродистой стали 10Г2ФБЮ после сварки	Инженер
	9	Измерение микротвердости сварного шва	Инженер
	10	Проведение испытаний на статическое растяжение	Инженер
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка и анализ полученных результатов	Научный руководитель, инженер
	12	Обобщение и формулировка выводов о проведенном научном исследовании	Научный руководитель, инженер
Оформление отчета по работе	13	Составление отчетной документации исследования	Инженер
	14	Сдача проекта	Инженер

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

Для расчета стоимости исследуемого проекта необходимо определить трудоемкость осуществляемых работ, которая находится по формуле:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5}, \quad (1)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{\Psi_i}, \quad (2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

Ψ_i – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Следующая формула позволяет перевести рабочие дни в календарные:

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4)$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{вых}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

В таблице 13 представлены результаты трудоемкости работ руководителя (Р) и инженера (И), а также длительность в рабочих и календарных днях.

Таблица 13 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{Ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Выбор направления исследований	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1,3	1,3
Выбор темы исследования	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1,3	1,3
Изучение литературы по заданной тематике	-	20	-	40	-	28	-	28	-	41
Составление и утверждение технического задания	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1,3	1,3
Календарное планирование работ	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2	-
Подготовка образцов	-	20	-	30	-	24	-	24	-	36
Проведение испытаний на ударную вязкость	-	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	2,7
Исследование микроструктуры	-	4	-	10	-	6,4	-	6,4	-	9,5
Измерение микротвердости	-	3	-	7	-	4,6	-	4,6	-	6,8
Проведение испытаний на статическое растяжение	-	3	-	5	-	3,8	-	3,8	-	5,6
Анализ результатов	14	14	20	20	16,4	16,4	8,2	8,2	12,1	12,1
Формулировка выводов	4	4	8	8	5,6	5,6	2,8	2,8	4,1	4,1
Составление отчета	-	10	-	15	-	12	-	12	-	17,8
Сдача проекта	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2,1
Итого									144	

Диаграмма Ганта (таблица 14) представляет собой наглядный план-график всех выполненных работ в данном исследовании.

Таблица 14 разбита на столбцы месяц-декада в течение которых выполнена работа. Ячейками разного вида показано время, которое затрачено на

определенный пункт работы и исполнитель. В графике учитываются выходные и праздничные дни.

Таблица 14 – Диаграмма Ганта

№	Вид работы	Исполнители	Т _k	Январь		Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2			
1	Выбор направления исследований	Гордиенко А.И.	1,3																
		Панюхи на А.Д.																	
2	Выбор темы исследования	Гордиенко А.И.	1,3																
		Панюхи на А.Д.																	
3	Изучение литературы по заданной тематике	Панюхи на А.Д.	41																
4	Составление и утверждение технического задания	Гордиенко А.И.	1,3																
		Панюхи на А.Д.																	
5	Календарное планирование работ	Гордиенко А.И.	2																
6	Подготовка образцов	Панюхи на А.Д.	36																
7	Проведение испытаний на ударную вязкость	Панюхи на А.Д.	2,7																
8	Исследование микроструктуры	Панюхи на А.Д.	9,5																
9	Измерение микротвердости	Панюхи на А.Д.	6,8																

- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.3.1 Расчет материальных затрат НИИ

Показывает количество потраченных денежных средств на материалы и оборудование, используемое для исследования.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{расхи} \quad (5)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхи}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

Π_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 16 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z _м), руб.
Низкоуглеродистая промышленная сталь X80	кг	0,01	79000	908,5
Шлифовальная бумага	шт.	3 (P80)	24,7	74,1
		4 (P600)	29,45	117,8
		4 (P1000)	36,1	144,4
		3 (P2500)	36,1	108,3
Полировальное сукно	шт.	2	80	160
Алмазная паста	кг	0,1	3055	305,5
Спирт	л	0,5	170	98
Кислоты для травления	мл	300	0,053	15,9
Медицинские перчатки	шт.	2	24	48
Халат	шт.	1	600	600
Итого				2580,5

4.3.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Для проведения научно-исследовательской работы требуются следующие виды оборудования: оптический микроскоп марки *Zeiss Axiovert 25*, сканирующий электронный микроскоп *Quanta 200 3D* с приставкой *NORDLYS Oxford Instruments HCL Technology* для анализа дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), установка типа Поляни, маятниковый копер *INSTRON MPX 450*, микротвердомер *ПМТ-3М*, компьютер и принтер. Оборудование есть в лаборатории ФМ и НМК.

Таблица 17 - Расчет затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Срок эксплуатации, лет	Срок использования в НИИ, кал.дни	Цена единицы оборудования, руб.	Амортизация, руб.
1	Оптический микроскоп марки <i>Zeiss Axiovert 25</i>	1	10	6	800 000	1333
2	Установка типа Поляни	1	10	3	264 000	220
3	Маятниковый копер <i>INSTRON MPX 450</i>	1	10	1	650 000	162,5
4	Микротвердомер <i>ПМТ- 3М</i>	1	10	7	358 000	686
Итого					2 072 000	2 401.5

Стоимость оборудования, имеющегося в научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (6)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_{\text{AI}}}{12} \cdot m, \quad (7)$$

где H – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Рассчитаем амортизацию для оптического микроскопа марки Zeiss Axiovert 25, с учётом, что срок полезного использования 10 лет:

$$H_{\text{A}} = \frac{1}{10} = 0,1 \quad (8)$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

Оптический микроскоп марки Zeiss Axiovert 25:

$$A = \frac{H_{\text{AI}}}{12} \cdot m = \frac{0,1 \cdot 800000}{12} \cdot 0,2 = 1333 \text{ руб} \quad (9)$$

Установка типа Поляни:

$$A = \frac{H_{\text{AI}}}{12} \cdot m = \frac{0,1 \cdot 264000}{12} \cdot 0,1 = 2200 \text{ руб} \quad (10)$$

Маятниковый копер INSTRON MPX 450:

$$A = \frac{H_{\text{AI}}}{12} \cdot m = \frac{0,1 \cdot 650000}{12} \cdot 0,03 = 162,5 \text{ руб} \quad (11)$$

Микротвердомер ПМТ- 3М:

$$A = \frac{H_{\text{AI}}}{12} \cdot m = \frac{0,1 \cdot 358000}{12} \cdot 0,23 = 686 \text{ руб} \quad (12)$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 1333 + 2200 + 162,5 + 686 = 4381,5 \text{ руб.}$$

4.3.3 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей

темы

Таблица 18 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоёмкость, чел.-дн.	Зарботная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
1	1, 2, 4, 5, 11, 12	Руководитель (научный сотрудник)	22	1487,9	32 733.8
2	1-14	Инженер	142	654,6	92 953.2
Итого:					125 687

Зарботная плата исследователей состоит из основной ($Z_{\text{осн}}$) и дополнительной ($Z_{\text{доп}}$) и рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (13)$$

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (14)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

Дополнительная заработная плата исполнителей составила 18 853.05 руб.

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (15)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

$k_{\text{внеб}}$ на 2021 год составляет 30,2%

Таблица 19 - Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды, руб.
Руководитель проекта	32 733.8	4 910.07	11 368.45
Инженер	92 953.2	13 942.98	32 282.65
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды			0,302
Итого:			43 651.1

4.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}} \quad (16)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = (2580,5+2\,401.5+125\,687+18\,853.05+43\,651.1) \cdot 0,16 = 178614,1 \cdot 0,16 = 30\,907,7 \text{ руб.} \quad (17)$$

Таблица 20 – Расчет затрат НИР

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИР	2 580.5
2. Затраты на амортизацию оборудования	2 401.5
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	125 687
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	18 853.05
5. Отчисления во внебюджетные фонды	43 651.1
6. Накладные расходы	30 907.7
Бюджет НИР:	224 080,85

4.3.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} , \quad (18)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Таблица 21 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Лазерная сварка	Плазменная сварка	Газовая сварка
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,3	5	4	2
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	4	5	3
3. Энергосбережение	0,2	4	3	3
4. Надежность	0,2	4	4	3
5. Автоматизация	0,15	5	5	1
ИТОГО	1	4,45	4,2	2,4

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{\text{исп}i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p-\text{исп}i}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}} \quad (19)$$

Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (20)$$

Таблица 22 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,98	0,94
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,45	4,1	2,4
3	Интегральный показатель эффективности	0,225	0,239	0,392
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,06	1,74

Список публикаций студента

1. Гордиенко А.И., Оришич А.М., Маликов А.Г., Волочаев М.Н., Панюхина А.Д. Особенности формирования микроструктур в зонах термического влияния лазерных сварных швов низкоуглеродистой стали с разным исходным структурным состоянием // Сборник тезисов докладов Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии». 2021 (Направлено в печать).

2. A.I. Gordienko, Malikov A.G., Volochaev M.N., Panyukhina A.D. Influence of the chemical composition and structural-phase state of low-carbon steels on the formation of the structure and properties of laser welded joints // Materials Science & Engineering A (Готовится к отправке).