

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Аэрокосмический институт

Кафедра материаловедения и технологии материалов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Направление подготовки (специальность) 15.04.01 Машиностроение

**Влияние технологических особенностей лазерной сварки на
структуру и свойства неразъемных соединений из коррозионностойких
сталей и сплавов**

Пояснительная записка

ОГУ 15.04.01.1220.627 ПЗ

Заведующий кафедрой
канд. техн. наук, доцент

В.И. Юршев

Руководитель
д.т.н., профессор

С.Е. Крылова

Студент

В.А.Завьялов

Оренбург 2020

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена изучению влияния технологических особенностей лазерной сварки на структуру и свойства неразъемных соединений из коррозионноустойчивых сталей и сплавов.

В работе анализируется информация о целесообразности замены стандартных методов сварки на непрерывную, твердотельным лазером; рассмотрены преимущества использования лазерной сварки и влияние термической обработки на структуру и свойства сварных соединений.

В исследовательской части проводилось сравнение структур после различных методов сварки, изучено влияние термической обработки на строение и свойства сварного шва.

В технологической части описана разработка дополнительного оборудования для проведения лазерной сварки на промышленном лазерном комплексе.

В специальном разделе рассматривается метод неразрушающего контроля, основанный на эффекте магнитной анизотропии. Дается обоснование выбора метода контроля сварных соединений, с помощью сканера механических повреждений «Stressvision».

В заключении сформулированы выводы и даны рекомендации к внедрению в производство рациональных режимов сварки тонкостенных пространственных конструкций. Работа представляет научно-практический интерес для инженерно-технических работников и рабочих сварочных участков с точки зрения изготовления тонкостенных деталей из коррозионноустойчивых сталей и сплавов.

Работа содержит 90 листов текста, 56 рисунков, 15 таблиц, 28 литературных источника. Графическая часть выполнена на 6 листах формата А1.

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>									
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	Влияние технологических особенностей лазерной сварки на структуру и свойства неразъемных соединений из коррозионноустойчивых сталей и сплавов			<i>Лит.</i>			<i>Лист</i>		<i>Листов</i>	
<i>Разраб.</i>		<i>Завьялов В.А.</i>						<i>В</i>	<i>К</i>	<i>Р</i>	4		90	
<i>Провер.</i>		<i>Крылова С.Е.</i>						АКИ 18Маш(м)ПИ						
<i>Н. контр.</i>		<i>Тавтилов И.Ш</i>												
<i>Утверд.</i>		<i>Юршев В.И.</i>												

Annotation

This graduation qualification is devoted to studying the effect of laser welding process features on the structure and properties of permanent joints made of corrosion resistant steels and joints.

The work analyzes the feasibility of replacing standard welding methods with a continuous, solid-state laser; Advantages of using laser welding and influence of thermal treatment on structure and properties of welded joints are considered.

The research part compared structures after different welding methods, studied the effect of thermal treatment on the structure and properties of the weld.

The technological part describes development of additional equipment for laser welding at industrial equipment.

A special section discusses the method of nondestructive testing based on the effect of magnetic anisotropy. The selection of the method of inspection of welded joints by means of the «Stressvision» mechanical damage scanner is adjusted.

Conclusions and recommendations for the introduction of rational welding modes of thin-walled spatial structures are formulated in the conclusion. The work is of scientific and practical interest for engineers and working welding sections from the point of view of manufacturing parts from corrosion-resistant steels and alloys.

The work contains 90 sheets of text, 56 figures, 15 tables, 28 light sources. Graphic part is made on 6 sheets of A1 format.

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						5
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Содержание

Введение.....	8
1 Лазерная сварка в современном промышленном производстве	9
1.1 Способы сварки низкоуглеродистых коррозионностойких сталей	12
1.2 Технологические особенности процесса лазерной сварки.....	14
1.3 Закономерности формирования структуры и свойств неразъёмных соединений, полученных лазерной сваркой	20
1.4 Свойства и классификация коррозионностойких жаропрочных сплавов	20
1.5 Влияние легирующих элементов на структуру и свойства коррозионностойких жаропрочных сплавов.....	22
1.6 Виды и способы упрочнения коррозионностойких сплавов.....	25
1.7 Влияние термической обработки на качество сварных соединений	28
1.8 Технологическая прочность и концентрация напряжений в сварных соединениях.....	30
1.9 Области применения	38
1.10 Постановка задачи исследования.....	41
2 Выбор материала, оборудования и методик для проведения исследования	42
2.1 Химический состав и механические свойства сплава ХН50ВМКТЮР..	42
2.2 Оборудование для выполнения лазерной сварки	44
2.3 Проектирование установки для роботизированной лазерной сварки....	46
2.3.1 Создание экспериментальной стационарной сварочной установки..	46
2.3.2 Проектирование и изготовление необходимого оснащения	47
2.3.3 Изготовление оснащения.....	48
2.3.4 Сборка подвижного сварочного приспособления на робот ABB robotics...	49
2.4 Подготовка поверхности металла и оборудования к процессу лазерной сварки	50
2.5 Отработка технологических параметров лазерной сварки	51
2.6 Отработка режимов лазерной сварки стыковых соединений на примере материала 12Х18Н10Т.....	52
2.7 Апробация разработанных режимов лазерной сварки на материале ХН50ВМКТЮР	55
2.8 Магнитоанизатропный метод определения механических напряжений с помощью прибора «Stress Vision»	56
3 Металлографические исследования коррозионностойких сталей и сплавов на различных этапах формирования сварного соединения.....	61
3.1 Оптическая металлография сварного соединения, полученного различными способами сварки.....	61
3.2 Структура образцов, полученных при апробации разработанных режимов лазерной сварки на материале ХН50ВМКТЮР	66
3.3 Результаты металлографических исследований лазерных сварных соединений жаропрочных сплавов.	68

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

4 Механическое поведение сварных соединений, полученных лазерной сваркой	71
4.1 Анализ механических свойств на различных этапах процесса лазерной сварки	71
4.2 Визуализация распределения остаточных напряжений в сварном шве и различных зонах термического влияния	72
4.3 Термическая обработка сварных соединений выполненных лазерной сваркой	75
4.3.1 Отжиг 2-го рода жаропрочных сплавов.....	76
4.3.2 Закалка жаропрочных сплавов.....	76
4.3.3 Старение жаропрочных сплавов.....	77
4.4 Сравнительный анализ напряженного состояния тонкостенной сварной конструкции.....	78
Заключение	81
Списка использованных источников	82
Приложение А (обязательное) Комплект графических документов	84

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						7
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Введение

В настоящее время лазерные технологии в современном производстве закономерно пользуются большим спросом, как у крупных производителей, так и в малых фирмах, поскольку они обеспечивают целый ряд преимуществ, непосредственно влияющих на потребительские характеристики продукции: позволяют повысить качество, производительность, снизить себестоимость, обеспечить экологическую чистоту производства.

С появлением мощных оптоволоконных лазеров возникли новые возможности использования лазерных технологий в машиностроении. За счет целого ряда факторов лазерная сварка эффективно применяется в области производства деталей авиационной промышленности, позволяя создавать компоненты нового поколения, а также эффективно заменять традиционные методы сварки, обеспечивая ряд технологических преимуществ процесса: характерные скорости сварки могут достигать до 2000 м/час; зона термического влияния ограничена площадью лазерного пятна, что обеспечивает высокую технологическую прочность и пластичность сварных соединений, минимальные деформации и остаточные напряжения; широкий спектр свариваемый материалов: от высоколегированных высокоуглеродистых марок стали до сплавов меди и титана, керамики и стекла; возможность сварки разнородных материалов; хорошая управляемость и гибкость процесса; перемещение луча по поверхности детали любой траектории; возможность полной автоматизации.

Развитие современной робототехники в совокупности с лазерной технологией сварки позволило минимизировать влияние «человеческого фактора» при выполнении операций сварки, расширить спектр модифицируемых и контролируемых в процессе работы параметров (вид и длину сварного шва, расположение шва в пространстве, определение последовательности выполнения операций, время подачи защитного газа до начала и после окончания сварки, данные для автоматического высвобождения проволоки при приварке, скорость подачи и оттягивания проволоки, геометрию шва) [1].

Таким образом, появилась возможность перевести сварку крупногабаритных тонкостенных конструкций на новый уровень качества. Учитывая, что перспективные летательные аппараты должны обладать скоростью от ~ 6000 км/ч, а условия работы на таких скоростных режимах связаны с жесткими требованиями к аэродинамике, высокой рабочей температурой (от 700 °С) и вибрационными нагрузками, отработка режимов роботизированной лазерной сварки пространственных сварных соединений тонкостенных изделий из жаропрочных сталей становится все более востребованной и актуальной, требующей применения новых конструктивно-технологических решений и материалов.

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

1 Лазерная сварка в современном промышленном производстве

Во многих отраслях производства лазерная сварка является весьма распространенным способом соединения широкого ряда компонентов. Производители деталей для конструкций воздушных судов, автомобилей и медицинского оборудования без замедлений признали преимущества и уникальные возможности лазерной сварки. Данная технология, несомненно, привлекательна для рыночной экономики России, стремительно развивающейся независимо от экономической ситуации в мире.

При применении в российской аэрокосмической промышленности технология лазерной сварки позволит значительно сократить массу конструкции воздушного судна и расход материала, что поспособствует увеличению эффективности использования топлива. Показатели производительности лазерной сварки помогут российской автомобильной промышленности в её стремлении стать крупнейшим автомобильным рынком в Европе, а российским производителям – приобрести конкурентоспособность на мировом рынке (Рисунок 1.1).

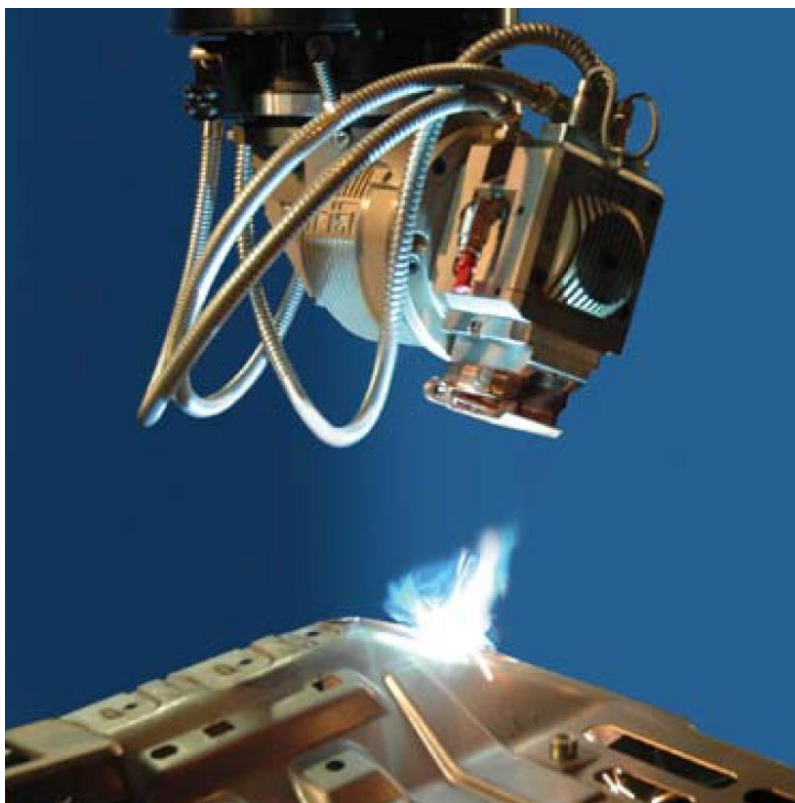


Рисунок 1.1 – Процесс лазерной сварки конструкции воздушного судна

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

Инновационные способы обработки лазерной сварки, в свою очередь, могут сыграть важную роль в российской стратегии долгосрочного развития медицинской промышленности. К данным способам можно отнести сварку механических деталей, требующих прецизионной обработки, таких, как имплантаты и хирургические инструменты, предназначенные для соответствия строгим механическим характеристикам, требованиям герметизации и высокому уровню процесса одобрения.

Промышленная лазерная технология способна взять на себя роль инструмента развития российского производства воздушных судов, автомобилей и медицинского оборудования нового поколения, а также множества других электрических и механических компонентов, требующих высокой точности обработки. В данной работе представлены возможности лазерной сварки, способной заменить другие производственные процессы в целях снижения расходов и повышения качества как уже существующих, так и новых конструкций соответствующих компонентов

Технология лазерной сварки доказала свое соответствие жёстким требованиям аэрокосмической промышленности в области качества и стабильности, и предстала в качестве привлекательной альтернативы для таких более традиционных способов сварки, как пайка, точечная контактная сварка, газвольфрамовая и электронно-лучевая сварка. Благодаря судам коммерческой авиации нового поколения, сконструированными российскими производителями, главными требованиями клиентов стали менее шумные, топливосберегающие суда, не оказывающие отрицательного воздействия на окружающую среду. Изготовители воздушных судов также обеспокоены влиянием их производственных процессов на окружающую среду, и хотят снизить его посредством применения технологий с минимальной затратой энергии и максимально эффективными материалами.

Одним из способов достижения данных задач и создания более экономичных судов является использование материалов, снижающих массу воздушного судна. Титановые сплавы и композитные материалы - данные два типа продуктов чаще всего встречаются в корпусе самолетов. Главная цель при использовании данных материалов – внедрение технологий лазерной обработки в новые области, выходящие за пределы их основного применения в сфере производства двигателей воздушных судов. Исходя из представленного примера, можно понять, что данный способ способен привести к созданию новых конструкций, при производстве которых сварка ранее не применялась.

Коэффициент использования материала представляет собой соотношение массы материала, приобретенного для изготовления компонента, и массы обработанного компонента, представляющего собой деталь самолета. Снижение данного коэффициента также является одним из способов уменьшения производственных расходов, связанных с закупкой и обработкой материала. Наряду с этим такое снижение увеличивает общую производительность производственных операций. Следующий пример доказывает возможность раз-

работки новых конструкций, снижающих коэффициент использования материала, посредством лазерной сварки. Например, производство детали только при соответствующей обработке блока из титанового сплава Ti-6Al-4V, размером 130×100×60 мм и массой 3,48 кг. По окончании обработки масса готовой детали будет составлять 0,21 кг, а коэффициент использования материала 16,5 к 1.

При альтернативной обработке с использованием лазерной сварки применяются две пластины размером 130×100×10 мм (масса: 0,57 кг) и 50×6×130 мм (масса: 0,17 кг) с общей массой 0,74 кг. Соответствующий коэффициент использования материала при лазерной сварке равен 3,5 к 1, что означает снижение количества материалов для изготовления детали практически на 80 %. (рисунок 1.2)



Рисунок 1.2 – Пример таврового шва полученного лазерной сваркой

На рисунке 1.2 показан шов от лазерной сварки Т-образного контура, лазерный луч двигался по поверхности горизонтальной пластины в направлении от границы соприкосновения. Широко известно, что лазерная сварка используется для получения сравнительно узких сварных швов, что является одним из преимуществ данного процесса. В данном случае при сварке верхняя (горизонтальная) пластина полностью проникает в нижнюю (вертикальную) пластину, благодаря чему граница соприкосновения полностью соединяется. При необходимости относительно широкого сварного шва следует отдать предпочтение углекислотному лазеру. Такая технология является проверенной на предмет характеристик луча, высокой мощности и благоприятного взаимодействия с материалом. Сварка углекислотным лазером обеспечивает не только герметичный шов, но и эффективную и рентабельную обработку с соответствующими скоростями. Испытания механических свойств

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

сварного соединения выполненного лазерной сваркой представленной на рисунке 1.3.

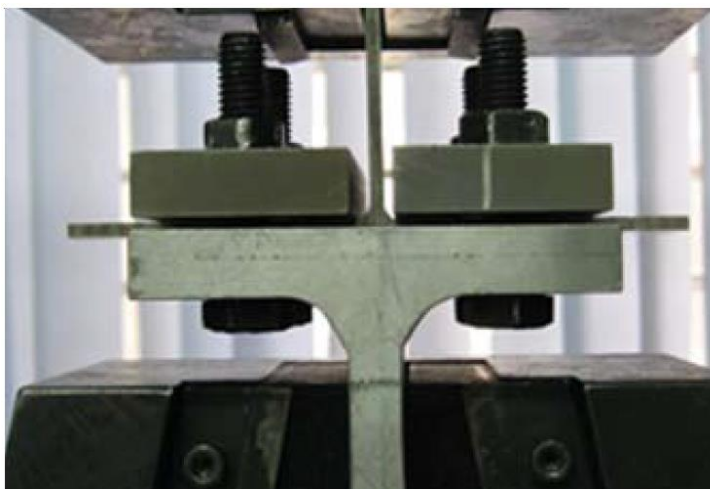


Рисунок 1.3 – Испытания механических свойств сварного соединения

Поскольку выполняется сварка титанового сплава, в систему подачи лазерного излучения входят компоненты, обеспечивающие подачу защитного инертного газа (смесь аргона и гелия) во время расплавления металла и его охлаждения до температуры ниже 400 °С (данные компоненты также применимы при газовольфрамовой сварке титановых сплавов).

1.1 Способы сварки низкоуглеродистых коррозионностойких сталей

При монтажных, ремонтных работах часто нужна сварка низкоуглеродистых коррозионностойких сталей и сплавов. Использование стойких к коррозии легированных стальных сплавов давно приобрело массовый характер.

Сварка покрытыми электродами.

Ручная дуговая сварка (ММА – Manual Metal Arc) чаще всего используют для нержавеющей стали, если к соединениям не предъявляют особых требований. При выборе электродов руководствуются ГОСТ 10052-75. В стандарте указано, чем варят нержавеющую сталь, легированную хромом, никелем, железом, тугоплавкими металлами.

Электроды делятся на две группы. Стержни с основным видом обмазки, в состав которой входят карбонаты кальция, магния, ими варят легированный металл на обратной полярности. Рутитовая обмазка содержит оксид титана, такие стержни применяют при токе любой полярности. Они меньше разбрызгиваются, реже залипают.

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

Полуавтоматическая сварка.

Качественно заварить нержавеющей сталь, используя присадочную проволоку, поможет технология MIG (Metal Inert Gas) с подачей защитного газа в область расплава. Полуавтоматическая сварка обеспечивает равномерную подачу присадки в рабочую зону. Проволока выбирается под марку сплава – основной легирующий компонент.

Полуавтоматом проводят сварку детали:

- до 4 мм. (короткой дугой);
- толще 4 мм, используя метод струйного переноса.
- импульсная сварка с минимальным разбрызгиванием ванны расплава

применима для нержавеющей стали любой толщины.

Ручная сварка неплавящимися электродами в среде защитного газа.

Технология TIG (Tungsten Inert Gas) применяется в основном для работы с тонкой нержавеющей сталью, предусматривает использование вольфрамовых тугоплавких электродов. Подачу аргона начинают до розжига дуги, заканчивают через 20 секунд после угасания.

На производстве используют другие методы соединения легированных деталей. Для соединения заготовок на промышленном оборудовании не применяется присадочный материал, нержавеющей сплав расплавляется ограниченно, на большую глубину.

Диффузионная сварка.

Технология основана на способности сплавов преобразовывать кинетическую энергию в тепловую. При сдавливании внутренняя структура стали изменяется с выделением энергии, нержавеющей сталь становится пластичной. Один слой вдавливается в другой с образованием диффузного слоя. Сварка нержавеющей стали производится односторонним или двухсторонним давлением. На прессы устанавливают специальные штампы. Получаются очень аккуратные точечные или линейные соединения без окалины, трещин, внутренних напряжений в рабочей зоне.

Контактная сварка.

Ток подается на два неплавящихся электрода из цветных сплавов, на основе Cu, заготовки помещаются между ними. При подаче тока электроды с усилием сжимают. Варят нержавеющей сталь только в зоне контакта, ток проходит детали насквозь, переводя свариваемый металл в пластическое состояние. Ручные сварочные клещи используют для сварки тонкой нержавеющей до 2 мм. Заготовки потоньше соединяют аппаратами с усилителями, чтобы можно было продавить зону контакта. Образуется точка размером с площадь электрода.

Лазерная сварка.

Для нержавеющей стали применяют технику точечного и шовного метода лазерной сварки. Приварить детали можно только встык. При соединении заготовок внахлест в рабочей зоне создаются остаточные напряжения. Ванна расплава ограничена за счет молниеносного воздействия луча. Нержа-

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

веющая сталь разогревается мгновенно, шов образуется прочным, мелкозернистым. Расплав полностью заполняет стык.

Плазменная сварка.

Принцип основан на ионизации газа под действием дуги в специальной камере – плазмотроне. Электрическое поле создается с использованием тугоплавкого вольфрамового электрода. Направленный поток плазмы быстро расплавляет заготовки в месте соединения до высокой температуры.

Ручным плазмотроном сваривают тонкие заготовки до 3 мм, автоматическим – толщиной до 160 мм. Кромки предварительно разделяют, но проваривается шов сразу, за одну проходку.

Завершающий этап.

Качество соединения проверяют до зачистки нержавеющей стали после сварки. Если нет трещин, приступают к удалению окалины, сажи.

Самостоятельный монтаж или ремонт металлоизделий из нержавеющей стали требует определенной квалификации от сварщика. Важно учитывать особенности сплава, правильно выбрать электроды, параметры тока. Особенно аккуратно нужно обращаться с тонкостенными деталями. Они быстро разогреваются, деформируются.

1.2 Технологические особенности процесса лазерной сварки

Скорость перемещения и энергетические режимы сварочного процесса зависят от ширины сварного шва, а также от вида и толщины свариваемых материалов. Например, стальные листы толщиной 20 мм. свариваются газовым лазером со скоростью несколько сот метров в час. Этот показатель на порядок выше предельных характеристик электродуговой сварки.

Лазерная технология особенно эффективна при работе с легированными сталями, чугуном, титаном, медью, медными сплавами, термопластами, стеклом и керамикой. Высокая плотность энергии в пятне нагрева разрушает поверхностные окисные пленки, препятствуя образованию новых окислов.

Особенностью сварки лазером тонкостенных металлов является очень высокая плотность энергии в сварочной ванне объемом в доли кубического миллиметра. Поэтому сваривание листовых материалов толщиной от 0,05 до 1,0 мм ведется с расфокусировкой лазерного луча. Такой режим снижает КПД сварочного процесса, но при этом исключает сквозное прожигание заготовки.

Лазерная сварка относится к одному из способов соединения плавлением, но, по сравнению с другими родственными процессами сварки (аргодуговая, контактная и т.д.), отличается концентрированной и строго дозированной энергией. Подведенная энергия лазера разогревает область материала и при достаточно высокой интенсивности приводит к расплавлению металла в

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

зоне воздействия лазерного луча. При поступательном движении луча образуется валик сварного шва. Основной характеристикой этого процесса является интенсивность или мощность лазерного излучения.

Среди методов сварки металлов лазерная сварка занимает особое место, отличаясь спецификой воздействия на материал источника нагрева и возможностью изменения плотности мощности вводимой энергии в широких пределах (от 10^3 до 10^7 Вт/см²). В связи с этим она имеет как существенные преимущества перед традиционными методами, так и определенные недостатки.

Из всего многообразия методов сварки плавлением наиболее целесообразно проводить сравнение лазерной сварки с дуговой неплавящимся электродом, электронно-лучевой и контактной. Эти методы наиболее эффективно могут быть заменены лазерной сваркой без принципиального изменения конструкции детали.

Преимущества лазерной сварки перед дуговой в основном заключаются в следующем:

1 За счет высокой концентрации энергии и малой площади пятна нагрева объем сварочной ванны при лазерной сварке в несколько раз меньше. Этот фактор положительно сказывается на ряде характеристик как сварного шва, так и изделия в целом. В первую очередь, уменьшение ширины шва в 5 раз позволяет расширить ассортимент деталей, у которых ограничены размеры на расположение шва как по тепловому воздействию, так и по компактности.

Помимо этого, уменьшение объема расплава и получение швов с большим отношением глубины проплавления к ширине шва (примерно на порядок по сравнению с дуговой сваркой) дает возможность снизить деформации деталей до 10 раз. Это в свою очередь приводит как к значительной экономии металла (за счет уменьшения допусков), так и к повышению производительности (в результате экономии времени на правку после сварки). Кроме того, появляется возможность экономно использовать станочное оборудование, исключив механическую обработку после сварки.

Малый объем расплавленного металла, и специфическая форма шва также улучшают условия кристаллизации, что повышает технологическую прочность и механические свойства сварных соединений.

2 Отсутствие электрода, близко расположенного к поверхности сварочной ванны, исключает попадание в нее инородных материалов, что практически во всех случаях имеет место при дуговой сварке.

3 Острая фокусировка луча и возможность передачи его на значительные расстояния позволяют осуществлять сварку в труднодоступных местах, например, в углублениях гофрированных конструкций, внутренних полостей и т.д.

4 Жесткий термический цикл с высокими скоростями нагрева и охлаждения дает возможность при лазерной сварке по сравнению с дуговой су-

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		15

щественно уменьшить зону термического влияния. Это позволяет снизить эффект фазовых и структурных превращений в околошовной зоне, приводящих к разупрочнению материала, трещинообразованию, снижению коррозионной стойкости и т. д.

5 Большие скорости сварки (до 11 м/мин) обеспечивают высокую производительность процесса, в десятки раз превышающую производительность дуговой сварки.

6 Использование передачи энергии по световоду при сварке твердотельными Nd:YAG-лазерами позволяет роботизировать процесс и проводить его в различных пространственных положениях.

В совокупности все эти преимущества в отдельных случаях, например, при массовом изготовлении кузовов автомобилей, делают лазерную сварку экономически более выгодной, чем дуговую, несмотря на высокую стоимость нового оборудования.

Сравнение лазерной и электронно-лучевой сварки показывает, что во многом эти два метода взаимозаменяемы. Однако существует несколько особенностей, которые выгодно отличают лазерную сварку и дают ей определенные преимущества:

1 Для осуществления процесса лазерной сварки не требуется обязательное наличие вакуумных камер или камер с контролируемой атмосферой. Это позволяет значительно расширить технологические возможности при использовании лазерного луча, так как снимаются ограничения на размеры свариваемых деталей. Кроме того, за счет сокращения времени на откачку воздуха из камеры, упрощение установки стыка под луч, переналадки и других факторов производительность процесса увеличивается. Отсутствие вакуумных камер при производстве крупногабаритных изделий также снижает стоимость технологического.

2 Существенные трудности возникают при сварке электронным лучом широко распространённых сталей перлитного и мартенситного класса, толщиной более 30 мм из-за отклонения электронного луча от стыка соединяемых деталей. Основной причиной этого дефекта является остаточная намагниченность ферромагнитных сталей, которую они преобразуют в процессе обработки, изготовления детали, хранения или транспортировки. Сварка электронным лучом в магнитном поле приводит к отклонению его от стыка. Использование для подобных целей лазерного луча полностью исключает образование указанного дефекта, так как поток фотонов с магнитным полем не взаимодействует.

3 Процесс электронно-лучевой сварки практически не может быть роботизирован и использован для сварки объемных деталей в различных пространственных положениях.

Необходимо отметить некоторые преимущества лазерной точечной сварки перед контактной:

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		16

1 Размер сварной точки при лазерной сварке существенно меньше, чем при контактной, что дает возможность соединять миниатюрные детали.

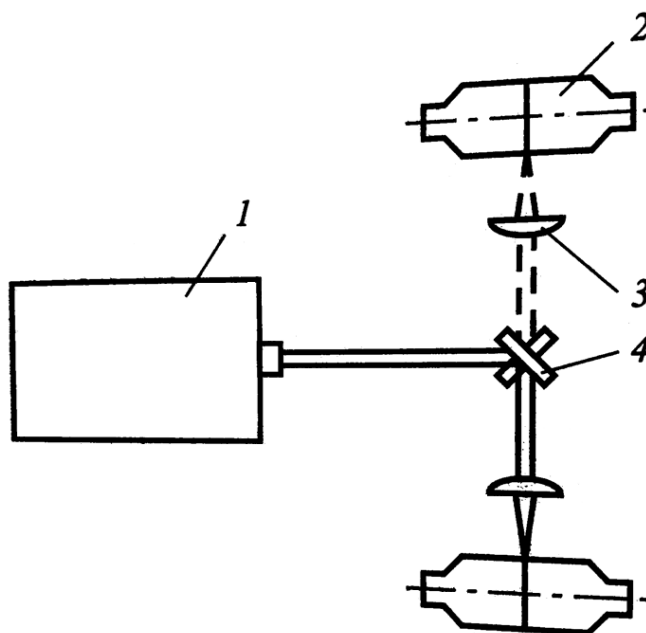
2 Механическое давление при получении сварной точки отсутствует, что позволяет соединять хрупкие и легкодеформируемые детали, а также осуществлять сварку на весу, значительно упрощая оснастку и технологию проведения процесса.

3 Время получения одной точки при лазерной сварке составляет от 10^{-2} до 10^{-3} с. тогда как при контактной оно равно от 0,5 до 1 с, т.е. производительность лазерного луча в сотни раз выше.

4 Сварку можно проводить не только в труднодоступных местах, но и через прозрачные среды в замкнутых объемах, что контактной сваркой осуществить принципиально невозможно.

5 Использование материалов с резко отличающимися физическими свойствами и в первую очередь с различным электрическим сопротивлением.

Помимо этого, следует отметить ряд преимуществ, принципиально отличающих лазерную сварку от других методов сварки плавлением. Среди этих преимуществ основным является возможность применения лазерного луча, генерируемого из одного источника, на несколько рабочих мест в результате его отключения и расщепления. Пример использования непрерывно генерируемого луча на двух рабочих местах показан на рисунке 1.4.



1 – лазер; 2 – рабочее место; 3 – фокусирующая оптика; 4 – поворотное отклоняющее зеркало

Рисунок 1.4 – Схема использования газового лазера для сварки на двух рабочих местах

В то время как на одном рабочем месте осуществляется сборка, на другом – проводится сварка. По окончании процесса сварки отклоняющее зеркало переводит луч на второе рабочее место, где производится сварка, в то время как на первом снимается готовая деталь и устанавливается новая. Применение твердотельных Nd:YAG-лазеров, позволяет осуществлять разветвление излучения вплоть до четырех рабочих мест (рисунок 1.5), на которых могут одновременно выполняться принципиально различные технологические операции. Таким образом, коэффициент использования оборудования и производительность процесса повышаются. Кроме того, лазерная сварка эффективна для соединения разнородных материалов, склонных к образованию интерметаллидных соединений, и композиционных материалов на металлической основе. Тонкое регулирование режимов сварки в широком диапазоне позволяет контролировать время контакта жидких фаз в процессе их взаимодействия.

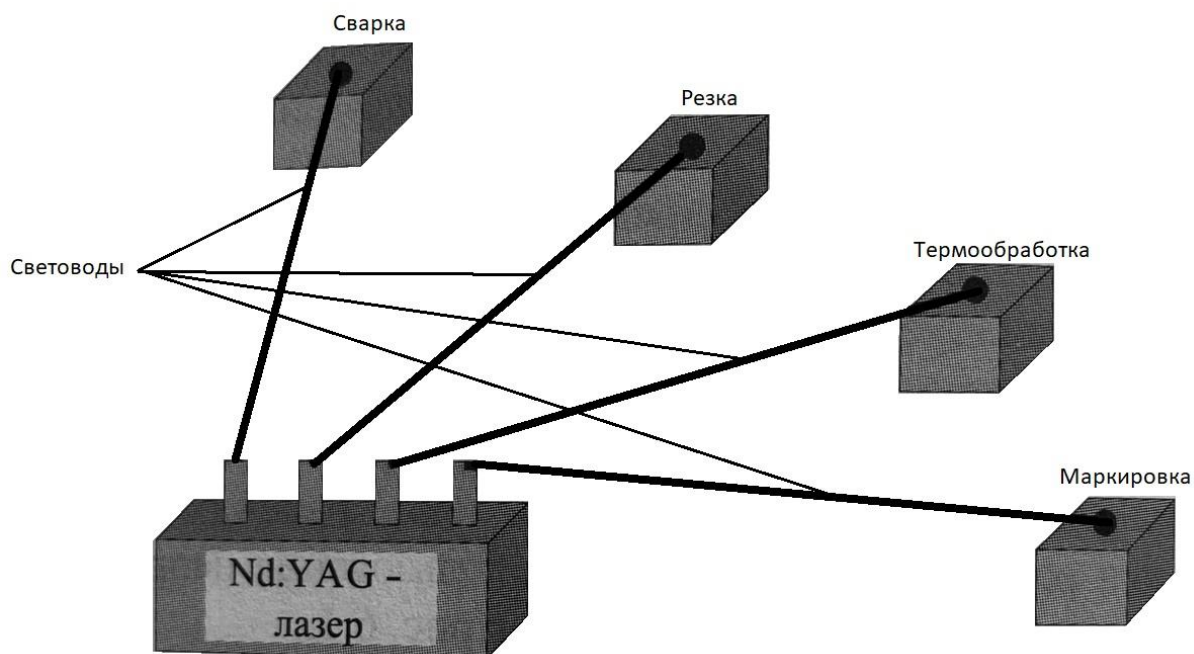


Рисунок 1.5 – Применение твердотельного лазера для обработки материалов разными методами на нескольких рабочих местах

Следует также учитывать и социальные преимущества, связанные с технологией в целом, а именно: повышение эффективности и культуры производства; уменьшение затрат ручного труда; престижность новой профессии; экологичность внедрения лазерной технологии. Применение такой технологии снижает уровень производственного травматизма и профзаболеваний.

Наряду с рассмотренными преимуществами лазерная сварка имеет некоторые особенности, затрудняющие ее универсальное применение по сравнению с существующими традиционными методами.

1 Прежде всего это высокая стоимость лазерного оборудования и оснастки. Лазер – это сложный физический прибор и независимо от уровня развития технологии изготовления его цена будет значительно превышать стоимость, например, дуговых источников нагрева. Помимо лазера обязательными элементами установки являются оптическая система отклонения и фокусировки, а также приборы контроля параметров режима и различные манипуляторы.

Оптические системы отклонения и фокусировки представляют собой набор металлических зеркал и специальных линз, часто изготавливаемых из дефицитных дорогостоящих материалов по уникальным технологиям. Стоимость подобных систем достаточно высока. Кроме того, важной проблемой, возникающей при проведении лазерной сварки, является обеспечение надежности оптических систем, их стойкости и работоспособности. В частности, предъявляются особые требования к помещениям, где осуществляется лазерная сварка, по запыленности, влажности, вибрации и пр.

Средства контроля лазерного излучения также отличаются рядом особенностей, оказывающих влияние на относительно высокую стоимость этих приборов и на специфические условия их эксплуатации.

Оснастка для лазерной сварки отличается высокой точностью, возможностью перемещения в широком диапазоне скоростей (от 0,5 до 20 м/мин) и перемещением деталей в различных пространственных положениях. Стоимость рассмотренного комплекса оборудования по сравнению со стоимостью оборудования при использовании традиционных методов сварки значительно выше.

2 Невысокая энергетическая эффективность лазерной сварки, так как КПД лазерных установок в редких случаях превышает 10 %.

3 Сложность устройств лазерной техники, что требует высокого уровня технической подготовки обслуживающего персонала.

Наконец, необходимо отметить, что существует ряд альтернативных традиционных методов, которые в значительной степени удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к процессу лазерной сварки. Такие технологии в настоящее время часто оказываются экономически эффективней лазерной.

Указанные особенности ограничивают использование лазерной сварки теми областями, где их применение, бесспорно. Вопрос об использовании лазерной сварки необходимо решать путем всестороннего технико-экономического анализа с рассмотрением альтернативных технологий в динамике их развития наряду с развитием лазерной технологии, а также долгосрочных прогнозов и тенденции развития отраслей машиностроения и народного хозяйства в целом.

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		19

1.3 Закономерности формирования структуры и свойств неразъемных соединений, полученных лазерной сваркой

Изучению металлургических особенностей формирования структуры сварных соединений, полученных лазерной сваркой, определению типа дефектов структуры металла в зоне шва и причин их возникновения, а также влиянию дефектов на прочностные свойства сварных соединений посвящено большое количество публикаций [15]. Несмотря на достигнутые положительные результаты в понимании природы процессов, протекающих при этом способе соединения металлов, опыт его промышленного внедрения в некоторых отраслях индустрии, до настоящего времени не достигнуто полное понимание взаимосвязи между параметрами воздействия лазерного луча как внешнего энергетического источника и не стационарностью течения жидкого металла в ванне расплава. В связи с этим сохраняются трудности при выборе оптимальных режимов лазерной сварки для разных материалов с различными толщинами.

Одним из основных показателей качества процесса сварки является сохранение химического состава исходного материала в зоне сварного соединения, в первую очередь легкоиспаряющихся элементов, таких как магний, марганец. Микроанализ состава сварного шва показал, что при лазерной сварке в выбранных защитных средах соблюдается идентичность элементного состава исходного металла и металла в зоне шва.

1.4 Свойства и классификация коррозионностойких жаропрочных сплавов

Сплавы на никелевой основе подразделяют на две группы (см. ГОСТ 5632-27): 1) сплавы, применяемые преимущественно как жаропрочные, и 2) жаростойкие сплавы, обладающие необходимым минимумом жаропрочности.

Наиболее часто применяемые сплавы первой группы относятся к системе Ni-Cr-Ti-Al в количествах, превышающих их предельную растворимость в твердом растворе при температурах от 650 °С до 950 °С, позволяет достигнуть после закалки и отпуска существенного эффекта дисперсионного твердения, благодаря выделению дисперсных частиц интерметаллической фазы типа Ni₃(Ti, Al). Такая микроструктура делает сплав устойчивым против температурного воздействия при от 700 °С до 800 °С и выше.

Введение в дисперсионно-твердеющие сплавы этой группы W и Mo (в сумме до ≈ 10 %), а также Nb дополнительно упрочняют твердый раствор, замедляет развитие диффузионных процессов и увеличивает количество

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

упрочняющей дисперсной фазы. Количество дисперсной фазы увеличивают также путем увеличения суммарного содержания Ni и Al. Все это приводит к существенному возрастанию жаропрочности сплавов, что делает возможным их применение при температурах до 850 °С и высоких напряжениях.

К особенностям состава никелевых жаропрочных сплавов относится присутствие в них небольших добавок поверхностно-активных элементов (В, Се, иногда Ва и Mg), способствующих рафинированию металла и упрочнению границ зерен, а также небольшое содержание в них примесей (S, P, Pb, и др.)

Понятие «жаропрочные сплавы» объединяет большую группу металлических материалов, применяемых для изготовления деталей машин и конструкций, работающих под нагрузкой при повышенных температурах. Интервал таких рабочих температур очень широк (от 100 °С до 1000 °С и более). Этим обуславливается большое разнообразие сплавов, используемых в качестве жаропрочных.

При сравнительно невысоких температурах (от 100 °С до 400 °С) в качестве жаропрочных могут применяться обычные конструкционные стали (углеродистые и малолегированные), а также сплавы на основе меди, алюминия и титана. При более высоких температурах (от 500 °С до 700 °С) применяются легированные стали перлитного, ферритного, (феррито-мартенситного) и аустенитного классов. Для работы при еще более высоких температурах (от 700 °С до 1000 °С) детали изготавливают из высоколегированных сплавов, содержащих железа меньше 50 %, а также безжелезных сплавов на основе никеля, кобальта, хрома, молибдена и других металлов.

Для весьма высоких температур (от 1000 °С до 1200 °С) используются металлокерамические сплавы.

Разнообразие жаропрочных металлических сплавов, резко отличающихся между собой по химическому составу, способу производства, структуре и свойствам, естественно затрудняет их классифицирование. Наиболее рациональной на наш взгляд является классификация, предложенная П. Б. Михайловым-Михеевым. Она охватывает почти все металлические сплавы (кроме сплавов на основе меди, алюминия и некоторых других) и более полно по сравнению с ранее предложенными классификациями учитывает признаки, по которым можно сплавы делить на группы [10].

По способности подвергаться термической обработке жаропрочные сплавы (как и все металлические сплавы вообще) можно разделить на три группы: сплавы, не имеющие вовсе фазовых превращений в твердом состоянии; сплавы, у которых фазовые превращения связаны с перестройкой кристаллической решетки (полиморфные превращения) и сплавы, у которых фазовые превращения обусловлены только изменением предельной растворимости избыточных компонентов при нагревании и охлаждении.

К первой группе относятся главным образом однофазные жаропрочные сплавы-твердые растворы, такие, например, как чисто ферритные и аустенитные стали, а также нихромы (не содержащие избыточных компонентов, обра-

зующих фазы выделения), молибдено-вольфрамовые и другие сплавы. Эти сплавы можно подвергать только такой термической обработке, при которой нагрев производится до температур, находящихся ниже линии солидуса.

Вторую группу составляют сплавы, претерпевающие полиморфные превращения. К ним относятся углеродистые стали и жаропрочные чугуны, мало- и среднелегированные стали перлитного и феррито-мартенситного классов, а также титановые, кобальтовые и другие сплавы.

К сплавам третьей группы относятся дисперсионно-твердеющие аустенитные стали, алюминиевые, никелехромовые и другие сплавы.

Сплавы второй и третьей групп можно подвергать всем видам термической обработки.

Первые две группы имеют по три подгруппы, в которых сплавы объединены по способности воспринимать термическую обработку.

К сплавам на железной основе отнесены углеродистые и легированные стали и жаропрочные чугуны. Согласно ГОСТ 5632-61 на коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы к легированным жаропрочным сталям условно отнесены сплавы, в которых содержание железа больше 50 %. К железохромоникелевым сплавам условно отнесены сплавы, основной структурой которых является твердый раствор хрома и других элементов в железе. При этом суммарное содержание никеля и железа в них должно быть больше 65 %. К жаропрочным никелевым сплавам по этому же ГОСТу условно отнесены сплавы, основной структурой которых является твердый раствор хрома (и других легирующих элементов) в никеле, если содержание Ni в сплаве превышает 55 %.

Такой же принцип, несмотря на его условность, видимо, следует распространить и на другие сплавы на нежелезной основе - называть кобальтовыми, хромовыми и т. д. при содержании в них соответствующих элементов более 55 %.

1.5 Влияние легирующих элементов на структуру и свойства коррозионностойких жаропрочных сплавов

Легирующие элементы вводятся в стали в определенных концентрациях с целью изменения их внутреннего строения и свойств (таблице 1.1). Стали, содержащие такие легирующие элементы, называются легированными.

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

Таблица 1.1 – Влияние легирующих элементов на стали

Легирующий элемент	Свойства сталей
Хром (<i>Cr</i>)	- повышает твердость и прочность, незначительно уменьшая пластичность; - увеличивает коррозионную стойкость; - содержание хрома в количестве более 13 % делает сталь нержавеющей; - увеличивает устойчивость магнитных сил.
Никель (<i>Ni</i>)	- придает стали коррозионную стойкость, высокую прочность и пластичность; - увеличивает прокаливаемость; - оказывает влияние на изменение теплового расширения.
Вольфрам (<i>W</i>)	- образует в стали очень твердые химические соединения – карбиды, резко увеличивающие твердость и красностойкость; - препятствует росту зерен при нагреве; - способствует устранению хрупкости при отпуске
Ванадий (<i>V</i>)	- повышение прочности и твердости; Измельчает зерно; - увеличивает плотность стали, так как является хорошим раскислителем
Кремний (<i>Si</i>)	- в количестве свыше 1 % увеличивает прочность, при сохранении вязкости; - при большом содержании кремния увеличивается электросопротивление и магнитопроницаемость; - увеличивается также упругость, кислотостойкости и окалиностойкость
Марганец (<i>Mn</i>)	- при содержании свыше 1 % увеличивается твердость, износостойкость, стойкость против ударных нагрузок, не уменьшая пластичность
Кобальт (<i>Co</i>)	- повышает жаропрочность, магнитные свойства; - увеличивает сопротивление удару
Молибден (<i>Mo</i>)	- увеличивает красностойкость, упругость, предел прочности на растяжение - повышает антикоррозионные свойства и сопротивление окислению при высоких температурах.
Титан (<i>Ti</i>)	- повышение прочности и плотности стали; - раскисляет сталь и способствует изменению зерна; - улучшает обрабатываемость и сопротивление коррозии
Ниобий (<i>Nb</i>)	- улучшает кислотостойкость; - способствует уменьшению коррозии в сварных конструкциях
Алюминий (<i>Al</i>)	- способствует измельчению зерна - повышает жаростойкость и окалиностойкость
Медь (<i>Cu</i>)	- увеличивает антикоррозионные свойства
Цирконий (<i>Zr</i>)	- оказывает особое влияние на величину и рост зерна в стали; - измельчает зерно и позволяет получать сталь с заранее заданной зернистостью.

Введение легирующих элементов значительно усложняет взаимодействие компонентов в стали между собой, приводит к образованию новых фаз и структурных составляющих, изменяет кинетику превращений и технологию термической обработки. Причем распределение легирующих элементов в сталях весьма разнообразно – они могут находиться в сталях:

- в свободном состоянии (медь, свинец, серебро);
- в виде интерметаллидных соединений (металла с металлом) с железом или между собой;

– в виде оксидов, сульфидов и других неметаллических соединений (алюминий, титан и ванадий, являясь раскислителями, образуют оксиды Al_2O_3 , TiO_2 , V_2O_5);

– в карбидной фазе – в виде твердого раствора в цементите или в виде самостоятельных соединений с углеродом – специальных карбидов; в растворенном виде в железе.

Углерод, взаимодействуя с железом, формирует в сталях внутреннее строение и механические свойства. Введение легирующих элементов нарушает это взаимодействие. По характеру взаимодействия с углеродом легирующие элементы подразделяются на некарбидообразующие и карбидообразующие.

К некарбидообразующим элементам относятся никель, кремний, кобальт, алюминий, медь. Они растворяются во всех кристаллических состояниях железа и изменяют его свойства. Карбидообразующими элементами являются хром, марганец, молибден, вольфрам, ванадий, титан, ниобий, цирконий. Они могут растворяться в железе или образовывать карбиды (Mn_3C , $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_6 , Fe_3Mo_3C , Fe_3W_3C и др.), сравнительно легко растворяющиеся в аустените при нагреве, и карбиды (MoC , W_2C , WC , VC , TiC и др.), практически не растворяющиеся в аустените при нагреве.

Кроме того, все карбидообразующие элементы могут растворяться в цементите, образуя легированный цементит. Все карбиды и легированный цементит обладают более высокой температурой распада и твердостью и в дисперсном виде значительно упрочняют сталь.

Полиморфные состояния железа при образовании твердых растворов введением легирующих элементов смещаются по температуре. Все легирующие элементы по влиянию на полиморфные состояния железа можно разделить на две группы:

- расширяющие область $Fe\gamma$ (или легированного аустенита);
- сужающие область $Fe\gamma$.

К первой группе относятся никель, марганец, кобальт, медь. Точка A_3 железа с увеличением содержания этих элементов снижается, расширяя

Область существования $Fe\gamma$ на диаграмме «Железо-легирующий элемент». Такое состояние сплава может существовать от температуры плавления до весьма низких отрицательных температур. Такие стали называются аустенитными. Примером может служить износостойкая сталь 110Г13Л, содержащая 13 % марганца.

Ко второй группе относятся кремний, хром, вольфрам, молибден, ванадий, титан. Точка A_3 железа с увеличением содержания этих элементов повышается, расширяя область $Fe\alpha$ и сужая область $Fe\gamma$. Область $Fe\alpha$ легированного феррита также может существовать от температуры плавления до весьма низких отрицательных температур. Такие стали называются ферритными. Примером может служить жаростойкая сталь X25.

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

1.6 Виды и способы упрочнения коррозионностойких сплавов

Основной принцип, лежащий в основе повышения прочности металлов и сплавов – создание препятствий, затрудняющих перемещение дислокаций. Упрочнение достигается путем термической обработки или пластической деформации металлов и сплавов за счет увеличения плотности дефектов.

Термическая обработка – процесс теплового воздействия на материалы для целенаправленного изменения их структуры и свойств.

Возможность упрочнения сплавов с помощью термической обработки определяется превращениями определенного типа, которые происходят в сплавах, находящихся в твердом состоянии. Эти превращения могут быть диффузионными и бездиффузионными.

При бездиффузионных превращениях атомы перемещаются на весьма малые расстояния, не более 2 периодов кристаллической решетки. Скорость превращений очень велика и значительно превосходит скорости нагрева и охлаждения сплавов при термической обработке, поэтому управлять такими превращениями или регулировать их весьма трудно или невозможно. Примером бездиффузионного превращения может служить полиморфное превращение, например, $Fe\alpha \leftrightarrow Fe$.

При диффузионных превращениях атомы перемещаются на значительные расстояния (до нескольких мм), превращения протекают медленно (например, продолжительность процесса азотирования, описанного ниже, достигает нескольких суток). Поэтому степень прохождения этих превращений можно регулировать при термической обработке, изменяя скорость нагрева или охлаждения, температуру или время выдержки. Примером диффузионного превращения может служить частичный распад твердого раствора, при котором в результате уменьшения растворимости одного из компонентов при понижении температуры из твердого раствора выделяется вторичная фаза.

Следует иметь в виду, что упрочняющей обработке подвергают заготовки, имеющие определенную форму, полученную в результате формообразующих операций (например, обработкой резанием). Для облегчения выполнения таких операций металл должен обладать хорошими технологическими свойствами – невысокими твердостью и прочностью, это достигается специальными видами термической обработки.

Перекристаллизация.

Этот метод упрочнения основан на бездиффузионных превращениях. При перекристаллизации упрочнение сплавов достигается за счет измельчения зерен, которое происходит при полиморфном превращении (изменение типа кристаллической решетки) в процессе нагрева и охлаждения сплава.

Рассмотрим процесс перекристаллизации на примере сплавов системы «Fe-Cr» (рисунок 1.6). На диаграмме α -твердый раствор хрома в Fe α ; γ -твердый раствор хрома в Fe. Эти твердые растворы отличаются типом кри-

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

сталлической решетки: α -твердый раствор имеет кубическую объемно-центрированную кристаллическую решетку; γ -твердый раствор – кубическую гранецентрированную. Перекристаллизация возможна в сплавах, концентрация хрома в которых ниже определяемой проекцией точки $a-a'$.

Рассмотрим превращения, протекающие при нагреве и охлаждении в одном из таких сплавов. До упрочнения структура сплава (заготовки) состоит из крупных зерен α -твердого раствора (рисунок 1.7 а). Прочность сплава в таком состоянии невелика, так как мала протяженность межзеренных границ, которые являются препятствиями на пути перемещения дислокаций. При нагреве сплава крупнозернистая структура сохраняется до точки 1 – температуры начала полиморфного превращения (рисунок 1.6). При температуре выше точки 1

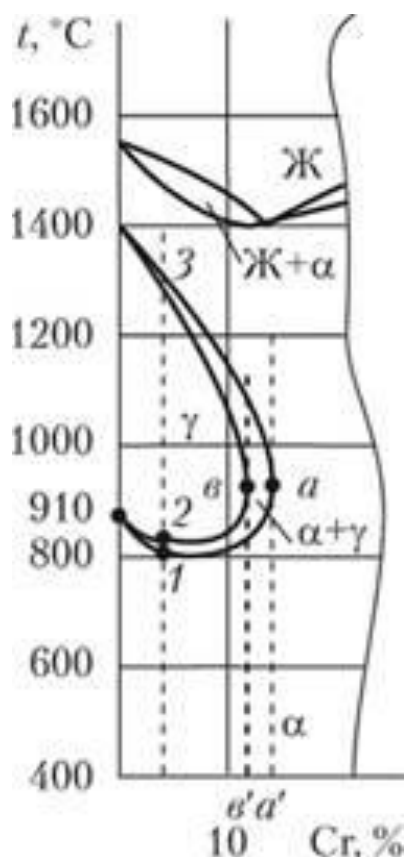


Рисунок 1.6 – Фрагмент диаграммы состояния «Fe-Cr»

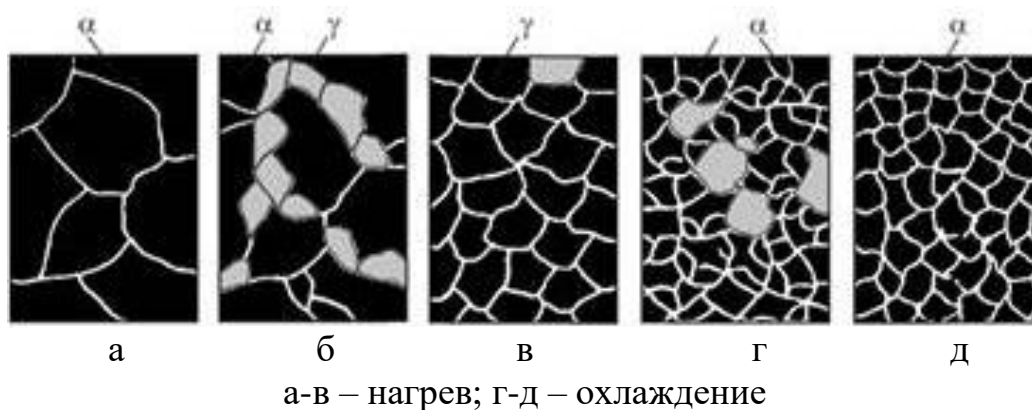


Рисунок 1.7 – Схема изменение структуры сплава при его упрочнении перекристаллизацией

α -твердый раствор становится неустойчивым и по границам его зерен происходит образование новой фазы – γ , размеры зерен которой значительно меньше зерен α -фазы (рисунок 1.7 б). При дальнейшем повышении температуры (до точки 2) количество γ -фазы увеличивается за счет образования новых мелких зерен. В точке 2 полиморфное $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение заканчивается, α -фаза полностью заменяется γ -фазой, имеющей более мелкие зерна (рисунок 2 в). Нагрев выше точки 2 (до точки 3) не изменяет фазового состава сплава, но приводит к укрупнению зерен γ -фазы. В связи с этим при проведении термической обработки сплав нагревают лишь немного выше точки 2 (на 30-50 °С), что гарантирует завершение $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, но не вызывает увеличения размеров зерен γ -твердого раствора.

После нагрева до указанной температуры и необходимой выдержки сплав охлаждают. Охлаждение выполняют медленно для получения равновесной структуры и снятия напряжений, возникающих при фазовых превращениях. При охлаждении до точки 2 начинается обратное ($\gamma \rightarrow \alpha$) полиморфное превращение с образованием по границам зерен γ -твердого раствора кристаллитов α -фазы, более мелких, чем у исходной γ -фазы (рисунок 1.7 г). При понижении температуры до точки 1 количество α -фазы возрастает за счет появления новых мелких зерен. В точке 1 полиморфное превращение заканчивается, структура сплава, сформированная окончательно в результате двойной перекристаллизации, состоит из мелких зерен α -твердого раствора (рисунок 1.7 д).

Таким образом, в результате термической обработки фазовый состав сплава не изменился, изменилась его структура – из крупнозернистой превратилась в мелкозернистую. Уникальность этого метода упрочнения заключается в том, что в результате измельчения зерна повышается не только прочность, но и пластичность сплава. Все остальные

методы, повышающие прочность сплавов, одновременно снижают их пластичность.

Полная перекристаллизация, т.е. $\alpha \rightarrow \gamma$ и $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при нагреве и охлаждении соответственно, во всем объеме возможна только в сплавах с концентрацией хрома не более b' – проекции точки b . Сплавы, лежащие в интервале $b' - a'$, невозможно упрочнить во всем объеме, так как при нагреве не произойдет полной перекристаллизации, возможно лишь превращение $\alpha \rightarrow \alpha + \gamma$ и, таким образом, лишь частичное упрочнение.

1.7 Влияние термической обработки на качество сварных соединений

Для устранения отрицательных свойств, приобретенных сварным соединением в процессе сварки, применяют термическую обработку. Проведение термической обработки зависит от условий работы сварного соединения, толщины и степени легирования свариваемого металла, типа конструкции и ряда других факторов, определяющих работоспособность сварных соединений. Термическая обработка - это одно из радикальных средств повышения работоспособности, а следовательно, эксплуатационной надежности технологических трубопроводов и оборудования. Как показывает практика, уровень остаточных сварочных напряжений может снизиться в результате термической обработки на 70 %.

Термическая обработка сварных соединений является ответственной технологической операцией, поэтому своевременность ее проведения и соблюдение установленных для данного сварного соединения режимов термической обработки определяют эксплуатационную надежность всего изделия. Доказано, что в отдельных случаях неправильно выполненная термическая обработка была причиной разрушения сварных соединений в процессе эксплуатации.

Перед термической обработкой необходимо удалить шлак с поверхности сварного шва, устранить дефекты шва, снять внешнюю нагрузку на трубопровод в месте термической обработки (на расстоянии от 1 до 1,5 м от стыка устанавливают дополнительные опоры), концы трубопроводов закрыть временными заглушками, отделить нагреваемые участки технологических аппаратов теплоизоляционными перегородками. Сварное соединение подвергают термической обработке после заполнения всей разделки шва.

Процесс термической обработки включает нагрев сварного соединения до определенной температуры, выдержку при этой температуре от нескольких минут до нескольких часов и последующее охлаждение.

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

В условиях строительно-монтажной площадки применяют следующие виды термической обработки: высокий отпуск, нормализацию и аустенизацию.

Высокий отпуск. Сварное соединение нагревают до определенной температуры (например, из углеродистой и низколегированной стали до 600-750 °С), выдерживают при этой температуре в течение одного или нескольких часов и медленно охлаждают. При этом снижается уровень остаточных сварочных напряжений и повышается пластичность металла сварного соединения.

Нормализация. Этот вид обработки способствует получению однородной мелкозернистой структуры металла и улучшению механических свойств металла сварного соединения, а также снижению уровня остаточных сварочных напряжений. При нормализации сварное соединение нагревают выше критической точки (например, для углеродистой и низколегированной стали до 900 °С), выдерживают при этой температуре в течение нескольких минут и дают остыть на спокойном воздухе.

Аустенизация (закалка на аустенит). Аустенизация способствует получению структуры однородного аустенита, улучшению свойств стали и снижению уровня остаточных сварочных напряжений. Она заключается в нагреве сварного соединения до 1125 °С, выдержке около 1 ч и последующем охлаждении в масле или воде.

Влияние температуры и скорости нагрева на качество термической обработки. Для предотвращения появления значительных термических напряжений нагрев до 550 °С следует проводить с небольшой скоростью (ниже 50 °С/с); в интервале температур от 550 °С до 1100 °С скорость нагрева должна быть высокой (более 200 °С/с), что предотвратит появление трещин в околошовной зоне.

Нельзя получить однородную аустенитную структуру металла, если термическую обработку выполняют при температуре, ниже предусмотренной технологическим процессом. Превышение заданных температур может вызвать рост зерна в металле шва и околошовной зоне, что повышает возможность образования трещин в металле.

Контроль температуры термической обработки.

Температуру термической обработки контролируют термокарандашами и термокрасками- Термокарандаши и термокраски резко меняют свой цвет при достижении определенной температуры. По принципу действия они делятся на химические и плавления. К химическим относятся вещества, изменяющие цвет при достижении определенной температуры в результате химического взаимодействия компонентов. На точность измерения температуры термокрасками, выпускаемыми Рижским лакокрасочным заводом, влияют время теплового воздействия, повышенное и пониженное давления. При тепловом воздействии в течение

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		29

2,5 мин температура определяется с погрешностью не более ± 10 °С. Температура, при которой краска или карандаш меняют свой цвет, называется критической.

У термоиндикаторов плавления в основе эффекта изменения цвета лежит плавление термочувствительного вещества. У них в отличие от индикаторов химического действия критическая температура не зависит от продолжительности теплового воздействия. Погрешность определения температуры составляет не более ± 2 °С. На критическую температуру термоиндикаторов плавления не влияют влага, морской туман, солнечная радиация, гамма-облучение, переменная температура, разрежение, высокая температура.

Термоиндикаторы плавления бывают двух основных видов - адсорбентные и лаки плавления. Адсорбентные индикаторы состоят из суспензии термочувствительного вещества с определенной точкой плавления и пигмента в связующем растворителе. Цвет изменяется после плавления термочувствительного вещества и адсорбции его Цветным пигментом. Лаки плавления, это материалы с определенной точкой плавления, суспензированные в инертном растворителе. Лак, нанесенный на изделие, мгновенно высыхает, образуя шероховатую поверхность. При нагревании до критической температуры поверхность становится глянцевой.

Термоиндикаторы плавления адсорбентного типа выпускает Рижский лакокрасочный завод. В номенклатуру входит около 30 марок индикаторов (ТП-36-ТП-254), предназначенных для применения в интервале температур от 36 °С до 254 °С.

1.8 Технологическая прочность и концентрация напряжений в сварных соединениях

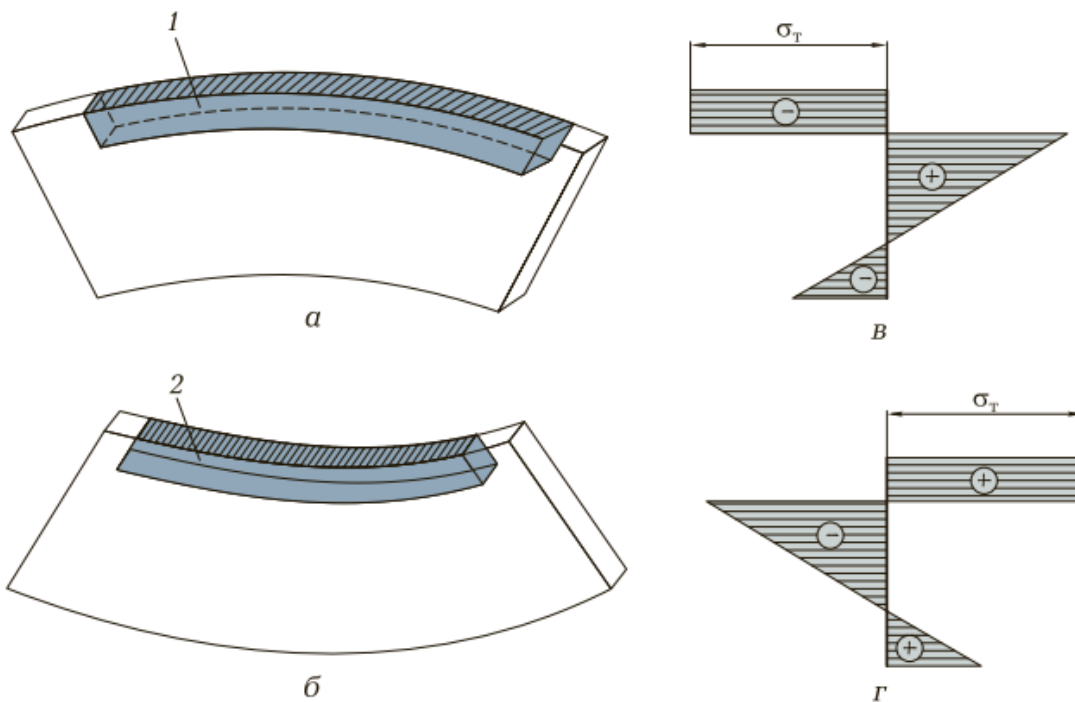
При сварке плавлением из-за неравномерного нагрева сварной конструкции возникают напряжения и деформации.

Механическое напряжение представляет собой силу, отнесенную к площади поперечного сечения тела, к которому приложена эта сила:

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием приложенных к нему сил.

При сварке металл, нагретый до высокой температуры начинает расширяться, но расположенные за нагретым металлом холодные участки детали препятствуют его расширению. Под влиянием этих процессов в детали возникают внутренние напряжения (рисунок 1.8).

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		30



а, в – деформации соответственно при нагреве и охлаждении верхней поверхности образца; б, г – распределение внутренних напряжений в сечениях, проведенных через осевую линию образцов соответственно при нагреве и охлаждении

1 – нагретая зона; 2 – охлажденная поверхность; σ_T – предел текучести; «+» – растяжение; «-» – сжатие

Рисунок 1.8 – Деформации и напряжения, возникающие при нагреве и охлаждении кромки образца

Еще одной причиной возникновения напряжений и деформаций при сварке является усадка металла шва при переходе его из жидкого состояния в твердое.

Усадкой называется уменьшение объема металла при его остывании. Усадка металла шва вызывает продольные и поперечные деформации детали.

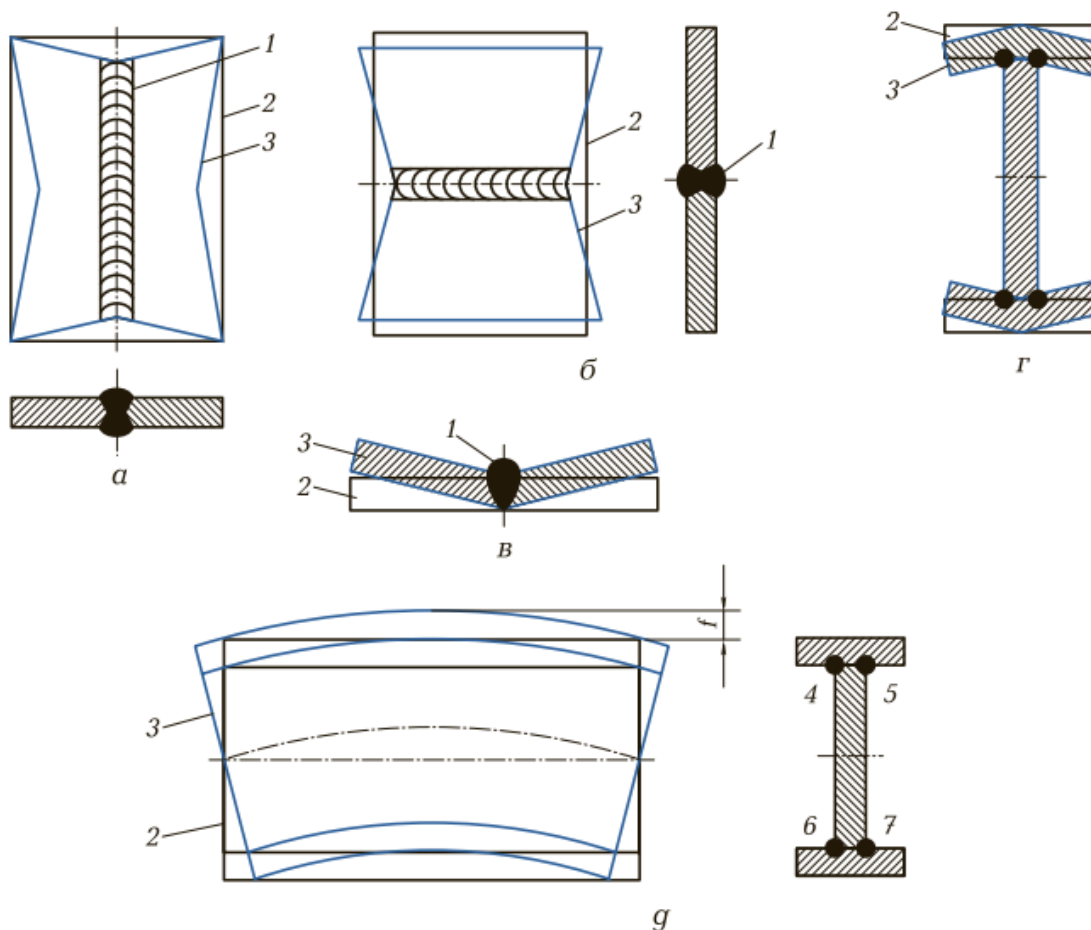
Степень деформации детали зависит от температуры нагрева и коэффициента линейного расширения металла. Чем выше коэффициент линейного расширения и температура нагрева, тем значительнее деформации. Очевидно, что конструкции из алюминиевых сплавов в наибольшей мере подвержены деформациям. Бесспорно, и то, что при высокой тепловой мощности вероятность возникновения деформаций конструкции больше.

Форма детали, ее размеры и положение сварочных швов также влияют на ее деформацию при сварке. Сложная форма детали, наличие большого числа несимметричных швов и высокая жесткость конструк-

ции определяют повышенные деформации и напряжения при сварке (рисунок 1.9).

Остаточные напряжения, причиной появления которых является разница удельных объемов структур определенных участков сварного соединения, называются структурными остаточными напряжениями. В большинстве случаев они появляются совместно с температурными напряжениями. Например, при остывании легированных сталей образование мартенсита связано с резким увеличением их объема. Так как в этом случае объемные деформации происходят при низких температурах, т. е. когда металл находится в упругом состоянии, структурные превращения вызывают образование остаточных напряжений.

Напряжения, которые существуют в конструкции или элементе конструкции при отсутствии приложенных к ним поверхностных или объемных сил, называются собственными напряжениями (рисунок 1.10).



а, б – линейные; в, г – угловые; д – серповидная; 1 – сварной шов;
2, 3 – формы изделий соответственно до и после сварки; 4-7 – последовательность выполнения швов; f – стрела прогиба

Рисунок 1.9 – Виды сварочных деформаций



Рисунок 1.10 – Классификация собственных напряжений

Возникают собственные напряжения вследствие различных видов деформаций металла, например, появляющихся в результате изменения температуры, структурных превращений или под действием внешних сил.

В зависимости от объема взаимоуравновешенных частиц тела различают собственные напряжения I рода – уравниваемые в макробъемах (в сварном соединении, сварном шве), II рода – уравниваемые в пределах зерен металла и III рода – уравниваемые в пределах кристаллической решетки.

По продолжительности существования различают собственные напряжения временные, т. е. существующие только в процессе сварки, и остаточные – сохраняющиеся устойчиво в течение длительного периода после сварки.

Распределение остаточных напряжений в сварных соединениях весьма разнообразно и трудно поддается регламентации и четкой классификации. Более или менее стабильный характер собственные остаточные напряжения имеют вдоль швов, и в первую очередь вдоль стыковых (рисунок 1.11). В сварных швах большинства сплавов наиболее опасные растягивающие остаточные напряжения достигают значений пределов их текучести, а иногда и превышает эти значения.

Деформации конструкций, вызванные сваркой, подразделяют на общие – характерные для сварной конструкции в целом, и местные – образующиеся в пределах одной, нескольких деталей или на части одной из деталей конструкции. Наблюдаемые в сварных конструкциях общие и местные деформации вызываются необратимыми усадочными явлениями и пластическими деформациями, сопутствующими тепловому воздействию сварочной дуги, а также возникающими сварочными напряжени-

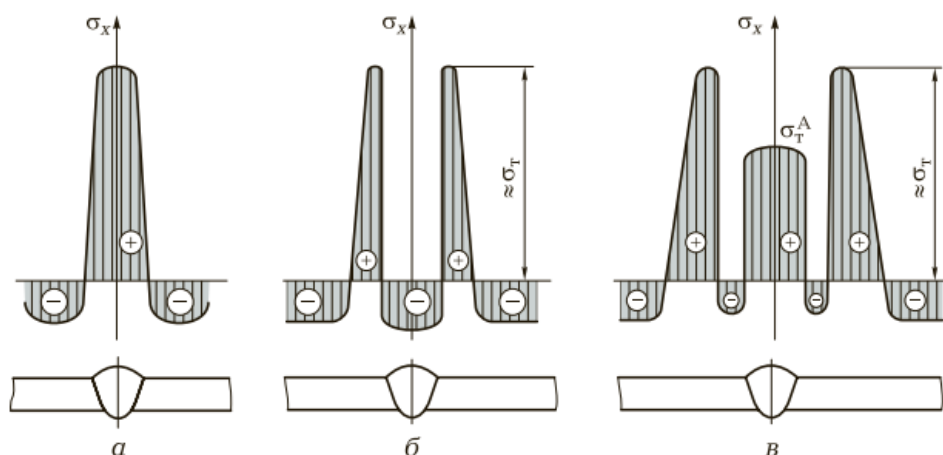
ями. Деформации зависят от способа сварки, геометрических характеристик сечения, расположения сварного соединения в конструкции и техники его выполнения.

Различают деформации продольные и поперечные, изгиба, скручивания, потери устойчивости.

Продольные и поперечные деформации, образующиеся при выполнении всех типов швов и соединений, определяющиеся размерами свариваемых элементов по длине и ширине. Остаточные продольные деформации зависят от ширины и толщины свариваемых элементов, способа сварки, размеров швов и других факторов. Остаточные поперечные деформации в пластинах конечных размеров зависят от длины швов.

При выполнении стыковых соединений с зазором (рисунок 1.12) в результате неравномерного нагрева по ширине свариваемые пластины изгибаются с раскрытием зазора. Остывание металла в зоне уже сваренного шва приводит к сближению и повороту пластин, стремящемуся закрыть зазор.

Деформации изгиба, появляющиеся при сварке листов, стержней и оболочек, являются следствием несимметричного расположения швов относительно центра тяжести сечения, неодновременного выполнения симметрично расположенных швов или неодновременного заполнения разделки кромок валиками сварного шва.



а – низкоуглеродистая сталь, титановые сплавы; б – среднелегированная сталь; в – среднелегированная сталь со швом, выполненным аустенитными электродами; σ_T – предел текучести свариваемого материала; σ_A – предел текучести аустенитной стали

Рисунок 1.11 – Распределение собственных остаточных напряжений вдоль швов в поперечных сечениях сварных соединений различных материалов

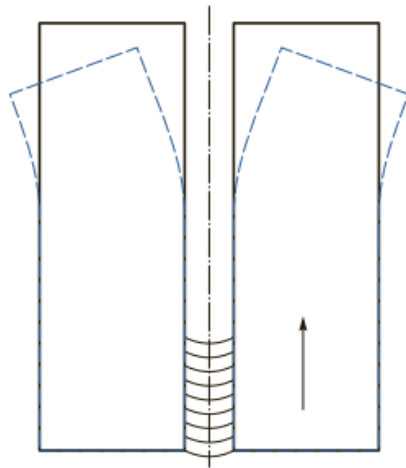


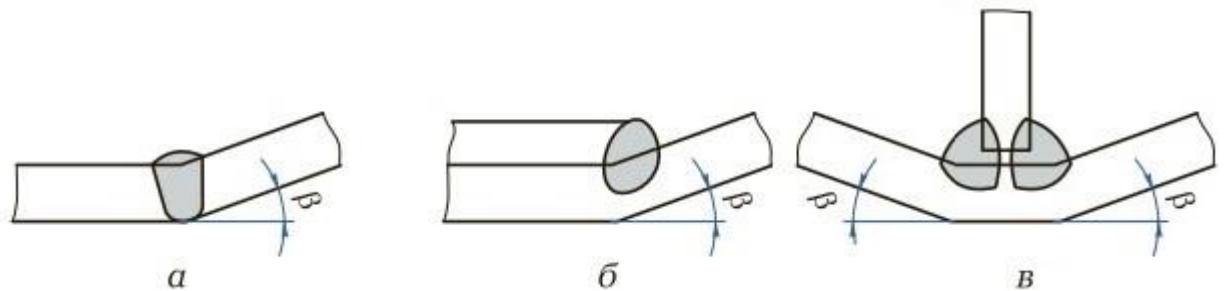
Рисунок 1.12 – Перемещение пластин, возникающее при сварке их встык с зазором

Неравномерные по толщине поперечные пластические деформации вызывают угловые перемещения свариваемых элементов (рисунок 1.13).

Деформация полки таврового соединения, называемая грибовидностью, тем больше, чем больше толщина полки и катет сварного шва (рисунок 1.14).

Характерными являются деформации при сварке балочных конструкций, например при выполнении продольного шва тавра (рисунок 1.15). После окончания сварки в этом случае возникают укорочение балки и изгиб тавра.

Деформации скручивания образуются вследствие несимметричного расположения сварочных швов относительно центра изгиба стержней или неодновременного их наложения.



а – стыкового; б – нахлесточного; в – таврового

Рисунок 1.13 – Угловые перемещения, возникающие при выполнении сварных соединений

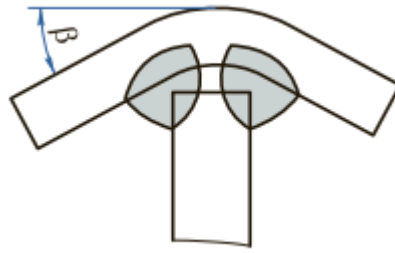
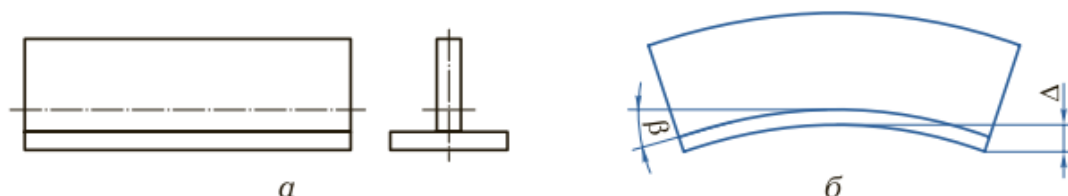


Рисунок 1.14 – Грибовидность, возникающая при выполнении таврового соединения

Деформации потери устойчивости вызываются сжимающими напряжениями, образующимися в процессе выполнения сварных соединений или после остывания конструкции. Особенно значительны такие деформации при сварке тонколистовых конструкций.

В сварных конструкциях могут возникать не только общие, но и местные деформации в виде выпучин и волн. Длинные и узкие листы, сваренные встык, под действием угловых деформаций и собственной массы получают волнистость (рисунок 1.16), размеры которой определяются углом β и толщиной свариваемых листов, характеризующей их массу. При приварке ребер к поясным листам возникают местные деформации – грибовидность. При этом кроме местных угловых деформаций возможно также образование выпучин и волнистости на поверхности листа.

Остаточные деформации, возникающие в результате перераспределения внутренних остаточных напряжений после сварки, называются вторичными. Перераспределение внутренних остаточных напряжений может произойти при первом нагружении сварной конструкции, а также при механической, термической или газопламенной обработке сварных изделий. Остаточные сварочные напряжения, перемещения и деформации могут существенно снизить прочность конструкции, исказить ее форму и размеры, ухудшить внешний вид, снизить технологическую прочность сварного соединения, что в результате приведет к возникновению горячих или холодных трещин.



а – балка до сварки; б – балка после сварки; β – угол прогиба; Δ – прогиб

Рисунок 1.15 – Деформация тавровой балки при сварке

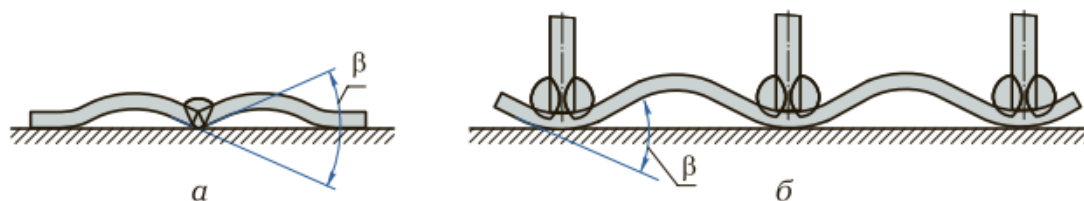


Рисунок 1.16 – Деформации, возникающие при сварке тонколистовых полотнищ (а) и приварке ребер к листу (б)

При определенных условиях возможно снижение статической прочности или потери устойчивости сварной конструкции, что, в свою очередь, также может привести к ее разрушению. Для конструкций, работающих в агрессивной среде, при наличии растягивающих остаточных напряжений возникает вероятность появления коррозионного растрескивания или усиления коррозионных процессов.

На стадиях проектирования, изготовления и монтажа сварных конструкций необходимо принимать меры по уменьшению влияния сварочных напряжений и деформаций. Необходимо уменьшать объем наплавленного металла и тепловложение в сварной шов. Сварные швы следует располагать симметрично друг другу и по возможности не допускать их пересечения.

Ограничить деформации в сварных конструкциях можно и следующими технологическими приемами: выполнять сварку с закреплением изделий в стендах или специальных приспособлениях, использовать рациональную последовательность сварочных (сварка обратноступенчатым швом и др.) и сборочно-сварочных операций (уравновешивание деформаций нагружением элементов детали).

Необходимо создавать упругие или пластические деформации, обратные по знаку сварочным деформациям (обратный выгиб, предварительное растяжение элементов перед сваркой и др.). Эффективно использование усиленного охлаждения сварного соединения (медных подкладок, водяного охлаждения и др.) и пластического деформирования металла в зоне шва в процессе сварки (проковка, прокатка роликом, обжатие точек при контактной сварке и др.) [17].

Лучше использовать способы сварки, обеспечивающие высокую концентрацию теплоты, а также применять двухстороннюю сварку и X-образную разделку кромок, уменьшать погонную энергию и площади поперечных сечений швов, стремиться располагать швы симметрично по отношению к центру тяжести изделия.

Напряжения можно снимать термической обработкой конструкции после сварки. Остаточные деформации можно устранять механической

правкой конструкции в холодном состоянии (изгибом, вальцовкой, растяжением, прокаткой роликами, проковкой и т. д.) и термической правкой ее посредством местного нагрева.

Для уменьшения деформаций необходимо правильно выбирать режим сварки. При сборке конструкции под сварку следует выдерживать постоянным зазор по всей длине кромок, накладывать минимальное число прихваток, соблюдать принятую технологию сварки и технику выполнения швов, использовать способы компенсации деформаций, основанные на определенной очередности наложения швов, а также способ обратных деформаций, заключающийся в придании детали перед сваркой изгиба в направлении, противоположном ожидаемой деформации. Уменьшение деформаций обеспечивает и жесткое закрепление свариваемых деталей в специальных приспособлениях - кондукторах.

Снизить влияние поперечной усадки при сварке можно выставлением неравномерного зазора, т. е. в начале сварного шва зазор выставляется уже, а в конце шва – шире. Необходимое расширение зазора определяется многими факторами: протяженностью свариваемого стыка, толщиной свариваемых деталей, скоростью сварки и т. п. Со временем к сварщику приходят опыт и умение правильно устанавливать требуемое расширение.

При сварке деталей большой толщины (более 6 мм) со скошенными кромками происходит подъем незакрепленных боковых краев деталей, т. е. возникает угловая деформация, поскольку разделка в лицевой части пластин имеет большую ширину, чем в корневой части, а следовательно, наплавленного металла, дающего большую усадку в лицевой части, больше.

1.9 Области применения коррозионностойких сталей и сплавов

Изготовление деталей из коррозионностойких сталей и сплавов, титановых и жаропрочных сплавов связано с увеличением трудоемкости обработки вследствие снижения скорости резания. Обработка этих материалов требует совершенствования существующих технологических процессов и применения инновационных инструментальных материалов.

В связи с этим необходимо совершенствование режущего инструмента путем оснащения его инновационными инструментальными материалами с многофункциональным покрытием для повышения эффективности процесса резания указанных материалов.

К группе труднообрабатываемых материалов относят коррозионностойкие стали и сплавы, а также материалы с особыми свойствами.

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		38

В таблицах 1.2, 1.3 показаны состав и свойства типичных труднообрабатываемых коррозионностойких сталей и сплавов.

Таблица 1.2 – Состав хромо-никелевых коррозионностойких сталей, %

Марка	C	Cr	Ni	Дополнительное легирование
09X14H16Б	0,07-0,12	13-15	14-17	0,9-1,3 Nb
09X14H19B2BP	0,07-0,12	13-15	18-20	2,0-2,8 W 0,9-1,3 Nb
08X18H10T	<0,12	17-19	9-11	0,5-0,7 Ti
08X18H12Б	<0,08	17-19	11-13	0,8-1,2 Nb
09X14H19B2BP	0,07-0,12	13-15	18-20	2,0-2,8 W, 0,9-1,3Nb
4X14H14B2M	0,4-0,5	11-13	13-15	2,0-2,8 W, 0,2-0,4Mo
ХН35ВТЮ	<0,08	14-16	33-37	2,8-3,5 W, 2,4-3,2Ti 0,7-1,4 Al

Таблица 1.3 – Свойства жаропрочных сталей

Марка стали	Окали- нотстойкость, °C	Кратковременная проч- ность, МПа			Длительная прочность, МПа	
		600° C	700° C	800° C	600° C	700° C
08X18H10T	800	350	300	250	250	120
08X18H12Б	800	380	330	280	280	150
1X14H18B2BP	750	450	420	-	350	240
1X14H18B2Б	750	450	380	-	350	240
4X14H14B2M.	-	500	350	230	230	130
4X12H8Г8МФБ	-	600	500	-	450	300
X12H20ТЗР	-	850	700	400	550	400

В современных авиационных двигателях наиболее ответственными элементами являются турбинные и компрессорные лопатки (рисунок 1.17)

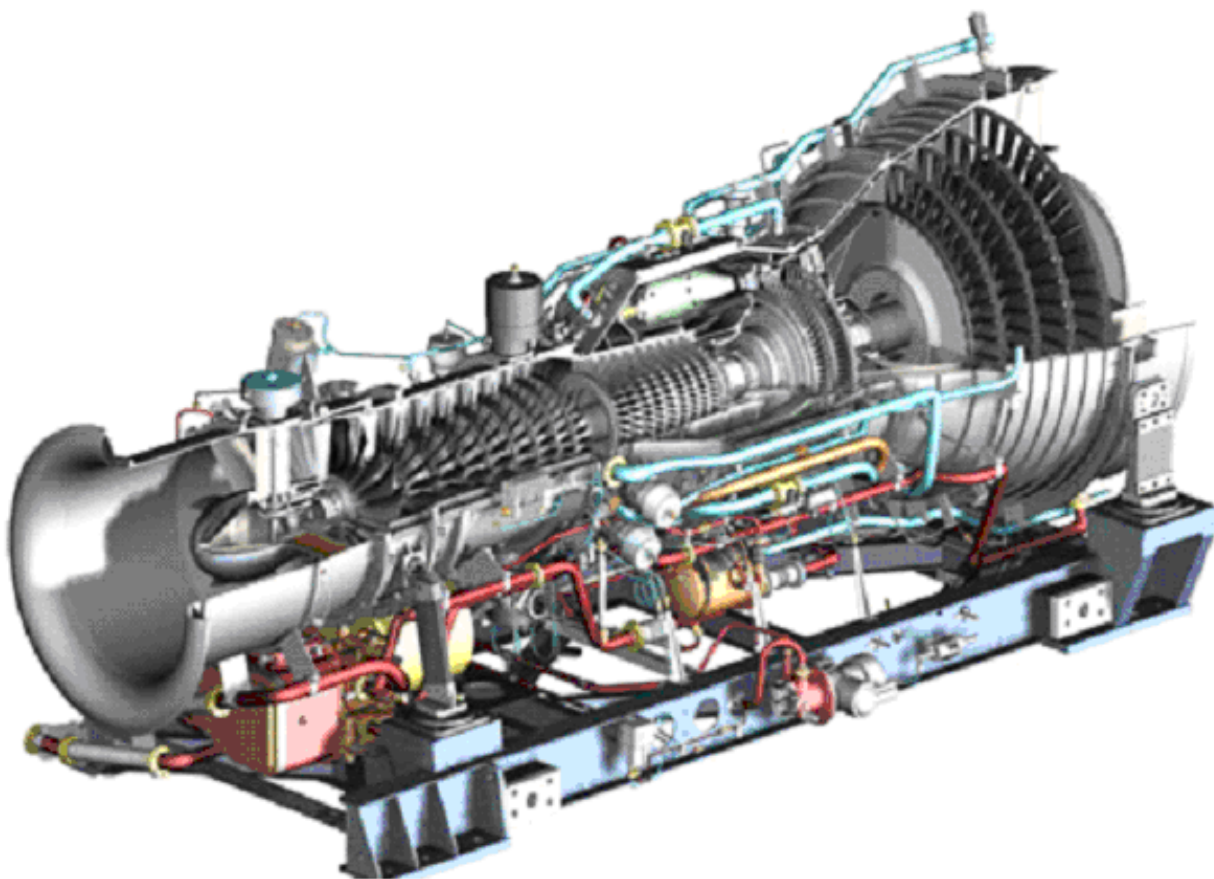


Рисунок 1.17 – Материалы, применяемые в авиационном двигателе-строении (турбовинтовой двигатель – разрез)

Мощность авиационного двигателя в большой степени зависит от максимальной температуры рабочего тела (газа), при которой длительное время могут работать лопатки. В реактивных двигателях нового поколения лопатки турбин разогреваются от 700 °С до 900 °С, четко прослеживается тенденция повышения этой температуры. Для лопаток турбин применяют аустенитные стали и сплавы на основе титана, никеля отвечающие требованиям коррозионной стойкости и жаропрочности.

Большинство таких материалов характеризуется низкой обрабатываемостью, которая ухудшается по мере повышения жаропрочных свойств. В частности, это относится к никелевым и титановым сплавам, композитам на основе алюминиевых и титановых сплавов, упрочненных полимерными материалами, а также интерметаллоидам типа Ti-Al, Ni-Al и др.

Преимущественное применение имеют сплавы никеля, содержащие, как правило, хром (около 20 %) и другие довольно многочисленные присадки. Коррозионностойкие, жаропрочные никелевые сплавы характеризуются высокой прочностью и малой скоростью разупрочнения.

1.10 Постановка задачи исследования

Целью данной работы послужила необходимость разработки технологии роботизированной лазерной сварки пространственных сварных соединений тонкостенных конструктивных элементов изделий авиационного комплекса из коррозионностойких, жаропрочных сталей.

Несмотря на ряд преимуществ технологий лазерной сварки, оптимизации и отработке данных процессов на практике сопутствует ряд технологических сложностей: наукоемкое и дорогостоящее оборудование, требуемое высокой квалификации персонала, а также высокие требования к материалам, качеству сборки соединения (зазор не более 0,25 мм) и технологическому оснащению для сварки пространственных соединений сложной формы (подача сварочной проволоки в зону сварки с точностью 0,2 мм; ограниченная масса используемых элементов в оснащении; подача защитного газа в зону сварки; жёсткость и прочность конструкции для исключения эффекта раскачивания).

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка компоновочной схемы оборудования и технологической оснастки
2. Разработка и изготовление технологической оснастки
3. Создание образцов простой формы из коррозионностойкой стали и их испытания
4. Изготовление образцов сложной пространственной формы
5. Выбор оптимальных режимов термической обработки сварных соединений

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		41

2 Выбор материала, оборудования и методик для проведения исследования

2.1 Химический состав и механические свойства сплава ХН50ВМКТЮР

Свариваемость жаропрочных сплавов в основном определяется их стойкостью к образованию трещин при сварке и последующей термической обработке. Наибольшее влияние при этом оказывает содержание в сплавах титана и алюминия (таблица 2.1). Исходя из сказанного, гомогенные никелевые сплавы ХН7ВТ, ХН75М6ТЮ, ХН60ВТ и др., а также кобальтовые с карбидным упрочнением (типа L-605) в основном принято считать хорошо свариваемыми, т.к. они обладают незначительной склонностью к образованию горячих трещин и не образуют трещин при термической обработке сварных узлов и деталей

Таблица 2.1 – Химический состав сплава ХН50ВМКТЮР

Химический состав, % (ТУ14-1-1747-76)								
C	Cr	W	Mo	Co	Al	Ti	Ni	
≤0,1	17,5-19,5	5,5-7	3,5-5	5-8	2,5-3	1-1,5	Основа	
2								
Nb	Mn	Fe	Si	Cu	Ce*	B*	S	P
не более								
1,5	0,3	3,0	0,3	0,07	0,02	0,005	0,015	0,015
* Вводятся по расчету.								

Стареющие никелевые жаропрочные сплавы с суммарным содержанием титана и алюминия до 4,5 % считаются материалами с удовлетворительной свариваемостью. От суммы этих элементов зависит склонность сплавов к образованию горячих или термических трещин, предотвратить которые или существенно уменьшить их число можно с помощью указанных выше металлургических и технологических приемов. Несмотря на некоторое усложнение технологии сварки и термической обработки, эти сплавы широко применяют в сварных конструкциях, что обусловлено достаточно высокой их жаропрочностью. Механические свойства сплава ХН50ВМКТЮР в исходном и термообработанном состоянии приведен в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Механические свойства стали ХН50ВМКТЮР

Механические свойства* по ТУ											
Вид полуфабриката	ТУ	Состояние контрольных образцов	Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$	σ_B	σ_{50}	σ_{60}	δ_5	ψ	КСУ	Размер зерна, балл**
				кгс/мм ²				%		кгс·м/см ²	
				не менее							
Лист холоднокатанный толщиной 0,8-3 мм	ТУ14-1-1747-76	В состоянии поставки	20	-	≤120	-	-	35	-	-	3-8
		Термически обработанный по режиму: закалка с 1090±10°С (20мин) в воде, старение при 760±10°С, 8-12 часов	900	-	50	-	-	9	-	-	-
Поковка, шайба	ТУ296-71	Термически обработанные по режиму: закалка с 1080-1100°С на воздухе	20	80	100	-	-	10	10	3,5	-
			900	40	50	-	-	10	15	3,5	-
			930	-	-	20****	-	-	-	-	-

σ_B – предел кратковременной прочности
 ** ГОСТ 5639-82.
 *** δ_{10} ($l_{расч} = 11,3\sqrt{F}$).
 **** $\sigma_{1/15}$.

Никелевый сплав марки ХН50ВМКТЮР с карбидным упрочнением принято считать хорошо свариваемым, т.к. он обладает незначительной склонностью к образованию горячих трещин и не образует трещин при термической обработке сварных узлов и деталей.

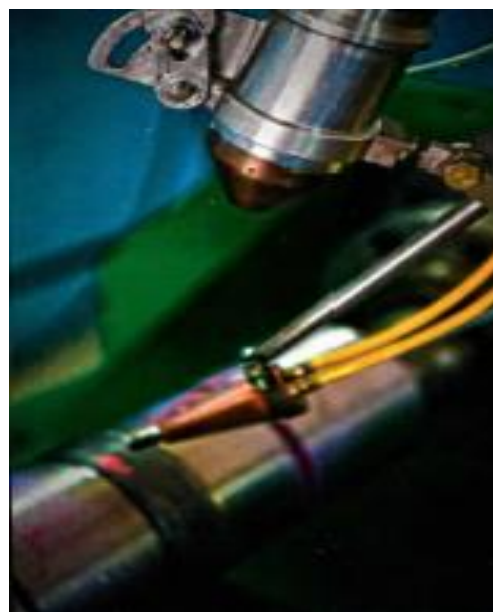
2.2 Оборудование для выполнения лазерной сварки

Роботизированный лазерный комплекс, представленный на рисунке 2.1, состоит из:

- современный шестиосевой робот-манипулятор АBB IRB4600 (Швейцария);
- вращатель с регулируемой частотой вращения для точного позиционирования деталей;
- мощный непрерывный иттербиевый волоконный лазер ЛС-2 (рисунок 2.2) производство ООО НТО «ИРЭ-Полус», Россия;
- программное обеспечение, позволяющее синхронизировать все элементы комплекса и работать в автоматическом режиме.



а



б

а – лазерный комплекс; б – лазерная головка

Рисунок 2.1 – Роботизированный лазерный комплекс



Рисунок 2.2 – Иттербиевый волоконный лазер ЛС - 2

Параметры лазерной установки представленные в таблицах 2.3 – 2.4

Таблица 2.3 – Параметры лазерной установки

Наименование лазерной установки	Зав.№	Длина волны, нм	Мощность, Вт	Режим генерации лазера	Класс опасности
ЛС-2	806054508	1070	2000 Вт	непрерывный	IV

Таблица 2.4 – Дополнительные параметры лазерной установки

Параметры конкретного технологического процесса	Значение параметра
Диаметр пучка излучения, мкм	50
Диаметр пятна на мишени, мм	2-5
Расстояние от пятна засветки до роговицы глаза, см	не менее 50
Расходимость пучка, мм·м/рад	2,5
Фоновая освещенность, лк	500
Продолжительность облучения, с	от 300 до 3600
Нестабильность излучения, %	± 2

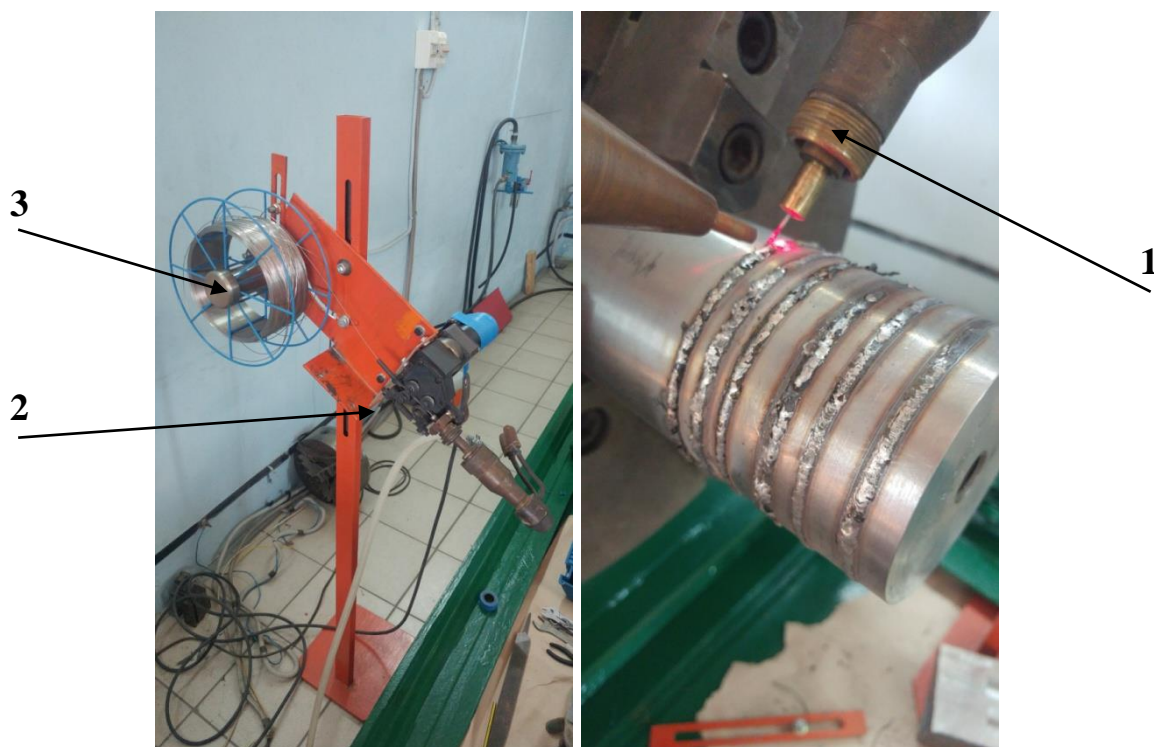
Преимущества метода:

- обеспечение адгезионной прочности основного и присадочного металла;
- исключение образования пор и трещин;
- низкие остаточные напряжения и деформация;
- в большинстве случаев не требуется термическая обработка перед сваркой;
- увеличение коэффициента использования присадочного материала;
- снижение стоимости готового изделия за счет наплавки локальных зон.

2.3 Проектирование установки для роботизированной лазерной сварки

2.3.1 Создание экспериментальной стационарной сварочной установки

В целях определения необходимых диапазонов регулировки углов и вылета подающего устройства, была создана стационарная установка без возможности движения вместе с роботом-манипулятором. Её общую компоновку можно увидеть на рисунке 2.3.



1- Сопло с охлаждением; 2 – Двигатель подачи проволоки, 3 – Присадочная проволока

Рисунок 2.3 – Общий вид экспериментального приспособления

В процессе отработки были выработаны основные требования к проектируемому оснащению:

- Подача сварочной проволоки в зону сварки с точностью 0,2 мм;
- Подача защитного газа в зону сварки;
- Масса оснащения, в силу технических параметров роботоманипулятора, не должна превышать 9,5 кг;
- Конструкция должна быть жёсткой и прочной чтобы исключить эффект раскачивания.

2.3.2 Проектирование и изготовление необходимого оснащения

По полученным результатам отработки режимов сварки на стационарной установке было спроектировано необходимое оснащение (рисунок 2.4) для монтажа на манипулятор автомата подачи сварочной проволоки и оптической головки промышленного лазера ИРЭ-Полус мощностью 2 кВт. Разработка оснащения выполнена в САД/САМ системе КОМПАС-3D.

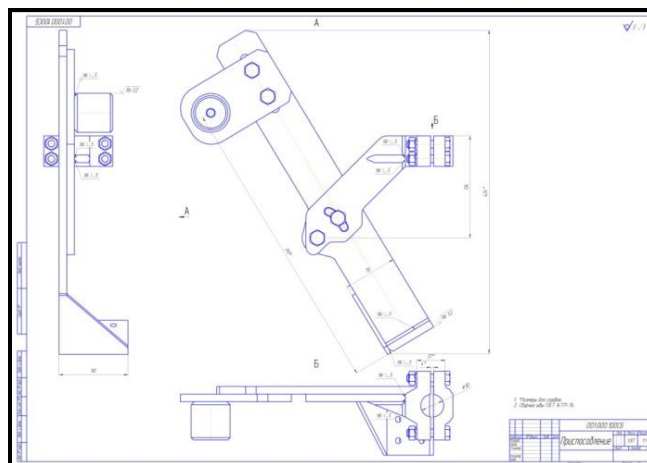


Рисунок 2.4 – КД на приспособление

После проектировки приспособления в двухмерном пространстве приступили к проектированию в трехмерном режиме и компоновки приспособления смонтированного на манипуляторе робота (рисунке 2.5.)

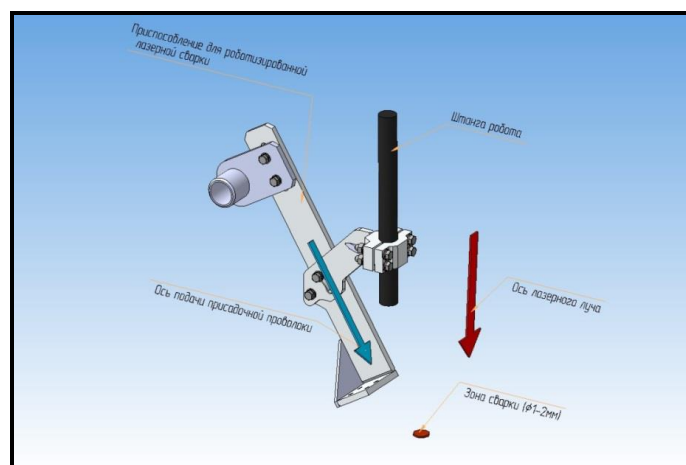


Рисунок 2.5 – Компоновка приспособления

После проектирования приспособления на компьютере приступили к его изготовлению.

2.3.3 Изготовление оснащения

Всё необходимое оснащение, изображённое на рисунках 2.6, было изготовлено на производственных мощностях ООО «Технология». В целях снижения массы конструкции использовались материалы АМгб и латунь.



Рисунок 2.6 – Кронштейн крепления к роботу манипулятору автомата подачи присадочного материала

В связи с тем, что выбранный для эксперимента сплав ХН50ВМКТЮР является высоколегированным материалом появилась необходимость в защите корня сварного соединения и его охлаждении. В связи с вышеизложенным была изготовлена шина с охлаждением и возможностью поддува защитного газа (аргона) изображенная на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Шина с охлаждением и поддувом

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

2.3.4 Сборка подвижного сварочного приспособления на робот ABB robotics

Сборка оснащения произведена на лазерном участке ООО «Технология». В процессе сборки выполнен ряд регулировок, таких как:

- Выставка фокусного расстояния оптической лазерной головки;
- Регулировка угла закрутки подающего устройства;
- Регулировка вылета подающего устройства.

Общий вид собранной на роботе-манипуляторе сварочной установки можно увидеть на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Смонтированное сварочное приспособление

Данная установка использовалась в дальнейшей работе для проведения испытаний лазерной сварки.

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

2.4 Подготовка поверхности металла и оборудования к процессу лазерной сварки

Качество и надежность сварных соединений, выполняемых лазерным лучом, в значительной степени определяются точностью сборки элементов под сварку. Необходимая точность сборки достигается подготовкой свариваемых кромок на металлорежущих станках (строганием, фрезерованием, точением).

Поверхность металла в зоне сварки следует очищать от окалины, ржавчины, других загрязнений, а также от влаги. Указанные загрязнения и влага создают условия для образования пористости, оксидных включений, а в некоторых случаях и холодных трещин в металле шва и зоне термического влияния за счет насыщения водородом.

Зачищать свариваемые поверхности следует щетками из нержавеющей стали на участке не менее 15 мм как выше, так и ниже свариваемых кромок. Зачищаются также торцевые поверхности, прилегающие к свариваемым участкам. После зачистки место сварки рекомендуется обезжирить.

Сборка под сварку должна обеспечивать возможность тщательной подгонки кромок по всей длине шва с минимальным зазором и перекосом кромок. При толщине свариваемого материала $>1,0$ мм зазор не должен превышать от 5 % до 7 % толщины (не более 0,3 мм). Смещение одной кромки относительно другой по высоте не должно превышать от 20 % до 25 % от толщины свариваемых деталей (не более 0,5 мм).

При сборке под сварку не рекомендуются прихватки. В случае необходимости прихватки следует выполнять лучом лазера.

Предпочтительное соединение – стыковое. Нахлесточные и замковые соединения углеродистых сталей не рекомендуются из-за высокой чувствительности к концентраторам напряжений.

Защищать поверхности шва от окисления следует гелием или смесью гелия с аргоном в соотношении 2:1, а также аргона с углекислым газом при соотношении 3:1, подаваемыми через специальное сопло. Корень шва с обратной стороны рекомендуется защищать аргоном. В некоторых случаях при сварке низкоуглеродистых сталей допускается отсутствие защиты шва.

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2.5 Обработка технологических параметров лазерной сварки

На начальном этапе необходимо определить 3 основные характеристики:

- Скорость подачи проволоки;
- Мощность излучения лазера;
- Скорость вращения заготовки.

Для определения данных характеристик был выбран случай продольной наплавки сварочной проволоки 08Г2С Ф1,6мм с флюсом на вращающуюся цилиндрическую деталь Ф100мм из материала

Сталь 38ХМА. 38ХМА (38ХМ) - хромомолибденовая конструкционная легированная сталь. ГОСТ 4543-71. Имеет высокие прочностные и вязкопластические свойства, а также высокий предел выносливости на воздухе. В машиностроении применяется в ответственных деталях общего назначения, работа которых происходит при температуре до 400 °С. В станкостроительной промышленности 38ХМА применяется для изготовления валов, шестерен, кулачковых муфт, ответственных крепежных изделий. В энергетике данная сталь нашла применение для компрессорного оборудования и деталей турбин, работа которых проходит в температурном диапазоне до 400 °С. Также высокопрочная сталь 38ХМА предназначается для изготовления кованых заготовок длинномерных гребных валов со сквозным осевым отверстием (и без него) для морских судов любого назначения. Помимо этого, используется для производства деталей и узлов запорной арматуры для топливных и других трубопроводов. Режимы подачи присадочного материала, скорости вращения и мощность излучения лазера указаны в таблице 2.5. Внешний вид наплавки изображён на рисунке 2.9.

Таблица 2.5 – режимы сварочного оборудования

№ образца	Скорость подачи, м/мин	Скорость вращения об/мин	Мощность излучения, кВт
1	1,2	5	1,2
2	1,8	5	1,2
3	1,6	5	1,2
4	1,6	5	1,8
5	1,55	5	1,8
6	1,5	5	1,8



Рисунок 2.9 – Образцы наплавленных валиков 1-6 (справа-налево)

По результату обработки был получен синхронизированный режим сварочного оборудования №6 таблицы 2.7, при котором происходит равномерное сплавление присадочной проволоки и основного материала заготовки. На рисунке 2.9 наплавленный на отработанном режиме валик 1ый слева.

Отработанный режим сварочного оборудования для наплавки на материал 38ХМА имеет следующие параметры:

- Скорость подачи, м/мин: 1,5
- Скорость вращения об/мин: 5
- Мощность излучения, кВт: 1,8.

2.6 Отработка режимов лазерной сварки стыковых соединений на примере материала 12Х18Н10Т

Для отработки режимов лазерной сварки продольных швов был выбран материал 12Х18Н10Т в силу его доступности, изученности с точки зрения металлографии и технологии сварки, а также предполагаемой схожести по применению и химическому составу с материалом ХН50ВМКТЮР. 12Х18Н10Т –коррозионностойкая сталь аустенитного класса, применяемая во множестве отраслей промышленности, в первую очередь металлургической, пищевой, фармацевтической и химической. Детали, изготовленные из этой марки стали, можно эксплуатировать в различных агрессивных средах, а также при высоких температурах (до +600 °С).

Внешний вид образцов из 12Х18Н10Т толщиной 2мм подготовленных к сварке изображен на рисунке 2.10.

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

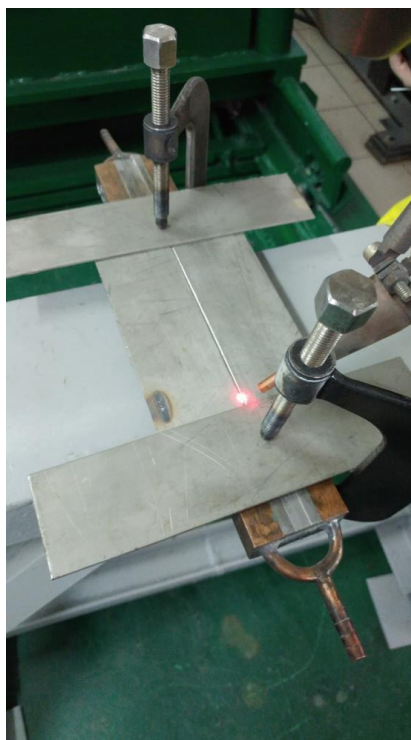


Рисунок 2.10 – Образец, закреплён на шине и подготовлен под сварку

В процессе отработки режимов лазерной сварки были получены оптимальное согласование режимов сварочного оборудования и перемещения робота-манипулятора. Результаты экспериментов и наглядное обоснование выбранного режима представлены на рисунке 2.11. Режимы сведены в таблицу 2.6. Оптимальным является режим №1. Внешний вид образцов можно видеть на рисунке 2.11.

Таблица 2.6 – Оптимальный режим сварки

№ образца	Скорость перемещения, м/мин	Подача защитного газа л/мин	Мощность излучения, кВт
1	3,5	5	1,0
2	3,6	5	1,0

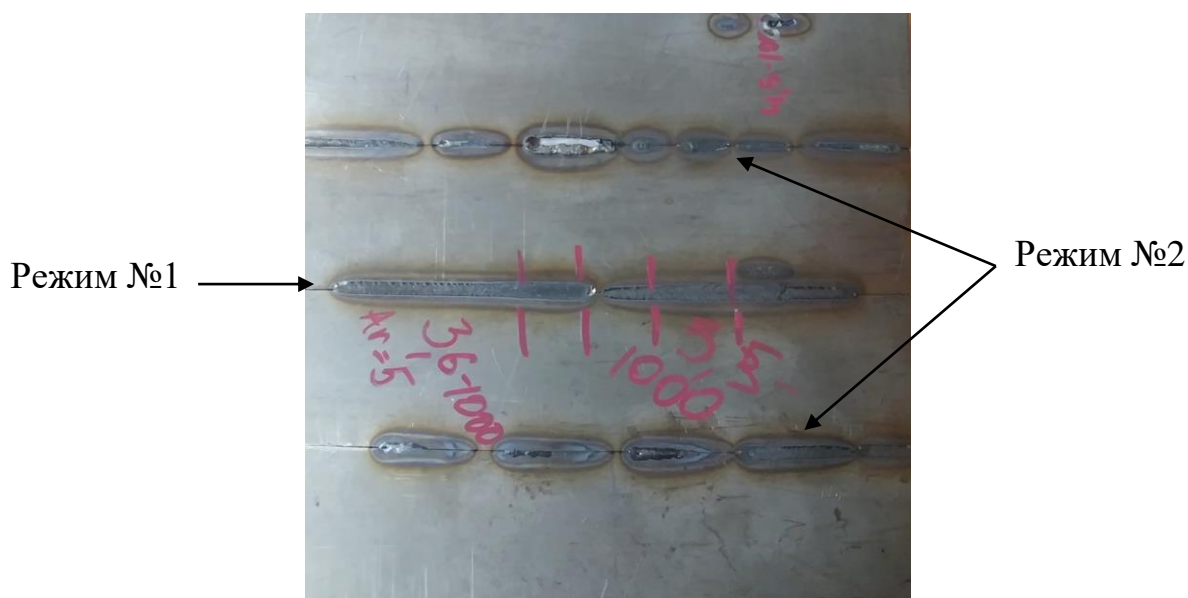


Рисунок 2.11 – Отработка режимов и образцы соединений

Полученные образцы исследовались на базе лаборатории кафедры МТМ АКИ ОГУ на электронном микроскопе JEOL JCM-6000 NeoScore (рисунок 2.12)



Рисунок 2.12 – Электронный микроскоп JEOL JCM-6000 NeoScore

2.7 Апробация разработанных режимов лазерной сварки на материале ХН50ВМКТЮР

В связи с производственной необходимостью для отработки режимов лазерной сварки продольных швов ХН50ВМКТЮР-ИД был выбран материал толщиной 2 мм. Образцы сварных соединений можно рассмотреть на рисунке 2.13. Режимы сведены в таблицу 2.7.

Таблица 2.7 – Режимы лазерной сварки

№ образца	Скорость перемещения, м/мин	Подача защитного газа л/мин	Мощность излучения, кВт
1	3,5	10	0,7
2	3,5	10	0,8



Рисунок 2.13 – Образец сварного соединения материала ХН50ВМКТЮР

Оптимальным режимом является №2, т.к при меньшей мощности лазера происходит непровар сварного соединения, а при величинах мощности лазерного излучения более 800 Вт сварной шов становится пористым. На величинах более 1кВт происходят прожоги.

2.8 Магнитоанизатропный метод определения механических напряжений с помощью прибора «StressVision»

В 1865 году был обнаружен так называемый магнитоупругий эффект (или эффект Э.Виллари) [15]. Этот физический эффект заключается в том, что при деформировании, а, следовательно, при нагружении, ферромагнитного материала изменяются магнитные свойства ферромагнетика, например, намагниченность и коэффициент магнитной проницаемости.

Более детальные исследования привели к обнаружению зависимости магнитных свойств от выделенного в образце (ферромагнетике) направления, например намагниченности. Это явление получило название – магнитная анизотропия. Она может возникнуть как вследствие магнитоупругих деформаций, так и из-за внешние и внутренние напряжения (наведенная магнитная анизотропия), а также из-за анизотропии формы образца. Другими словами, измеряя параметры магнитных свойств, можно решить обратную задачу – установить уровень деформирования или величину напряжений в ферромагнитном материале. Эти и многие другие взаимосвязи между магнитными и физико–механическими свойствами описаны к примеру, в статьях [11].

Существует несколько реализаций средств измерений на основе магнитоанизотропного метода оценки и измерения механических напряжений. Известные приборы, разработанные за последние 60 лет в нескольких странах мира, обладают индивидуальными отличительными свойствами, техническими и метрологическими характеристиками, некоторые из них описаны в. В данной статье рассматривается техническая реализация магнитоанизотропного метода Жукова (Жуков С.В., Жуков В.С.) [23]. Рассматриваемая реализация магнитоанизотропного метода заключается в использовании эффекта деформации доменной структуры металла под воздействием механических напряжений. Эта деформация приводит к изменению направлений осей намагниченности. Если в металле создать переменное магнитное поле по какому–либо направлению, а затем изучить диаграмму его намагниченности, то можно обнаружить, что вектор магнитной индукции под воздействием возрастающих механических напряжений согласованно поворачивается. Угол поворота и величина вектора магнитной индукции могут быть косвенной мерой механических напряжений в ферромагнетике. Достоинство магнитоанизотропного метода Жукова состоит в том, что с его помощью можно не только оценить действующие механические напряжения, но и без дополнительной обработки определить разность главных механических напряжений (РГМН) для плоского напряженного состояния конструкции, произвести визуализацию напряженного состояния исследуемой зоны контроля.

Процесс формирования выходного сигнала магнитоанизотропного преобразователя с магнитопроводом крестового типа описан в нескольких патентах к примеру, в [25]: на одном плече магнитопровода размещена об-

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

мотка намагничивания среды, на другом плече размещена система измерительной обмотки (рисунок 2.14).

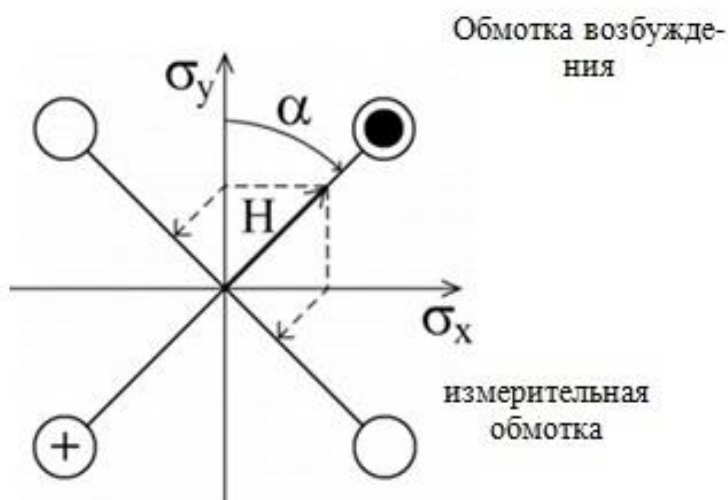


Рисунок 2.14 – Схема магнитоанизотропного преобразователя

Полюса возбуждающей и измерительных обмоток магнитопроводов расположены крест-накрест и взаимно перпендикулярно друг относительно друга, причем плоскость обоих плеч совпадает с плоскостью участка металла на поверхности объекта контроля.

Позиционирование преобразователя в процессе проведения измерений осуществляется по направляющим рискам, расположенным на его корпусе (рисунок 2.15). Главная риска размещается по направлению действия максимального главного механического напряжения, вспомогательные риски – перпендикулярны ему. Максимальные напряжения выявляются экспериментально или расчетным способом. Например, максимальные напряжения в прокатном листе направлены вдоль направления проката, в сварном соединении максимальные растягивающие напряжения расположены вдоль сварного шва [28], в процессе стендовых испытаний на статическое растяжение или сжатие – вдоль направления приложенной нагрузки.

Принцип действия магнитоанизотропного преобразователя (рисунок 2.15) поясняется по аналогии с другими известными магнитоанизотропными датчиками [25].



Рисунок 2.15 – Магнитоанизотропный преобразователь

На рисунке 2.16 А изображены линии магнитного потока \vec{MF} , создаваемого первичной обмоткой преобразователя в изотропном материале.

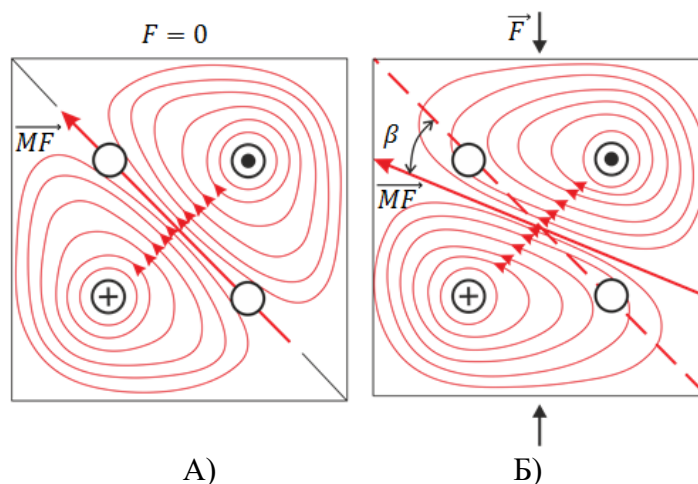


Рисунок 2.16 – Распределение магнитного потока в магнитоанизотропном преобразователе

Поскольку магнитные сопротивления в изотропном материале одинаковы во всех направлениях, то путь магнитного потока, создаваемого первичной обмоткой, можно качественно иллюстрировать эксцентрично расположенными замкнутыми линиями. В этом случае плоскость вторичной обмотки не пронизывается этим потоком и, следовательно, электрическое напряжение на обмотке отсутствует. При нагружении материала измеряемой силой магнитная проницаемость в направлении силы \vec{F} (рисунок 2.16 Б) уменьшается, а в перпендикулярном направлении увеличивается. Вследствие этого, материал становится анизотропным по отношению к магнитному потоку: магнитные сопротивления становятся зависимыми от направления приложенной нагрузки. По мере изменения силы \vec{F} изменяется доля магнитного потока, пересекающего плоскость измерительной обмотки.

Установлено, что связь между механическими напряжениями и магнитными свойствами среды характеризуется магнитоупругой чувствительностью:

$$\lambda_B = \frac{\partial B}{\partial \sigma}, \quad (2.1)$$

где λ_B – линейная магнитоупругость, характеризующая магнитоупругую чувствительность;

B – магнитная индукция, характеризующаяся величиной и направлением, Тл;

σ – нормальное механическое напряжение, МПа.

Принцип действия магнитоанизотропного преобразователя основан на измерении ЭДС, индуцируемой в измерительной обмотке и на эффекте поворота вектора магнитной индукции B , под действием внешних и внутренних сил. Величина напряжения U (мВ) на выходе измерительной обмотки ω преобразователя описывается формулой:

$$U = KBSf\omega \sin\beta, \quad (2.2)$$

где K – коэффициент пропорциональности;

B – магнитная индукция, Тл;

S – сечение магнитопровода, мм²;

f – частота переменного тока, Гц;

ω – количество витков на измерительной обмотке;

β – угол между плоскостью измерительной обмотки и вектором магнитной индукции.

Выходной сигнал «крестового» магнитоанизотропного преобразователя имеет корреляцию с разностью главных механических напряжений (РГМН)

$$U = K'(\sigma_x - \sigma_y), \quad (2.3)$$

где K' – коэффициент, характеризующий магнитные свойства материала;

σ_x, σ_y – главные механические напряжения, при условии $\sigma_x > \sigma_y$, МПа.

Полученный результат очень полезен, так как согласно критерию наибольших касательных напряжений (критерию пластичности Треска) пластические деформации металлов и сплавов наступают тогда, когда наибольшее касательное напряжение достигает значения:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} = \frac{\sigma_0}{2}, \quad (2.4)$$

где σ_0 – предельное напряженное состояние;

σ_X, σ_Y – главные механические напряжения, при условии $\sigma_X > \sigma_Y$, МПа.

Отсюда следует, что условие условия перехода материала в предельное состояние, выраженное через эквивалентное напряжение при $\sigma_0 = \sigma_T$ будет:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_X - \sigma_Y = \sigma_T, \quad (2.5)$$

где $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ – значение напряжения, при котором образец материала в условиях одноосного напряженного состояния оказывается в равноопасном состоянии с рассматриваемым сложнапряженным состоянием в точке, называется эквивалентным напряжением.

Существует множество методов для проведения неразрушающего контроля с целью определения остаточных и технологических механических напряжений в металлоконструкциях и других объектах контроля. Наиболее распространены следующие методы: тензометрический, магнитоупругий, акустоупругий, рентгенодифрактометрический, нейтронографический. Приборы, принцип работы которых основан на данных методах имеют ряд своих преимуществ и ограничений, используются для определения различных компонентов механических напряжений, а также их совокупности.



Рисунок 2.17 – Сканер механических напряжений «Stressvision»

Результаты в данной работе получены с помощью сканера механических напряжений «Stressvision» (рисунок 2.17). Прибор разработан на основе магнитоанизотропного метода и предназначен для визуализации, измерения и оценки поля механических напряжений в металлоконструкциях по параметрам разности главных механических напряжений в области проведения сканирования. Данный прибор имеет высокую повторяемость результатов, а также низкую погрешность. Одним из преимуществ прибора является возможность построения картограмм РГМН для удобства представления результатов и возможности их последующего анализа и обработки.

3 Металлографические исследования коррозионностойких сталей и сплавов на различных этапах формирования сварного соединения

3.1 Оптическая металлография сварного соединения, полученного различными способами сварки

Для объективной оценки полученных результатов были исследованы образцы, наплавленные по описанной выше технологии, в которой в качестве присадочного материала вместо проволоки используется порошковая смесь ПР-30Х13Н2:ПР-НХ15СР2 в соотношении 3:1, представляющая собой самофлюсующую порошковую смесь с размером фракции 40-100 мкм. Химический состав порошков представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав наплаваемых порошков производства ООО «Полема» г.Тула, в % по массе

Порошок	Fe	C	Cr	Ni	Si	Mn
ПР-20Х13Н2	осн	0,23	12,87	2,18	0,70	0,68
ПР - НХ15СР2	4,94	0,71	14,6	осн	3,13	-

Данные порошки относятся к группе наплаваемого материала М04, опираясь на эти данные в качестве защитного газа был выбран аргон газообразный. (таблица 3.2)

Таблица 3.2 – Химический состав наплаваемого материала, в % по массе

Группа наплаваемого материала	Способы наплавки и соответствующие композиции		
	Наплавочный порошок	Фракция, мкм	Защитная среда
М04	6 20Х13; 30Х13, 12Х13	Смесь ПР-20Х13: ПР-НХ15СР2 (3:1)	40-100 Азот газообразный по ГОСТ 10157-2016

Исследование образцов проводилось в следующем объеме:

- Замер высоты наплавленного слоя;
- Исследование микро-, макроструктуры образцов;
- Измерение твердости.

Понятие «микроструктура» относится к распределению зерен в стали. Описание микроструктуры включает такие понятия как размер и форма зерна, а также идентификацию микроскопических составляющих, которые присутствуют в стали.

На рисунке 3.1 показан общий вид структуры образцов лазерной наплавки. Изучая рисунок можно увидеть, что величина зоны термического влияния (зоны ДЗ, Д5) при наплавке проволокой меньше на 0,17 мм. (16 %),

что положительно сказывается на механических свойствах. Зона сплавления показана на рисунке 3.2.

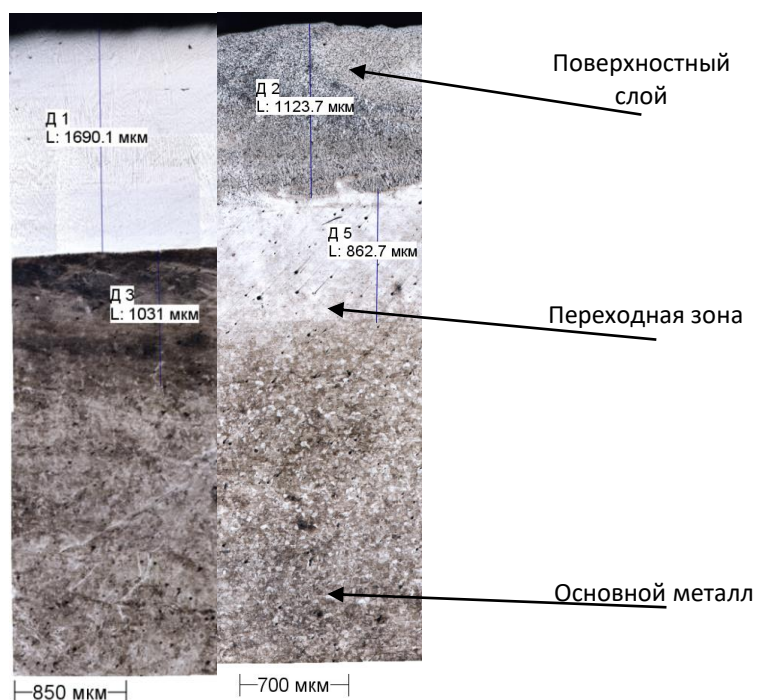


Рисунок 3.1 – Общий вид образцов при увеличении x100, полученных при помощи наплавки (порошок слева, проволока справа)

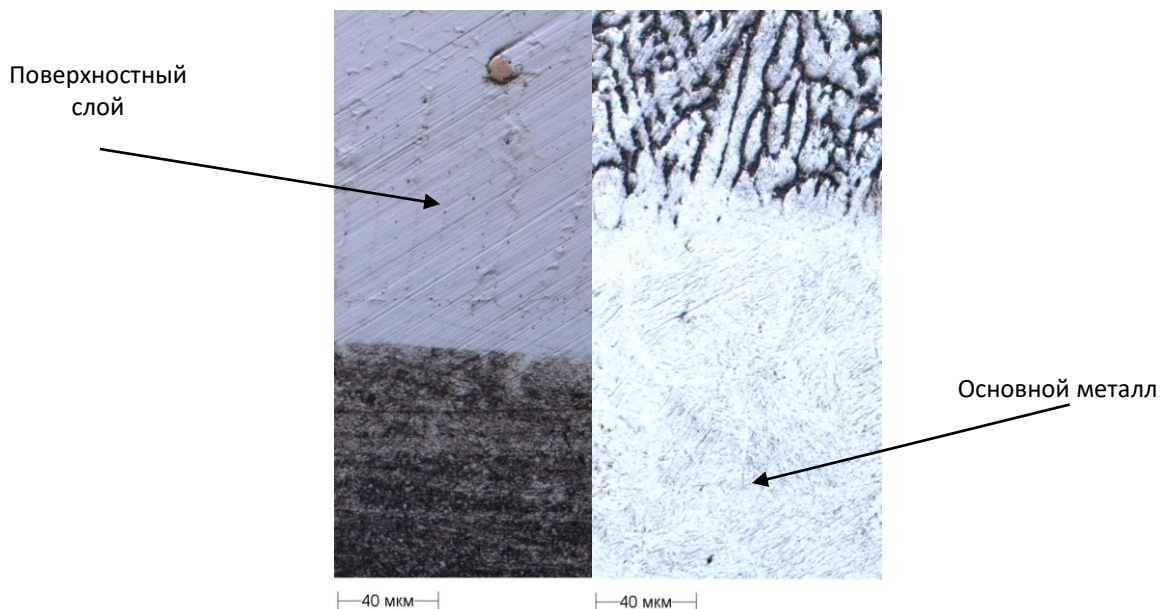


Рисунок 3.2 – Зона сплавления при увеличении x500. Порошок – слева, проволока – справа

Анализ зоны сплавления позволил выявить резкую границу перехода от основного материала к наплавленному при наплавке порошком и равно-

мерную при наплавке проволокой, что так же положительно сказывается на механических свойствах.

Литая структура наплавки имеет ярко выраженную дендритную структуру, но в случае с наплавкой порошковым присадочным материалом, направленную в основном по нормали вертикально, что негативно сказывается на качестве наплавки. Литая структура наплавленного слоя проволокой имеет равномерную дендритную структуру, что можно увидеть на рисунках 3.3-3.5 при увеличении $\times 200, 500, 1000$.

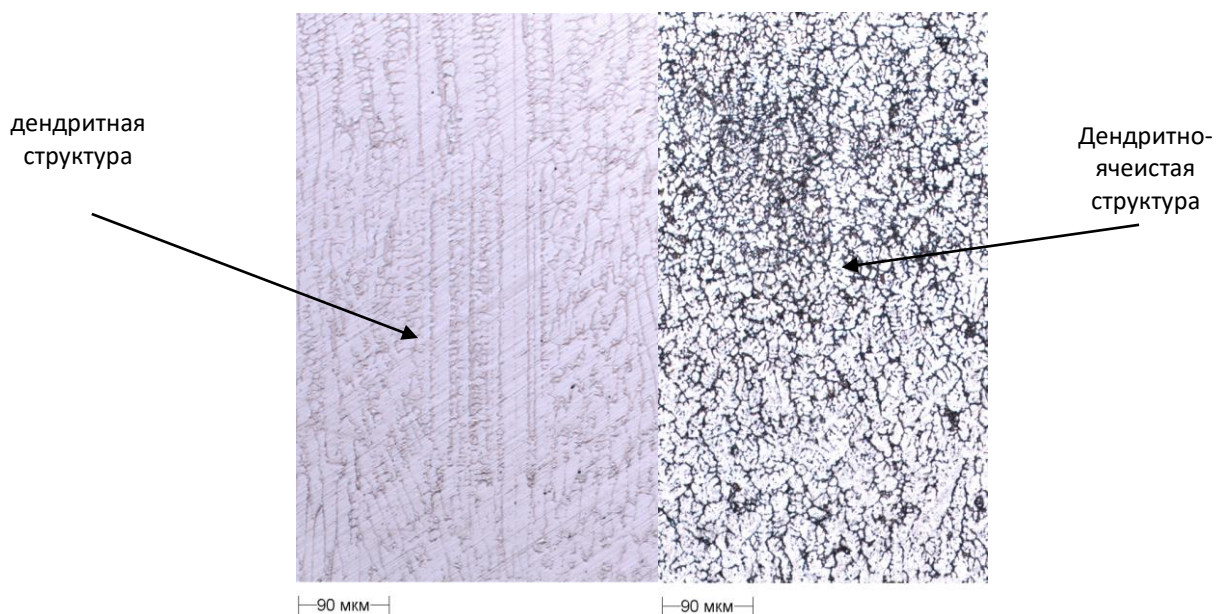


Рисунок 3.3 – Микроструктура наплавленного слоя при увеличении $\times 200$ порошком слева, проволокой справа

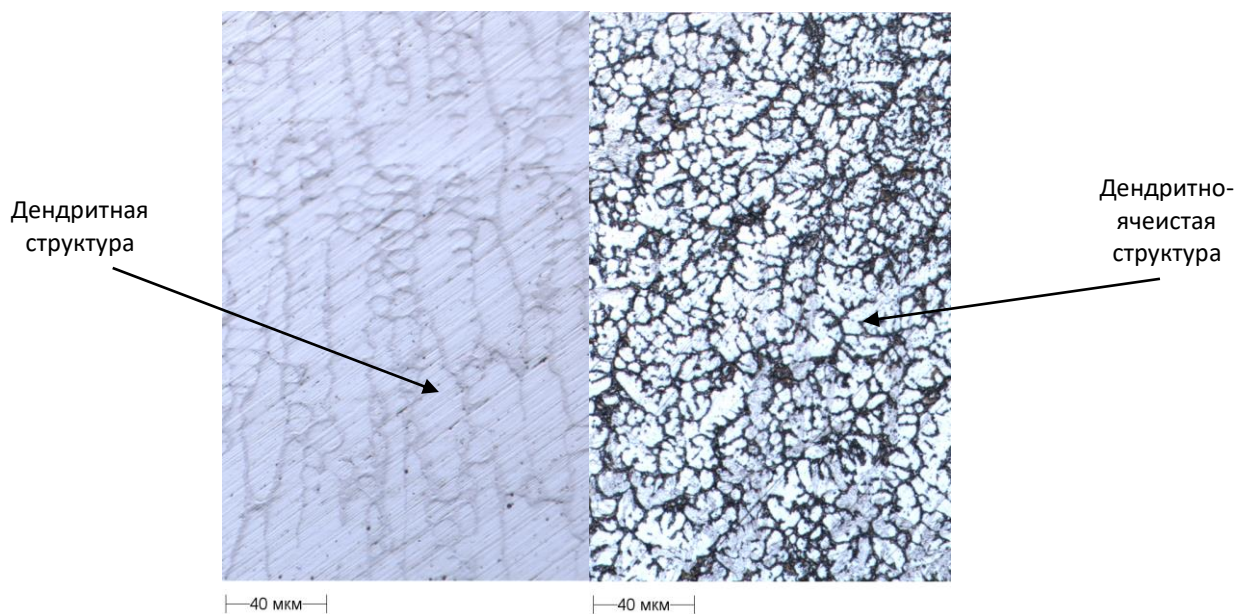


Рисунок 3.4 – Микроструктура наплавленного слоя при увеличении $\times 500$ порошком слева, проволокой справа

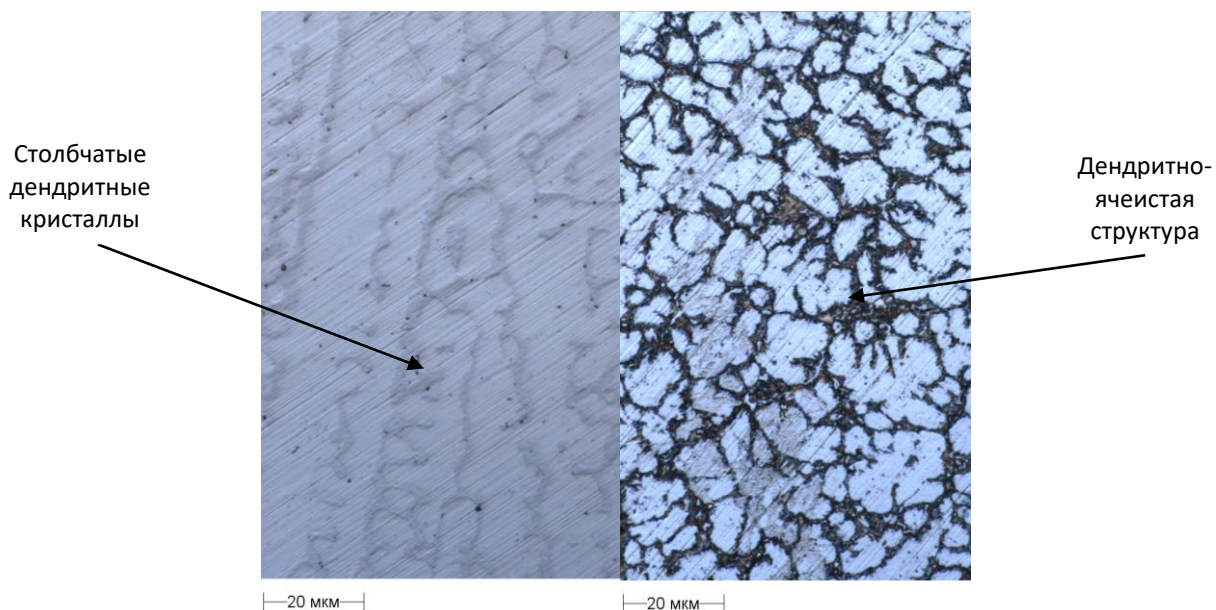


Рисунок 3.5 – Микроструктура наплавленного слоя при увеличении x1000 порошком слева, проволокой справа

Ближе к центру наплавки, остается небольшая зона дендритного строения толщиной 60 мкм, затем в зоне, прилегающей к основному металлу структура выравнивается и приобретает однородное мелкозернистое строение, отдельных крупных карбидных фаз не выявлено.

Структура представляет собой γ -твёрдый раствор на основе никеля и перенасыщенного α -твёрдого раствора на основе железа (мартенсита), между ними равномерно распределена дисперсная карбидная фаза.

Переходный слой также имеет мартенситную структуру приближенно к структуре наплавленного слоя. Мелкие карбидные включения растворяются при нагреве в аустенит, и выделяется в свободном виде при охлаждении, равномерно распределяясь в основном металле.

Основа металла имеет ферритно-цементитную структуру, с обособленными отдельными карбидными включениями, предположительно $Cr_{23}C_6$, не растворившийся в металлической основе.

Однако, при увеличении металлической основы в 500 раз видно четкое разделение на феррит и перлит пластинчатой морфологии.

В целях подтверждения заключений по результатам металлографии был произведён замер твёрдости по Виккерсу основного материала и наплавленного слоя образцов. Замеры твёрдости образца с порошковым присадочным материалом сведены в таблицу 3.1, а замеры с проволокой в таблицу 3.2.

Таблица 3.1 – Замеры твёрдости образца с порошковым присадочным материалом

	Нагрузка, Р (г)	Диагональ отпечатка (мкм)	Микротвёрдость по Виккерсу, HV (кг/мм ²)
порошок			
слой	100	26,4	266
	100	26,2	270
	100	26,0	267
Среднее значение			267
основной материал	1000	29,7	210
	1000	29,5	213
	1000	29,4	214
Среднее значение			212

Таблица 3.2 – Замеры твёрдости образца с проволокой

	Нагрузка, Р (г)	Диагональ отпечатка (мкм)	Микротвёрдость по Виккерсу, HV (кг/мм ²)
проволока			
слой	100	18,6	533
	100	18,6	533
	100	18,6	533
Среднее значение			533
основной материал	1000	29,6	211
	1000	29,3	215
	1000	29,2	216
Среднее значение			214

По полученным данным видно, что при наплавке проволокой мы имеем в ~2 раза более высокую твёрдость наплавленного слоя, чем в случае с использованием порошка в качестве присадочного материала – 533 HV против 267 HV. Для наглядности представлена гистограмма (рисунок 3.6)

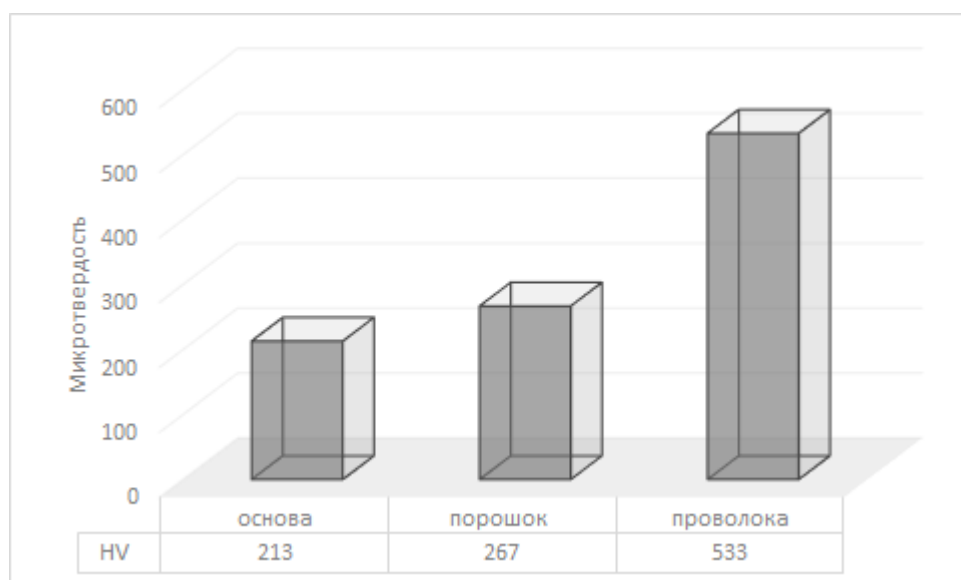


Рисунок 3.6 – Гистограмма сравнения микротвердости основного металла с наплавленным слоем порошком и проволокой

3.2 Структура образцов, полученных при апробации разработанных режимов лазерной сварки на материале ХН50ВМКТЮР

Полученные образцы были подвержены металлографическим исследованиям на базе кафедры МТМ АКИ ОГУ. Были рассмотрены микро-, макро-структуры сварных соединений на электронном микроскопе JEOL. Снимки металлографии можно увидеть на рисунках 3.7-3.10.

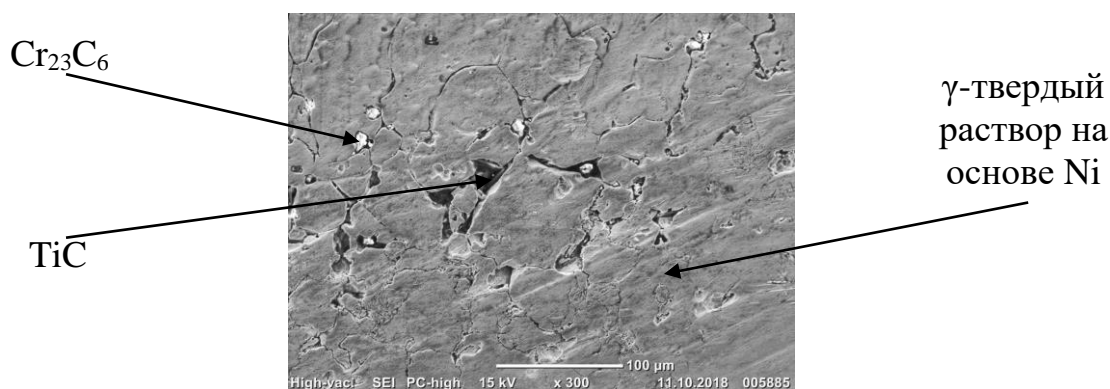


Рисунок 3.7 – Микроструктура образца сварного шва, выполненного ТIG сваркой

Для оценки преимуществ выбранного типа сварки был проведён сравнительный анализ полученных результатов металлографии образцов сваренных при помощи ручная сварки неплавящимися электродами и лазерной сварки. На рисунке 3.7 изображена микроструктура сварного соединения, выполненного при помощи ручной аргодуговой сварки.

В случае сравнения микроструктуры сварных соединений, выполненных ручной и роботизированной лазерной сварки можно отчетливо увидеть насколько крупнее зерна при TIG-сварки в сравнении с роботизированной сваркой при помощи лазера. Кроме того, из-за перегрева сварного шва образуется большое количество крупных карбидов хрома и никеля, что в совокупности негативно влияет на механические свойства сварного соединения.

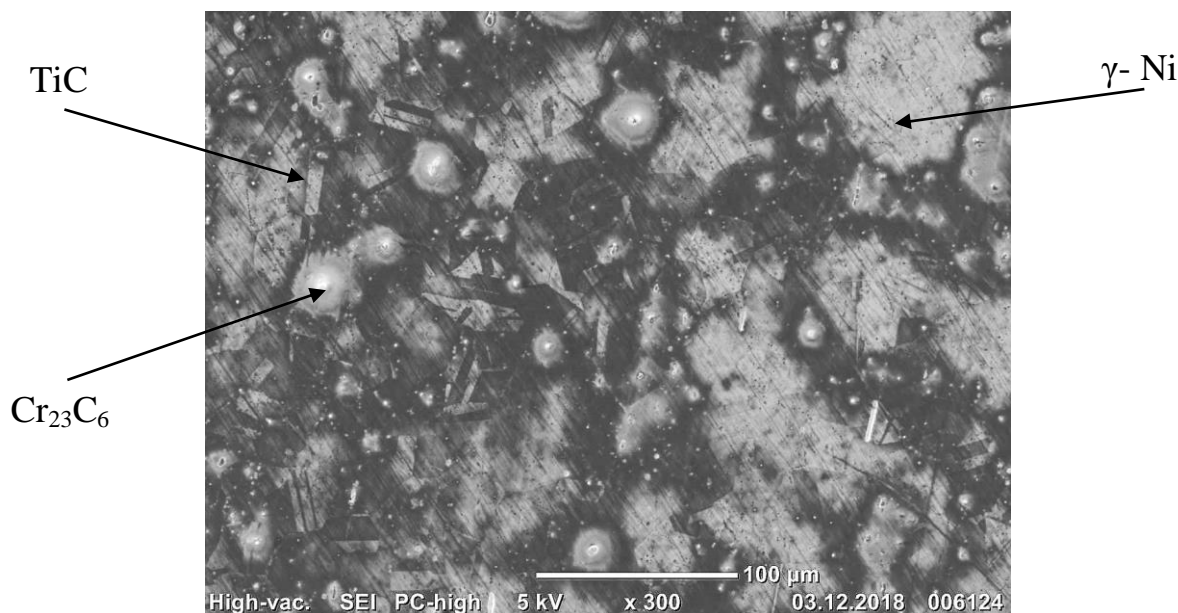


Рисунок 3.8 – Микроструктура основного материала при увеличении x300

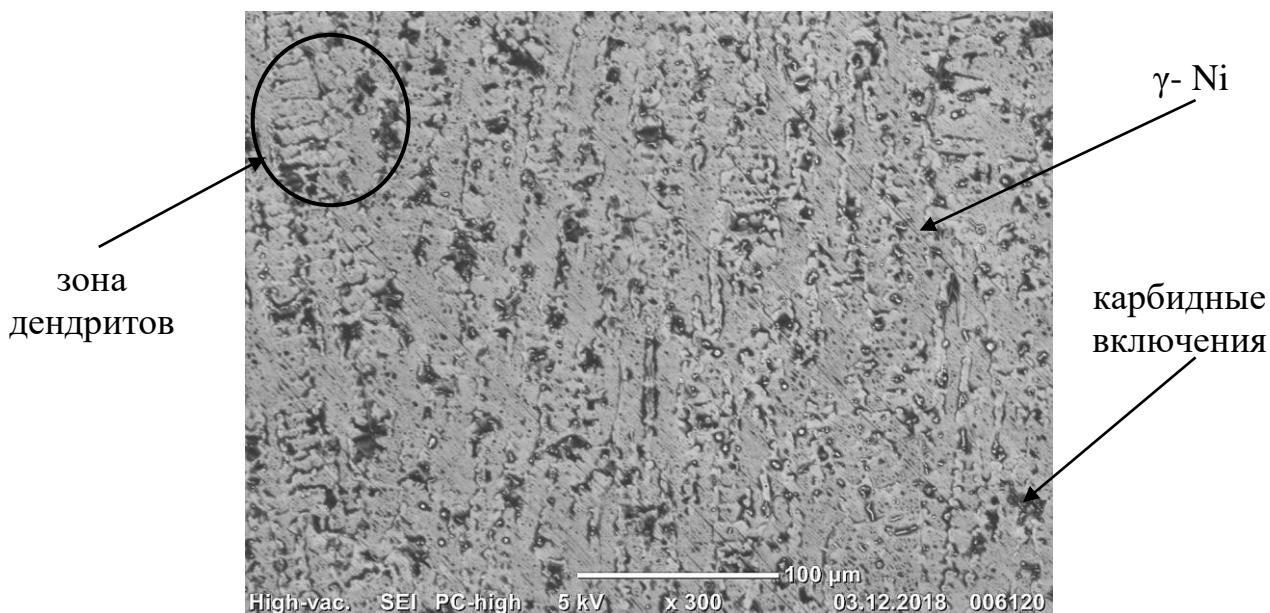


Рисунок 3.9 – Зона термического влияния при увеличении x300

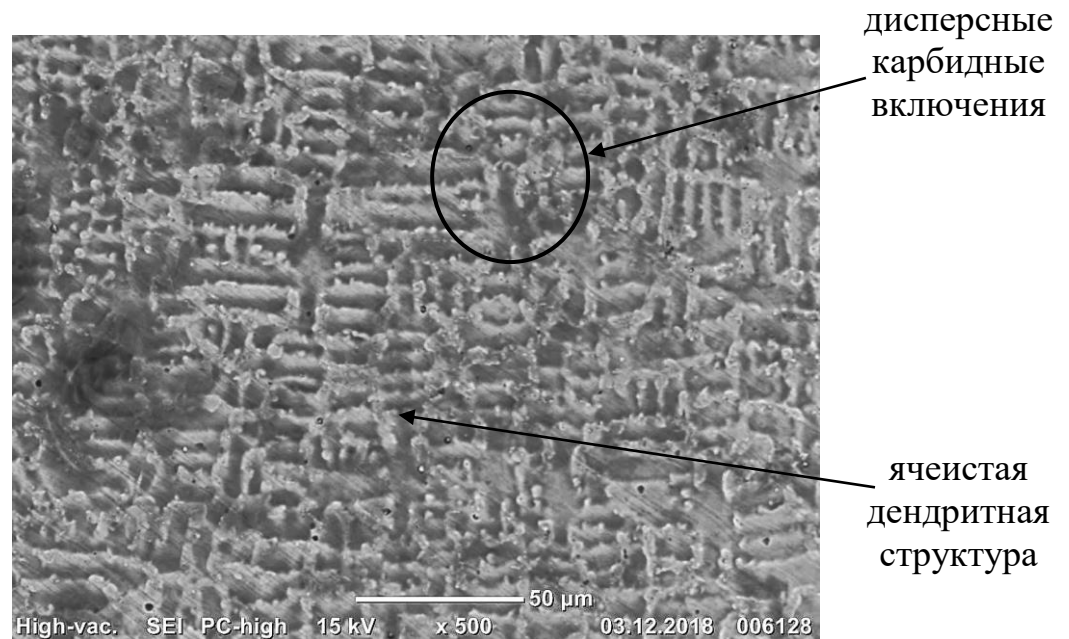


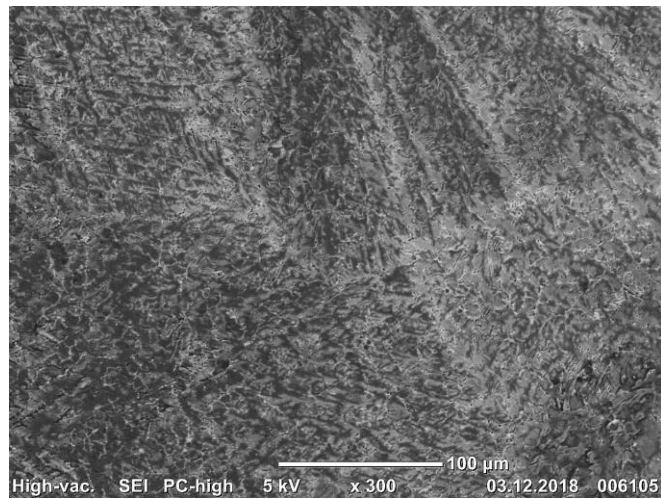
Рисунок 3.10 – литая структура сварного шва при увеличении $\times 300$

Так как при лазерной роботизированной сварке скорость распада аустенита находится в интервале от $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $550\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, этот факт способствует минимизации выделения в металле шва нежелательной γ' -фазы при охлаждении. Установлено, что по границам дендритной структуры при охлаждении в интервале от $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ интенсивно выделяются карбидные и интерметаллидные включения сложного химического состава, что вызывает местные напряжения по границам зерен вследствие разницы объемов с γ -фазой и формирует эффект упрочнения металла шва.

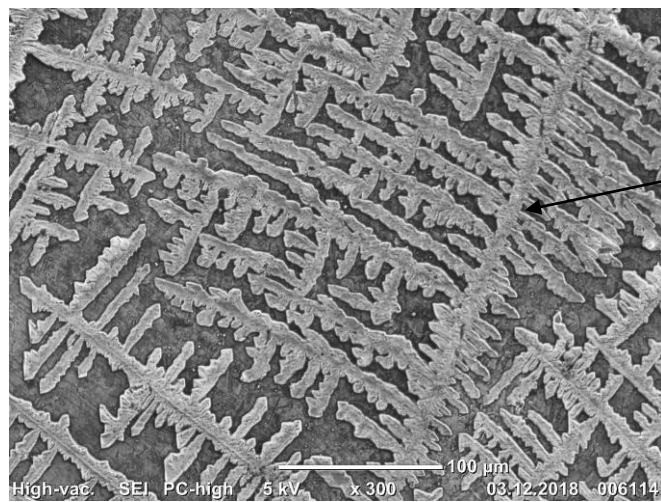
Результат проведенной работы по отработке режимов, получения образцов сварных соединений и изучения их макро- и микроструктуры позволяет сделать заключение о правильности подобранных режимов и применять их при сварке штатного материала ХН50ВМКТЮР в рамках исследования по получению режимов роботизированной лазерной сварки тонкостенных изделий.

3.3 Результаты металлографических исследований лазерных сварных соединений жаропрочных сплавов.

Была изучена микроструктура образцов сварных соединений, показавшая более качественную литую структуру сварного шва и значительно меньшую зону термического влияния по сравнению с классическими способами сварки как TIG и MIG/MAG. Микроструктуры сварных соединений показаны на рисунках 3.11.

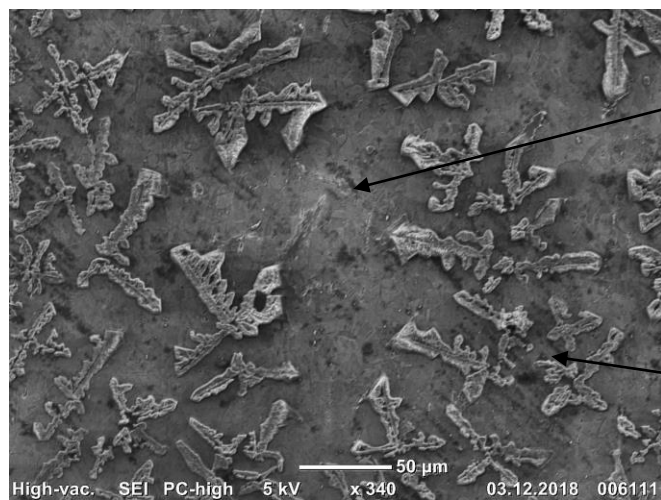


а



Ветви дендритов

б



Матрица

Обособленные дендритные образования

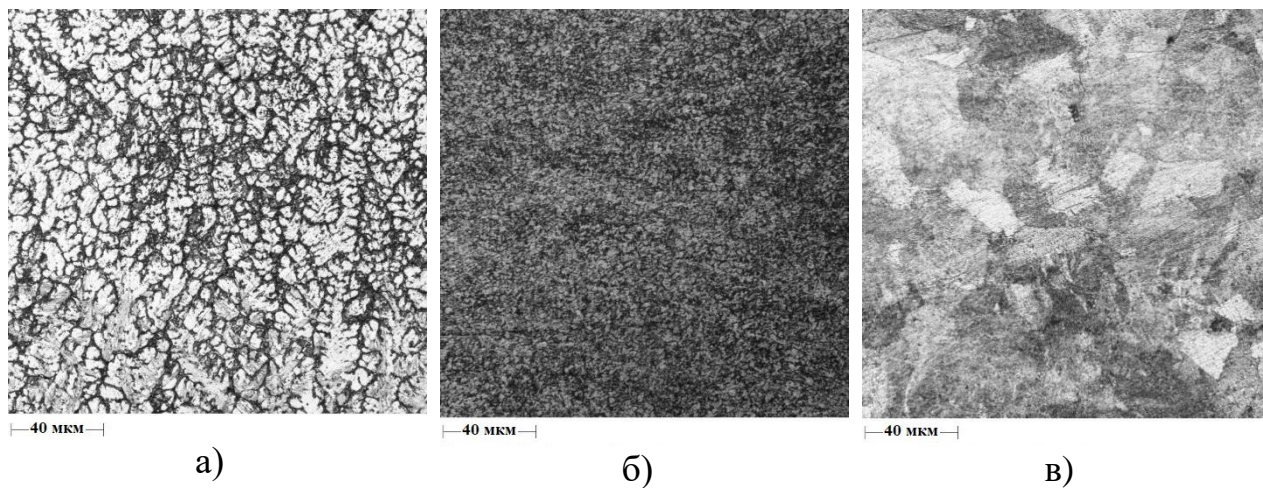
в

а – литая структура; б – °С зона термического влияния;
в – °С основной материал при увеличении x300

Рисунок 3.11 – Строение сварного шва, полученного TIG-сваркой

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

Металлографический анализ показал, что структура металла шва сплава ХН50ВМКТЮР после лазерной сварки имеет равномерное дендритное строение, зона термического влияния и прилегающая к ней область основного металла сохраняют аустенитную структуру различной степени дисперсности, рисунок 3.12.



а) – сварной шов; б) – зона термического влияния; в) – металлическая основа сплава

Рисунок 3.12 – Metallogрафия сварного соединения сплава ХН50ВМКТЮР, полученного лазерной сваркой

Кристаллическая структура металла шва определяет его механические свойства. При сварке кристаллическая структура и механические свойства металла шва изменяются в зависимости от состава сплава, способов и режимов сварки. Проведенное нами исследование микроструктуры полученных сварных соединений указывает на наличие в центре сварного шва дендритного строения литого металла, который к периферии становится несколько более грубым, затем следует зона рекристаллизованных зерен, переходящая в волокнистую структуру основного материала. Шов и зона сплавления имеют довольно мелкозернистое строение (величина зерна ~50 мкм). В литой зоне сварного шва не наблюдаются грубые интерметаллидные фазы, что объясняется высокими скоростями кристаллизации при лазерной сварке. Подобная структура считается благоприятной для обеспечения достаточного уровня механических свойств и предотвращения образования кристаллизационных трещин. Структурные изменения в зоне термического влияния при лазерной сварке происходят на участке, в 3-5 раз меньшем, чем при аргонно-дуговой сварке (рисунок 3.11). Увеличение размера зерен в этой области не наблюдалось.

4 Механическое поведение сварных соединений, полученных лазерной сваркой

4.1 Анализ механических свойств на различных этапах процесса лазерной сварки

Механические испытания (таблица 4.1) показали, что уровень свойств сварных соединений, полученных лазерной сваркой близок к характеристикам металла основы.

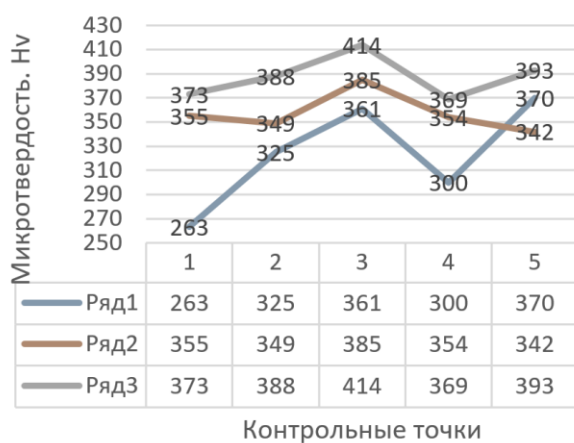
Таблица 4.1 – Сравнительные данные механических свойств сварных соединений и металла

Основной металл	Фактические значения	Требуемые значения
Предел прочности, МПа	510-520	490-588
Ударная вязкость, Дж/см ²		
КСУ ⁻⁶⁰	147-169	29,4
КСУ ⁻²⁰	144-151	39,2
Сварное соединение	Фактические значения	Требуемые значения
Предел прочности, МПа	608-628	≥588
Ударная вязкость с надрезом по центру шва, Дж/см ²		
КСУ ⁻²⁰	147-169	≥39,2
КСУ ⁻³⁰	144-151	
КСУ ⁻⁴⁰	144-151	
КСУ ⁻⁶⁰	144-151	

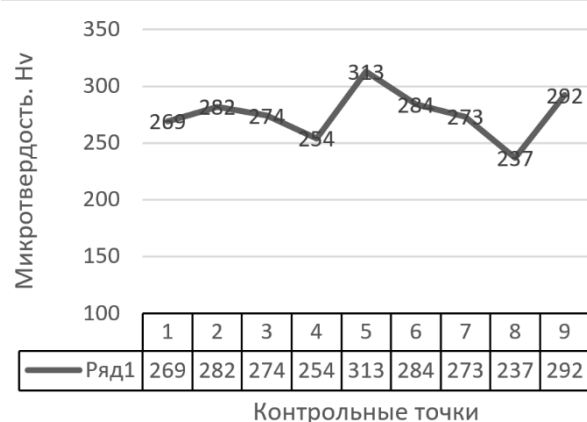
В работах ряда авторов описано положительное влияние увеличения скорости сварки на стойкость сварного соединения к образованию горячих трещин [10]. В данной работе полученные результаты согласуются с общепринятым утверждением и показывают, что реализация больших скоростей охлаждения сварного шва (на уровне 2000 °С/с) в температурном интервале хрупкости, оказала благоприятное влияние на стойкость неразъёмных соединений к образованию кристаллизационных трещин по причине формирования дисперсной первичной структуры, устойчивой к трещинообразованию.

В целях подтверждения заключений по результатам металлографии был произведён контроль распределения микротвердости в сварных соединениях, полученных лазерной сваркой на мощности 1,2 кВт с использованием присадочной проволоки и контактным способом, рисунок 4.1 По полу-

ченным данным видно, что сварка с присадочной проволокой обеспечивает более высокую твердость металла шва от 361 до 414 HV, чем в случае с использованием контактной сварки т 254 до 313 HV.



а)



б)

а – лазерная сварка с использованием присадочной проволоки; б – контактная

Рисунок 4.1 – Сравнительные значения распределения микротвердости сварного шва, зоны термического влияния и основного металла для различных способов лазерной сварки на мощности 1,2 кВт

С точки зрения равномерного распределения упрочнения и минимизации напряжений в области сварного шва, преимущество за контактном способом лазерной сварки без присадочной проволоки. Разница в свойствах объясняется увеличенными размеры сварочной ванны, в случае проплавления зоны сварки с присадкой, что, приводит к уменьшению скорости охлаждения металла сварного шва и, как результат обеспечивает определенный градиент температур между зоной сварки и основным металлом, достаточный для формирования более грубой литой структуры, состоящей из разветвленных дендритных кристаллов.

4.2 Визуализация распределения остаточных напряжений в сварном шве и различных зонах термического влияния

Исследование контура неразъемного сварного соединения проводилось с помощью сканера (индикатора) механических напряжений «Stressvision».

Был выбран образца сварочной конструкции из ХН50ВМКТЮР для проведения замеров в исходном состоянии и после термической обработки.

Сканирование образца в исходном состоянии выполнялось по сетке (15x15) с числом рядов 6 и количеством строк 6 (рисунок 4.2).

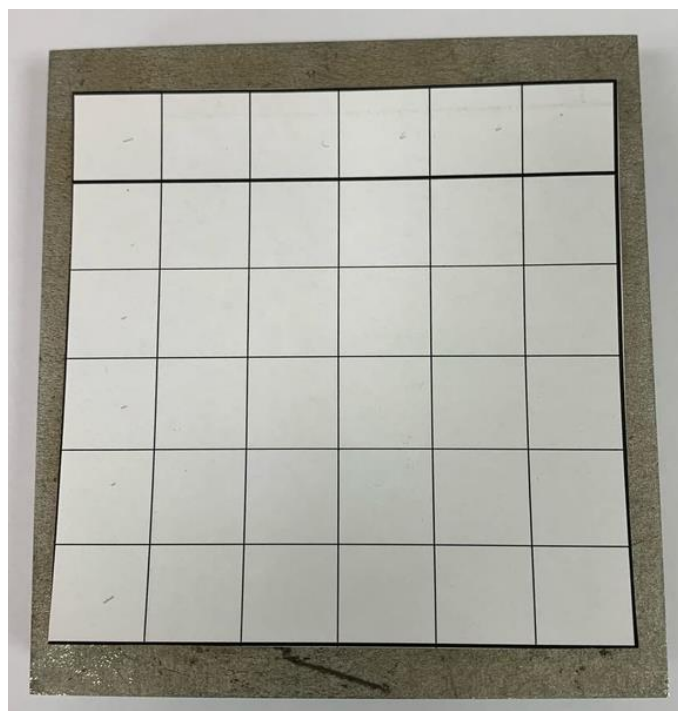


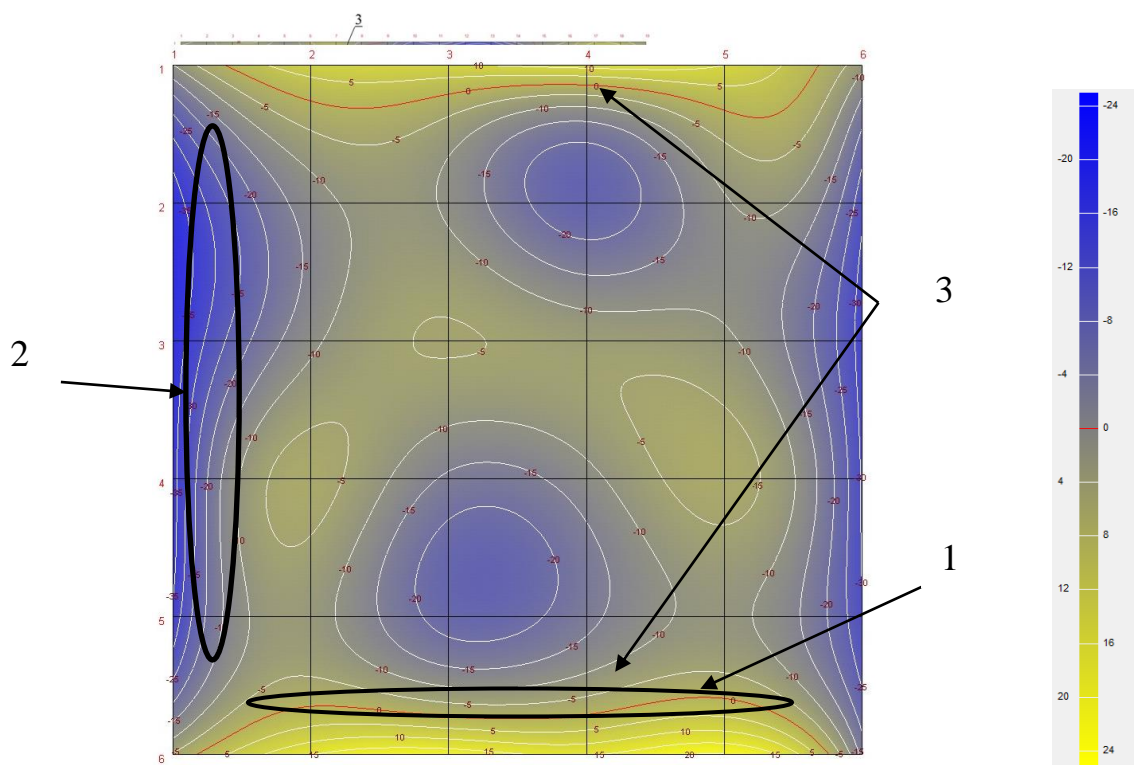
Рисунок 4.2 – Образец сварной конструкции из ХН50ВМКТЮР без термической обработки, с нанесенной сеткой для измерений

В результате сканирования и последующей обработки данных, были получены графические карты и обобщенные статистические характеристики каждой исследуемой зоны. Особое внимание уделялось участкам потенциальных и развитых дефектов, в окрестностях которых нарушалась равномерность распределения напряжений.

Полученные графические данные представлены в виде 2-D карт распределения разности главных механических напряжений (РГМН), на которых зоны сжатия показаны темно-синим цветом, а зоны растяжения – желтым.

Карта РГМН отображает распределение разности главных механических напряжений на обследованном участке металла, по которой выявляются явные, скрытые и зарождающиеся дефекты исследуемого участка основного металла или участка сварного шва и их точное расположение. Эта карта также дает информацию о напряженном состоянии, в котором находится данный участок [23].

Оценка полученных данных показала существенно неравномерное распределение остаточных напряжений по периметру образца (рисунок 4.3).



1 – зона растяжения, 2 – зона сжимающих напряжений,
3 – компенсационная зона

Рисунок 4.3 – Карта распределение концентрации напряжений на образце до термической обработки. Шаг измерения – 15 x 15 мм.

Численные характеристики, полученные при математической обработке карты распределения РГМН, сведены в таблицу статистических данных (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Распределение РГМН образца в исходном состоянии, в у.ед.

Максимальное РГМН (сжатие)	Минимальное РГМН (растяжение)	Среднее РГМН	Среднеквадратичное отклонение	Дисперсия	Асимметрия	Экцесс
-45	20	-10	31,94	1020,27	-0,4	-0,52

Данные таблицы 4.2 могут быть использованы в инженерных расчетах, связанных с получением математических моделей, отражающих влияние той или иной обработки на напряженное состояние поверхности.

На рисунке 4.3 видно, что наиболее напряженной зоной образца является зона 2, максимальное значение РГМН в которой равно -45.

4.3 Термическая обработка сварных соединений выполненных лазерной сваркой

Для ликвидации концентраторов напряжения, возникающих в сварных конструкциях, и в соответствии с имеющейся технологией на их изготовление, была применена (рисунок 4.4) термическая обработка жаропрочного сплава, которая заключалась в:

- Перегрев печи до $T = 1150 \pm 10$ °C
- Отжиг $T =$ от 900 °C до 950 °C, выдержка 4 часа
- Охлаждение на воздухе
- Подогрев в печи до 600 °C с переносом в другую печь, перегретую до 1150 ± 10 °C
- Закалить при $T =$ от 1080 °C до 1100 °C в течении 30 минут
- Старение 850 ± 10 °C
- Выдержка 8 часов, воздух

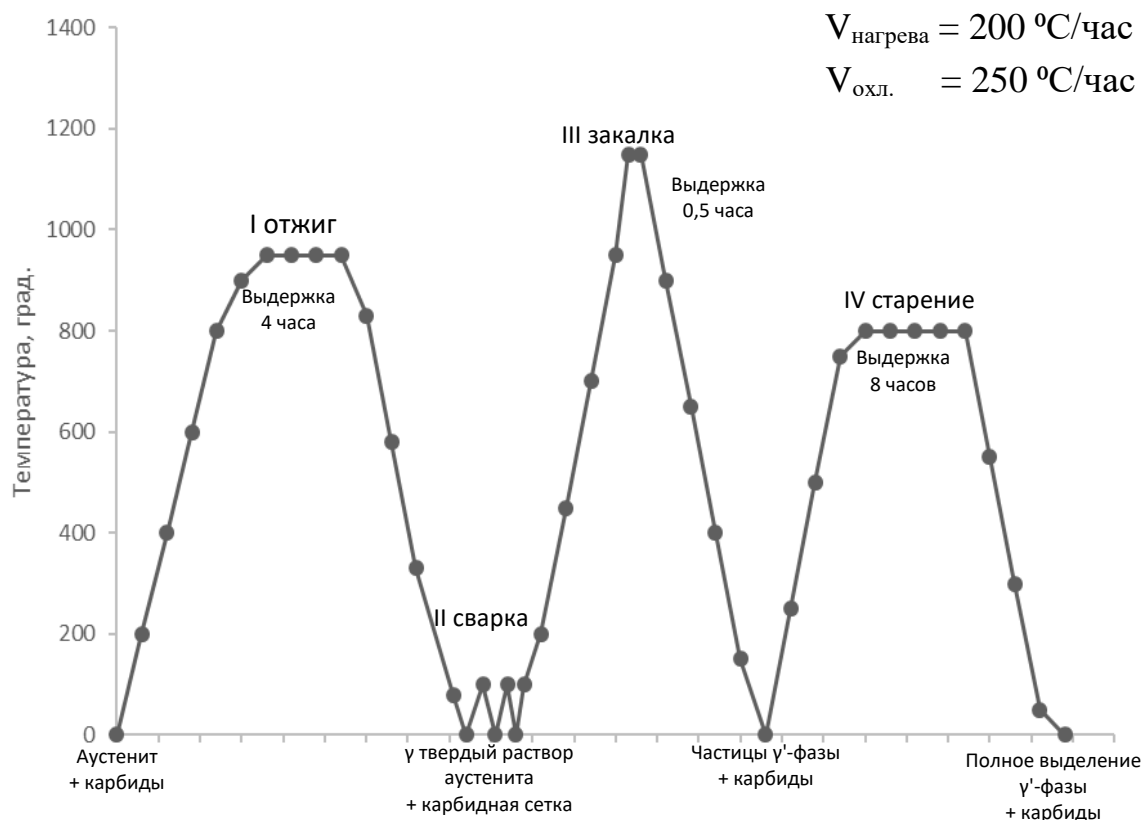


Рисунок 4.4 – Карта технологического процесса термической обработки

4.3.1 Отжиг 2-го рода жаропрочных сплавов

Отжигу 2-го рода подвергают только такие жаропрочные сплавы, которые имеют фазовые превращения в твердом состоянии. Если фазовые превращения обусловлены лишь изменением предельной растворимости, то происходит перекристаллизация только избыточных фаз - при нагреве выше линии предельной растворимости они полностью исчезают, растворяясь в основной фазе, а при охлаждении выделяются из твердого раствора, т. е. происходит их новая кристаллизация (рисунок 4.5).

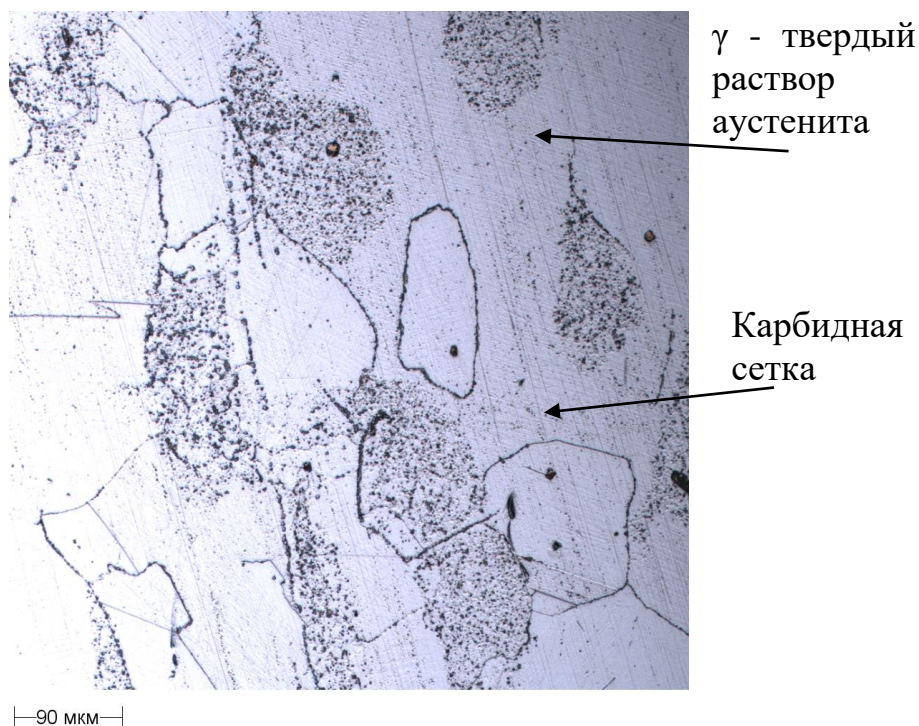


Рисунок 4.5 – Структура стали ХН50ВМКТЮР в отожженном состоянии

Первый нагрев необходим для растворения γ' -фазы и карбидов, т. е. для максимального насыщения матрицы легирующими элементами с целью увеличения эффекта последующего старения.

4.3.2 Закалка жаропрочных сплавов

Закалка без полиморфного превращения – это термическая обработка, фиксирующая при более низкой температуре состояние сплава, свойственное ему при более высокой температуре.

Закалка без полиморфного превращения применима к любым сплавам, в которых одна фаза полностью или частично растворяется в другой. Например, в сплаве на рисунке 4.6 при нагреве до $T_{\text{зак}}$ β -фаза растворяется в мат-

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

ричной α -фазе. При обратном медленном охлаждении β -фаза выделяется из α -фазы, в которой концентрация компонента β уменьшается в соответствии с ходом сольвуса $\beta\alpha$.

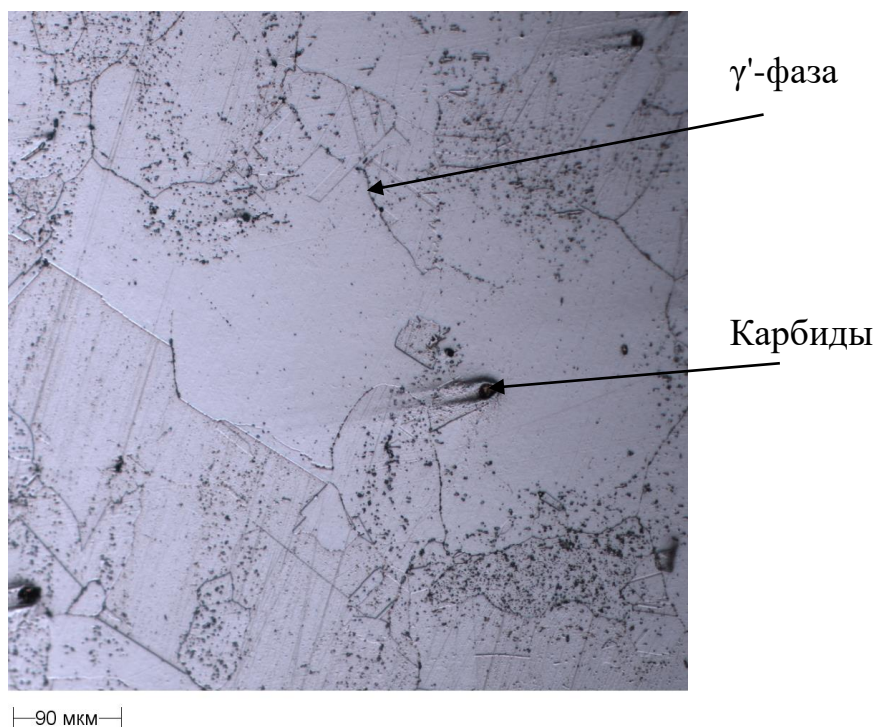


Рисунок 4.6 – Структура стали ХН50ВМКТЮР после закалки

При повторном нагреве до 1050 °С происходит частичное выделение очень крупных частиц γ' -фазы и карбидов, преимущественно по границам зерен. Эти выделения обеспечивают упрочнение границ при ползучести.

4.3.3 Старение жаропрочных сплавов

Закаленный сплав находится в метастабильном состоянии. При закалке без полиморфного превращения и в подавляющем большинстве случаев при закалке с полиморфным превращением образуется пересыщенный твердый раствор и закаленный сплав стремится понизить свою энергию, в результате чего твердый раствор распадается. Уже при комнатной температуре могут образовываться выделения из пересыщенного раствора, однако в большинстве сплавов диффузионная подвижность атомов при комнатной температуре недостаточна, чтобы распад раствора прошел в необходимой степени за приемлемое время. Поэтому для изменения структуры (рисунок 4.7) и свойств закаленного сплава его нагревают - подвергают старению или отпуску.

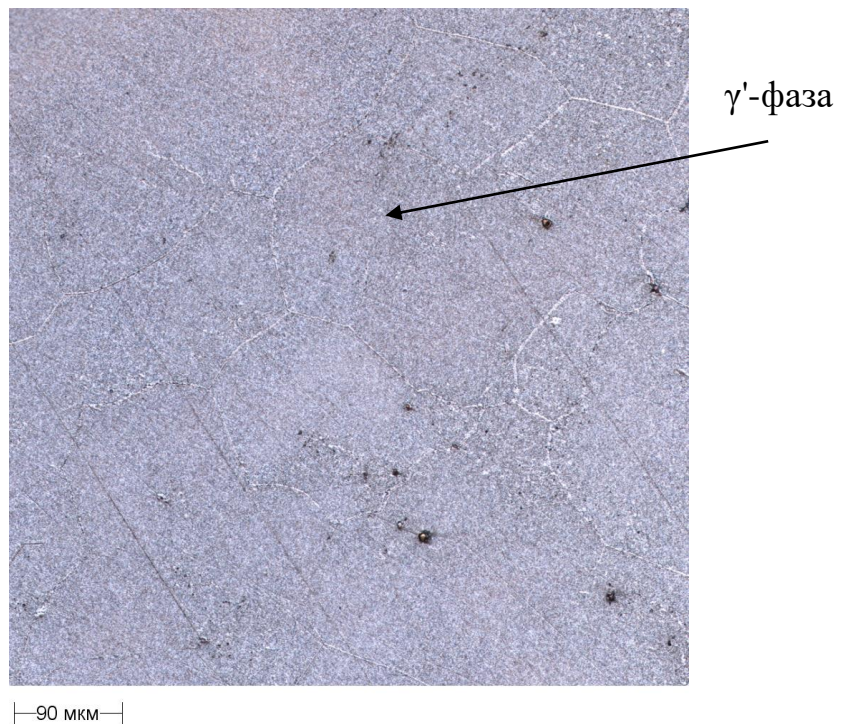


Рисунок 4.7 – Структура стали XH50BMKTЮP после старения

Старение при более низких температурах имеет целью достичь наиболее полного выделения основной массы γ' -фазы в объеме зерен. Задача этих более мелких выделений γ' -фазы – обеспечить сопротивление движению дислокаций в объеме материала, т. е. высокий уровень прочности при низких температурах и высокую скорость установившейся ползучести. В высоколегированных сплавах с большой скоростью выделения γ' -фазы при замедленном охлаждении от температуры второго старения до комнатной могут происходить дополнительные выделения некоторого количества очень мелких частиц γ' -фазы, упрочняющих матрицу. Причиной их выделения является разница в растворимости алюминия и титана при комнатной температуре и при 900 °С, поэтому они могут растворяться при повторном нагреве до температуры эксплуатации.

4.4 Сравнительный анализ напряженного состояния тонкостенной сварной конструкции

Сканирование второго образца, прошедшего термическую обработку выполнялось по сетке (15x15) с числом рядов 9 и количеством строк 9 (Рисунок 4.8).

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
						78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

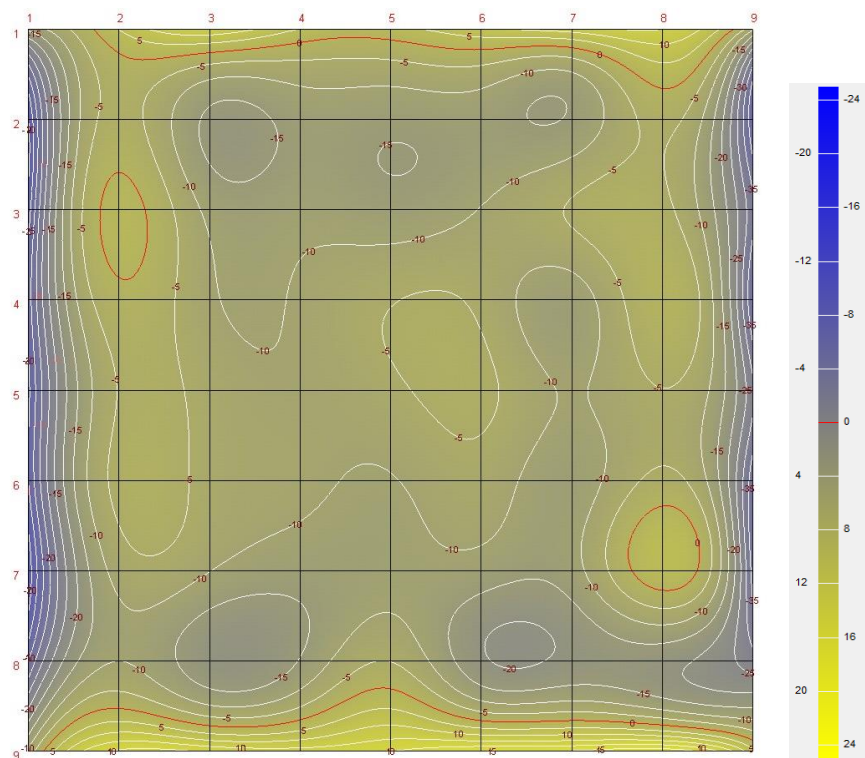


Рисунок 4.8 – Распределение РГМН образца после термической обработки

Статистические результаты обработки карты распределения РГМН сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Распределение РГМН зоны дефекта, в у.ед.

Максимальное РГМН (сжатие)	Минимальное РГМН (растяжение)	Среднее РГМН	Среднеквадратичное отклонение	Дисперсия	Асимметрия	Эксцесс
-25	15	-6,89	20,92	437,48	-0,26	-0,21

По карте видно, что наиболее напряженной так же является околошовная зона, максимальное значение РГМН в которой равно -50.

Анализ полученных результатов распределения РГМН сварных образцов без термической обработки и после неё позволяет сделать вывод о том, что зона сварного соединения наиболее напряжена, в отличие от общей площади приваренной тонкостенной пластины, но после проведения термической обработки можно уменьшить напряжения на всей площади детали (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 – Гистограмма сравнения напряжений сварочной конструкции после сварки и после проведения термической обработки сварного соединения

Как известно, наличие КМН и высокого градиента РГМН является необходимым и достаточным условием зарождения трещины. Область высокого значения градиента РГМН без явно выраженного центра КМН также опасна, в связи с высокой вероятностью формирования линии скольжения. На основании выявленных диагностических признаков можно сделать вывод о целесообразности применения термической обработки металла участка конструкции с целью снятия остаточных механических напряжений. При этом главной целью мероприятия должно быть снижение градиента РГМН, что исключает возможность трещинообразования.

Заключение

В процессе выполнения выпускной квалификационной работе получены следующие основные результаты:

1. Спроектирована компоновка экспериментальной установки сварки на базе роботизированного лазерного комплекса. На основании натурного макетирования были получены значения оптимальных углов и вылета приспособлений, определены требования к необходимому для проведения эксперимента оснащению.

2. По результатам проработки компоновки установки и изучения технологических возможностей робота – манипулятора, разработано технологическое оснащение, установлены оптимальные требования по массогабаритным и прочностным параметрам, на основании которых изготовлено технологическое оборудование для отработки технологии роботизированной лазерной сварки, синхронизированы режимы работы сварочного оборудования.

3. На примере жаропрочного сплава ХН50ВМКТЮР апробированы режимы лазерной сварки с использованием присадочной проволоки и режимы получения продольных стыковых соединений контактной сваркой. Выполнено сравнение полученных результатов с традиционными способами сварки.

4. Исследована микроструктура и механические свойства образцов сварных соединений, полученных на различных режимах и параметрах лазерной сварки. Результаты металлографии, контроль распределения микротвердости и технологической прочности показали, что лазерная сварка коррозионностойких сплавов на никелевой основе со скоростью охлаждения в пределах 2000 °С/с, оказывает положительное влияние на устойчивость сварных соединений к образованию кристаллизационных трещин, по причине образования дисперсной структуры сварного соединения.

5. С точки зрения равномерного распределения упрочнения и минимизации напряжений в зоне сварного соединения оптимальным является контактный способ лазерной сварки без присадочной проволоки, так как он обеспечивает формирование показателей твердости, прочности и ударной вязкости сварного соединения и околошовной зоны на уровне металлической основы сплава.

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		81

Списка использованных источников

1 Технология и организация восстановления деталей и сборочных единиц при сервисном сопровождении [Электронный ресурс]: учеб. электронное текстовое издание/ под ред. С. П. Провоторова. – 1-е изд., 2009.– Режим доступа : http://usfeu.ru/Uploads/MetodObespech/KursLekzii/2303031p/2303031p_70.pdf - 19.05.20017.

2 Технология поверхностного упрочнения и нанесения покрытий [Электронный ресурс]: учеб. электронное текстовое издание/ под ред. Б. Н. Гузанов. – 1-е изд., 2008.– Режим доступа :

<http://study.urfu.ru/view/aid/8823/1/Pugacheva.pdf1> - 10.10.2008.

3 http://studopedia.net/15_184668_lazernaya-naplavka.html

4 Богодухов, С. И. Обработка упрочнённых поверхностей в машиностроении и ремонтном производстве: учеб. пособие / С. И. Богодухов, В. Ф. Гребенюк, А. Д. Проскурин. – М.: Машиностроение, 2005. – 256 с. – ISBN 5-217-03257-X.

5 Богодухов, С. И. Повышение износостойкости и восстановление деталей машин и аппаратов: учеб. пособие / С. И. Богодухов [и др.]. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2012. – 298 с. – ISBN 978-5-4417-0134-1.

6 СТО 02069024.101 – 2015. Работы студенческие. Общие требования и правила оформления. Оренбург: ОГУ, 2015. – 85 с.

7 Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / В. И. Анурьев. – М.: Машиностроение-1, 2006. – Т. 3. – 666 с.

8 Богодухов, С. И. Технологическая часть дипломных проектов в ремонтно-восстановительном производстве: метод. указания / С. И. Богодухов, А. Д. Проскурин, Б. М. Шейнин. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2008. – 85 с.

9 Киселев, Г. Ф. Техническое обслуживание и ремонт центробежных компрессорных машин / Г. Ф. Киселев, Е. Н. Мыслицкий. – М.: Химия, 1979. – 128 с.

10 Краснов, В. И. Ремонт центробежных и поршневых насосов нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий / В. И. Краснов, А. М. Жильцов, В. В. Набержнев. – М.: Химия, 1996. – 320 с.

11 Молодык, Н. В. Восстановление деталей машин: справочник / Н. В. Молодык, А. С. Зенкин. – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с. – ISBN 5-217-00422-3.

12 Сидоров, А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. – М.: Машиностроение, 1987. – 187 с.

13 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 656 с.

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

14 Технология обработки упрочнённых и восстановленных поверхностей / С. И. Богодухов [и др.]. – М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 1999. – 127 с.

15 Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Мориаки, пер. с японского В.Н. Попова. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

16 Шиганов И.Н., Холопов А.В. Лазерная сварка алюминиевых сплавов // Фотоника. –2010. – №3. – С. 6–10.

17 Yuce1 C., Tutar M., Karpat F., Yavuz N., Tekin G // Journal of Mechanical Engineering. –2017. – V.63, Is.9. – P. 510–518.

18 Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В., Шиганов И.Н. Механические свойства и структура сварных соединений алюминиевого сплава В-1341 в зависимости от режимов лазерной сварки // Технология металлов. – 2008. –№3. – С. 16–23.

19 Шиганов И., Мисюров А., Григорьянц А. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. –664 с.

20 Segen Estefen, Tetyana Gurova, Daniel Werneck, Anatoli Leontiev. Welding stress relaxation effect in butt-jointed steel plates // Marine Structures 29 (2012) 211–225.

21 Gannon L, Liu Y, Pegg N, Snith M. Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates. // Mar Struct 2010; 23:385–404.

22 Вонсовский С.В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро-, и ферримагнетиков. М.: Наука, 1971. 1032 с.

23 Белов К.П. Упругие тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. М.: ГИТТЛ, 1957. 279 с.

24 Frederick T. Calkins, Alison B. Flatau, Marcelo J. Dapino «Overview of Magnetostrictive Sensor Technology», Journal of intelligent material systems and structures, vol. 18–October 2007

25 R. Langman «Measurement of the mechanical stress in mild steel by means of rotation of magnetic field strength – part 2: biaxial stress», NDT International, April 1982

26 Устройство для измерения механических напряжений в металлических изделиях // Патент РФ № 2079825. 1997. Жуков С.В., Жуков В.С.

27 Способ определения механических напряжений и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2195636. 2001. Жуков С.В., Жуков В.С., Копица Н.Н.

28 Уварова С. Г. Дефекты сварных соединений: учебное пособие /Уварова С. Г. Казань: ООО «АНТЦ сварочного оборудования и технологий», 2014. – 30с.

					ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
Комплект графических документов

					<i>ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		84

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ОГУ 15.04.01 1220 627

Особенности модернизации лазерного комплекса под операции сварки

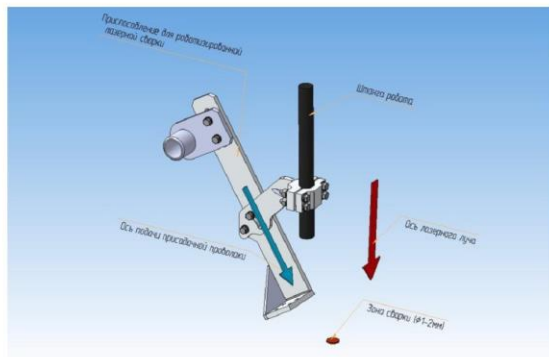


Рисунок 1 - Компонровка приспособления



Рисунок 2 - Кронштейн крепления к роботу-манипулятору автомата подачи присадочного материала



Рисунок 3 - Смонтированное сварочное приспособление



Рисунок 4 - Шина с охлаждением и поддувом



Рисунок 5 - Образец 2,0 мм. 12X18H10T закреплён на шине и подготовлен под сварку

ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ

Исполнитель	Проверенный	Сверстан	Сверстан	Сверстан	Сверстан
Иванов И.И.	Петров П.П.	Сидоров С.С.	Сидоров С.С.	Сидоров С.С.	Сидоров С.С.

ОГУ 15.04.01 1220 627					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Особенности модернизации лазерного комплекса под операции сварки
1	11	ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ	Иванов И.И.	15.04.2015	Лист 1 из 1
Исполнитель	Проверенный	Сверстан	Сверстан	Сверстан	Сверстан
Иванов И.И.	Петров П.П.	Сидоров С.С.	Сидоров С.С.	Сидоров С.С.	Сидоров С.С.

Материалы и методы, используемые в работе. Характеристика используемых материалов

Таблица 1 - Химический состав сплава ХН50ВМКТИОР, в % по массе

C	Cr	W	Mo	Co	Al	Ti	Ni	Nb	Mn	Fe	Si	Cu	Ce*	B*	S	P	C
≤0,1	17,5-19,5	5,5-7	3,5-5	5-8	2,5-3	1-1,5	Основа	1,5	0,3	3,0	0,3	0,07	0,02	0,005	0,015	0,015	≤0,1



Рисунок 1 - Образец сварного соединения материала ХН50ВМКТИОР



Рисунок 3 - Сканирование механических напряжений «Stressvision»

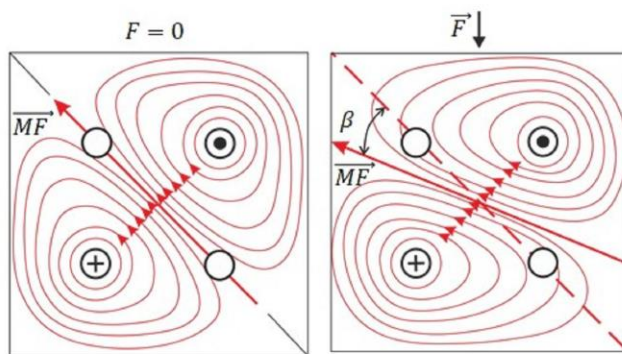


Рисунок 2 - Распределение магнитного потока в магнитоанізотропном преобразователе

Таблица 2 - Режимы лазерной сварки

№ образца	Скорость перемещения, м/мин	Подача защитного газа л/мин.	Мощность излучения, кВт.
1	3,5	10	0,7
2	3,5	10	0,8

ОГУ 15.04.01 1220 627			
Изм.	№ докум.	Лист	Дата
Исполн.	Исполн. вкл.	Исполн. вкл.	Исполн. вкл.
Провер.	Провер. вкл.	Провер. вкл.	Провер. вкл.
Материалы и методы, используемые в работе.	Характеристика используемых материалов	Лист 2	Всего 7

ОГУ 15.04.01 1220 627

Изм.
Лист
№ докум.
Подпись
Дата

ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ

Лист
86

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подпись	
Дата	

ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ

Лист 87

ОГУ 15.04.01 1220 627

Сравнительный структурный анализ неразъемных соединений

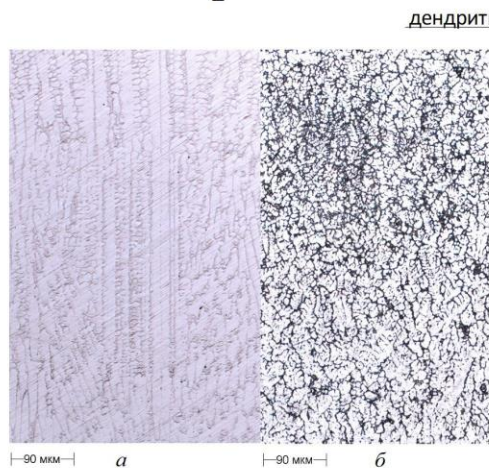


Рисунок 3 - Микроструктура наплавленного слоя при увеличении x200
а - порошком, б - проволокой

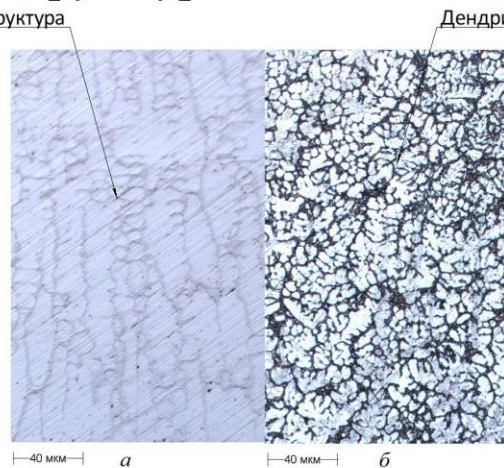


Рисунок 4 - Микроструктура наплавленного слоя при увеличении x500
а - порошком, б - проволокой

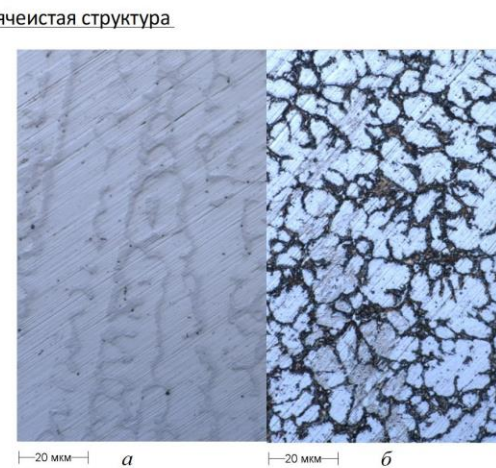


Рисунок 5 - Микроструктура наплавленного слоя при увеличении x1000
а - порошком, б - проволокой

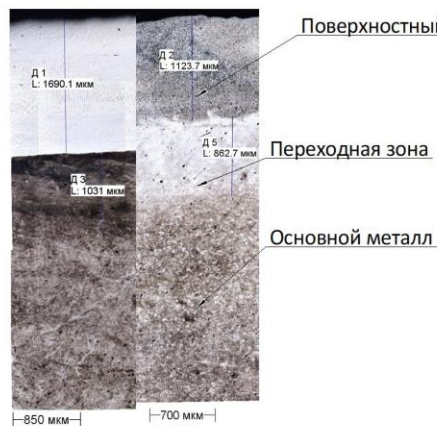


Рисунок 1 - Общий вид образцов при увеличении x100, полученных при помощи наплавки (порошок слева, проволока справа)

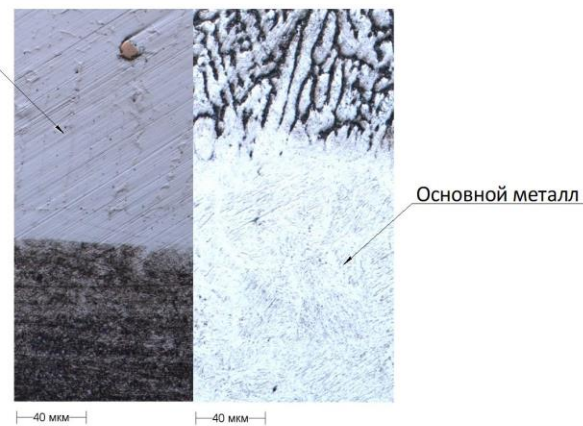


Рисунок 2 - Зона сплавления при увеличении x500. Порошок слева, проволока - справа

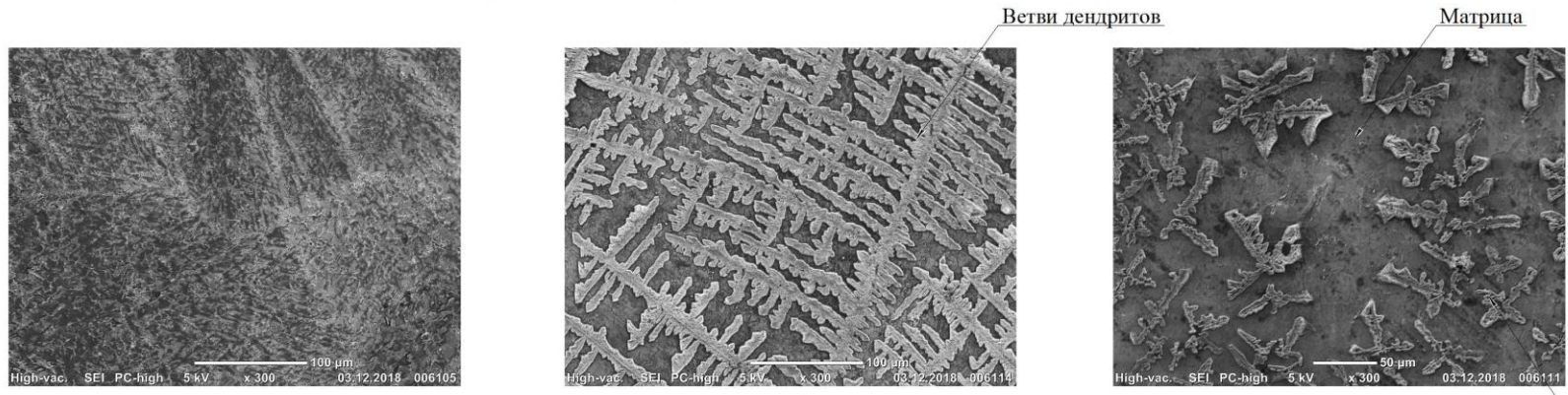
ОГУ 15.04.01 1220 627			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Разработ.	Забельский В.А.	Дата	
Провер.	Киселева Е.С.	Лист	11
Контроль		Листов	1
Исполнение	Забельский В.А.	Формат	A1
Дата	09.04.11	Калькулятор	

Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подпись	
Дата	

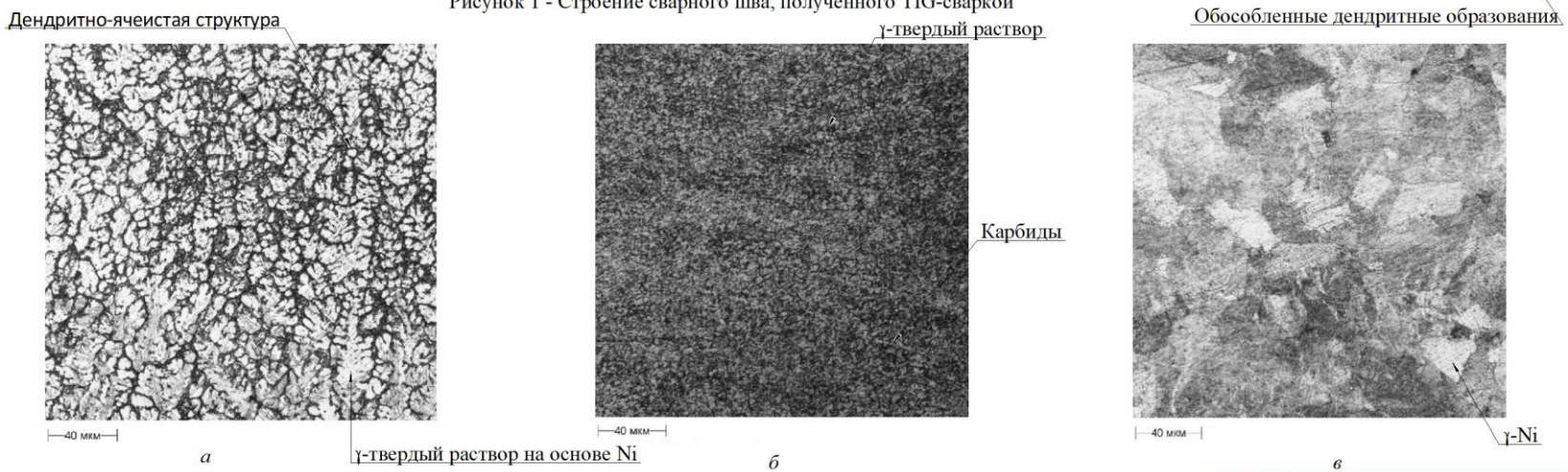
ОГУ 15.04.01 1220 627 ПЗ

ОГУ 15.04.01 1220 627

Структура образцов, полученных при апробации разработанных режимов лазерной сварки на материале ХН50ВМКТЮР



а - литая структура; б - зона термического влияния; в - основной материал при увеличении х300
 Рисунок 1 - Строение сварного шва, полученного TIG-сваркой



а - сварной шов; б - зона термического влияния; в - металлическая основа сплава х300
 Рисунок 2 - Металлография сварного соединения сплава ХН50ВМКТЮР, полученного лазерной сваркой

ОГУ 15.04.01 1220 627			
Изм.	№ докум.	Лист	Дата
Разработ.	Зайкина Е.А.		
Провер.	Королева Л.С.		
Согласов.			
Исполн.	Зайкина Е.А.		
Дата	03.12.2018		
Структура образцов, полученных при апробации разработанных режимов лазерной сварки			
ХН50ВМКТЮР			
Классификация			
Формат А1			

ОГУ 15.04.01 1220 627

Механическое поведение сварных соединений, полученных лазерной сваркой



а



б

а - лазерная сварка с использованием присадочной проволоки; б - контактная
 Рисунок 1- Сравнительные значения распределения микротвердости сварного шва, зоны термического влияния и основного металла для различных способов лазерной сварки на мощности 1,2 кВт

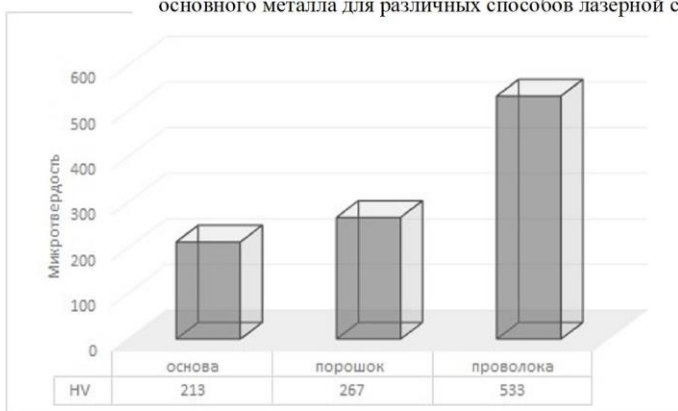


Рисунок 2 - Гистограмма сравнения микротвердости основного металла с наплавленным слоем порошком и проволокой

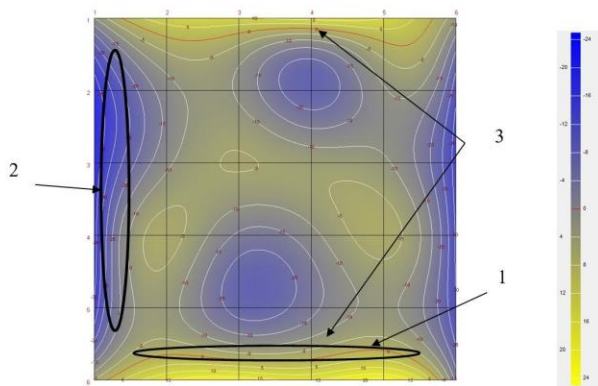
Таблица 1 - Сравнительные данные механических свойств сварных соединений и основного металла

	Параметры измерения	Фактические значения	Требуемые значения
Основной металл	Предел прочности Н/мм ²	510-520	490-588
	Предел прочности, Дж/см ²		
	KCU - 60 KCU - 20	147-169 144-151	29,4 39,2
Сварное соединение	Предел прочности Н/мм ²	608-628	≥588
	Ударная вязкость с надрезом по центру шва Дж/см ²		
	KCU - 20 KCU - 30 KCU - 40 KCU - 60	147-169 144-151 144-151 144-151	≥39,2

ОГУ 15.04.01 1220 627									
Изм.	Акт	№ докум.	Лист	Дата	Механическое поведение сварных соединений, полученных лазерной сваркой				
Разработчик	Исполнитель	Проверенный	Корректировщик	Дата	Лист	Таблиц	Листов	71	
Исполнитель	Проверенный	Корректировщик	Дата	Лист	Таблиц	Листов	71		
Исполнитель	Проверенный	Корректировщик	Дата	Лист	Таблиц	Листов	71		

ОГУ 15.04.01 1220 627

Визуализация распределения остаточных напряжений в сварном шве и различных зонах термического влияния



1 - зона растяжения, 2 - зона сжимающих напряжений, 3 - компенсационная зона
Рисунок 1 - Карта распределение концентрации напряжений на образце до термической обработки.

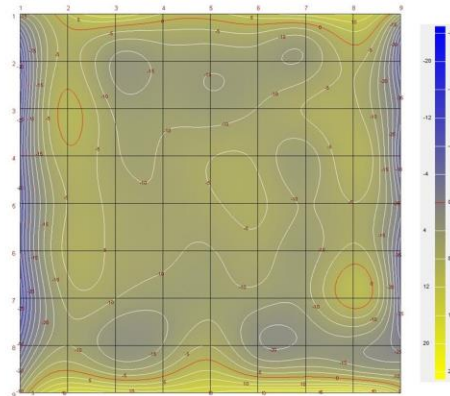


Рисунок 2 - Распределение разности главных механических напряжен образца после термической обработки

Таблица 1 - Распределение РГМН на сварочной кончтрукции, ус.ед.

Состояние сварного соединения	Максимальное РГМН (сжатие)	Минимальное РГМН (растяжение)	Среднее РГМН	Среднеквадратичное отклонение	Дисперсия	Асимметрия	Экспесс
Без т.о.	-45	20	-10	31,9	2,5-1020,27	-0,4	-0,52
После т.о.	-25	15	-6,89	20,92	437,48	-0,26	-0,21

Публикации по теме исследования

1 Крылова С.Е. Обеспечение эксплуатационных характеристик оборудования нефтегазодобывающей отрасли на основе совершенствования технологии газопорошковой лазерной наплавки / Крылова С.Е., Завьялов В.А., Оплеснин С.П. // Вестник современных технологий - 2019. № 1 (13). С. 19-25.

2 S.E. Krylova, Development of technology for robotic laser welding of thin-walled products from heat-resistant alloys / S.E. Krylova, V.A. Zavyalov, M.I. Golytyn, S.P. Olesnin and . // MATEC Web of Conferences Volume 298 (2019). International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019) Published online: 18 November 2019 (SCOPUS)

3 Завьялов В.А. Разработка оптимальной технологии получения тонкостенных изделий из никелевых сплавов с применением лазерной сварки / Завьялов В.А., Крылова С.Е., Гольтягин М.И. // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 275-летию Оренбургской губернии и 85-летию Оренбургской области. 2019. С. 120-123.

4 Крылова С. Е. Разработка технологии роботизированной лазерной сварки тонкостенных изделий из жаропрочных сплавов / Крылова С. Е. Завьялов В. А Оплеснин С. П. Фот А.П. Ибрагимов А.У // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова в печати (ВАК РФ)

ОГУ 15.04.01 1220 627			
Изм.	Лист	№ докум.	Дата
Рисован	Завьялов В.А.		
Проверен	Крылова С.Е.		
Сметан			
Исполнен	Завьялов В.А.		
Дата	Исполн. В.А.		
Визуализация распределения остаточных напряжений в сварном шве и различных зонах термического влияния			Лист 1
			Листов 1