

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

Школа: Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки: Машиностроение
 Отделение школы (НОЦ): Материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Структура и механические свойства сварного шва двухфазной стали, полученного при совместном воздействии дугового источника и лазерного излучения

УДК 669.15-194.57:621.791.05

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM71	Ступаков А. Н.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Главный научный сотрудник ИФПМ СО РАН	Тарасов С. Ю.	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Рагозин Д. В.	к.и.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Исаева Е. С.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15. 04. 01. машиностроение	Коростелева Е.Н.	к.т.н		

Планируемые результаты обучения

Код	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять <i>глубокие</i> естественно научные, математические и инженерные <i>знания</i> при разработке наукоемких технологий изготовления и обработки новых материалов и изделий из них	Требования ФГОС (ОК-1, ОПК-4, ПК-2, 3, 11, 12) ¹ , Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Применять <i>глубокие знания</i> в области современных технологий машиностроительного производства для решения <i>междисциплинарных инженерных задач</i>	Требования ФГОС (ОПК-1, 2, ПК-1, 5, 8, 9, 11, 12, 13), Критерий 5 АИОР (пп.1.1,1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Ставить и решать <i>инновационные задачи инженерного анализа</i> , связанные с созданием и обработкой материалов и изделий, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов машиностроения	Требования ФГОС (ОК-5, ОПК-14, ПК-9, 11), Критерий 5 АИОР (пп.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Разрабатывать технологические процессы, <i>проектировать</i> и использовать <i>новое</i> оборудование и инструменты для обработки материалов и изделий, конкурентоспособных на <i>мировом</i> рынке машиностроительного производства, с подготовкой и анализом технической документации	Требования ФГОС (ОК-7, ПК-5, 6, 11, ОПК-11, 12), Критерий 5 АИОР (п.1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Проводить теоретические и экспериментальные <i>исследования, расчеты на прочность</i> в области современных технологий обработки материалов, производства узлов, деталей и конструкций в машиностроении	Требования ФГОС (ОПК-1, 2, 12, ПК-8, 13), Критерий 5 АИОР (п.1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Внедрять, <i>эксплуатировать</i> и обслуживать современное высокотехнологичное	Требования ФГОС (ОК-4, ОПК-6, ПК-3, 5, 7), Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов

¹ В скобках указаны коды компетенций ФГОС по направлению 15.04.01 «Машиностроение», квалификация «магистр».

	производство, обеспечивать его <i>высокую эффективность</i> , соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	<i>EUR-ACE и FEANI</i>
	<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Использовать <i>глубокие знания</i> по <i>проектному менеджменту</i> для ведения <i>инновационной</i> инженерной деятельности с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности	Требования ФГОС (ОПК-7, 8, ПК-3, 4, 7), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE и FEANI</i>
P8	<i>Активно</i> владеть <i>иностранном языком</i> на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>инновационной</i> инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-8, ОПК-3, 6), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE и FEANI</i>
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность <i>следовать корпоративной культуре</i> организации.	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК-5, 6, 10, ПК-10), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE и FEANI</i>
P10	Демонстрировать <i>глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов</i> <i>инновационной</i> инженерной деятельности, компетентность в вопросах <i>устойчивого развития</i> .	Требования ФГОС (ОК-2, ОПК-5, 6, 9, ПК-5, 10), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE и FEANI</i>
P11	<i>Самостоятельно</i> учиться и непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3, 4, 6, ОПК-10, ПК-7), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE и FEANI</i>

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

Инженерная школа производственных технологий
 Отделение Материаловедения
 Направление подготовки: материаловедение и технологии материалов

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4AM71	Ступакову Александру Николаевичу

Тема работы:

Утверждена приказом директора		№4300 от 28.05.2019
-------------------------------	--	---------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Целью работы является исследование структуры и механических свойств сварного шва ферритно-перлитной стали 09Г2С, полученного методом гибридной лазерно-дуговой сварки. Работа проводится на специальном оборудовании удовлетворяющим требованиям техники безопасности, с использованием средств индивидуальной защиты.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Задачи работы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Проведение механических испытаний образцов неразъёмных соединений стали 09Г2С полученных методом гибридной лазерно-дуговой сварки(ГЛС). 2. Исследование структуры и механических свойств сварного шва. <p>Литературный обзор выполнен по направлениям:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Гибридная лазерно-дуговая сварка 2. Гибридные системы лазерной дуговой сварки 3. Гибридный процесс лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом (GMAW) 4. Гибридный лазерный процесс GTAW 5. Гибридный лазерный процесс PAW 6. Мощность лазера 7. Скорость сварки 8. Составы защитных газов 9. Зазор соединения 10. Виды соединений и подготовка кромок 11. Промышленное применение.
<p>Перечень графического материала</p>	
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Рагозин Д. В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Исаева Е. С.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Литературный обзор</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Главный научный сотрудник ИФПМ СО РАН</p>	<p>Тарасов С. Ю.</p>	<p>д.т.н., профессор</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>4АМ71</p>	<p>Ступаков А. Н.</p>		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4AM71	Ступаков Александр Николаевич

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	15.04.01 Машиностроение

Тема НИР:

Структура и механические свойства сварного шва двухфазной стали, полученного при совместном воздействии дугового источника и лазерного излучения.

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально – технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	- стоимость расходных материалов; - норматив заработной платы; - коэффициенты для расчета заработной платы; - тариф на электроэнергию;
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	– Анализ конкурентных технических решений; – Выполнение SWOT – анализа проекта
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	– Определение трудоемкости выполнения работ; – Разработка графика проведения научного исследования; – Расчет материальных затрат НТИ; – Формирование бюджета затрат научно – исследовательского проекта.

Перечень графического материала:

1. Календарный график проведения исследования в виде диаграммы Ганта
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Матрица SWOT
5. График проведения и бюджет НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Рагозин Д.В.	К.и.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM71	Ступаков А. Н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4AM71	Ступаков Александр Николаевич

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	15.04.01 машиностроение

Тема ВКР:

Структура и механические свойства сварного шва двухфазной стали, полученного при совместном воздействии дугового источника и лазерного излучения.	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Структура и механические свойства сварного шва двухфазной стали, полученного при совместном воздействии дугового источника и лазерного излучения. Рабочая зона - лаборатория контроля качества материалов и конструкций ИФПМ СО РАН.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Трудовой кодекс Российской Федерации 30.12.2001 N 197-ФЗ – Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. ГОСТ Р 53114-2008 – Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78 – В соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 в помещении должен быть организован воздухообмен. – СН 181-70 Указания по проектированию цветовой отделки интерьеров.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– Отклонение показателей микроклимата. Требования к микроклимату помещений устанавливаются в соответствии СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 – Воздействие химических веществ на кожу и верхние дыхательные пути ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. – Превышение уровня шума ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. – Отсутствие или недостаток естественного света. Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.

	Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 – Электрический ток. ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
3. Экологическая безопасность:	– Анализ области воздействия вредных газов на атмосферу. – Анализ области воздействия растворов кислот на гидросферу.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	- Типичная ЧС возникновение пожара, так как используется электрическое оборудование.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Исаева Е.С.	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ71	Ступаков Александр Николаевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа (114) страниц, (20) рисунков, (15) таблиц, 150 источников литературы, 1 приложение.

Ключевые слова: гибридная лазерно-дуговая сварка, сталь 09Г2С, гибридные технологии, макроструктура и микроструктура, механические испытания.

Объект исследования: сварные швы гибридной лазерно-дуговой сварки (ГЛС) листового проката ферритно-перлитной стали 09Г2С. В качестве заготовок использовались пластины толщиной 2,5, 5 и 12 мм и размером 300×120мм.

Цель работы: является исследование структуры и механических свойств сварного шва ферритно-перлитной стали 09Г2С, полученного методом гибридной лазерно-дуговой сварки.

В данной работе представлен аналитический обзор гибридной лазерно-дуговой сварки (ГЛС). Проведен ряд механических испытаний образцов стали 09Г2С на растяжение различных толщин и зон воздействия процесса ГЛС. Измерена микротвёрдость различных зон сварных швов. Исследована макроструктура сварных соединений и микроструктура образцов после механических испытаний. В работе использовано следующее оборудование: В испытаниях на растяжения применялась универсальная испытательная машина УТС 110М-100, для исследования микро- и макроструктуры применялся металлографический цифровой комплекс Альтами МЕТ 1С.

Обработка результатов экспериментов выполнена с использованием пакета программ Microsoft Office. Текст пояснительной записки набран при помощи текстового редактора Microsoft Word.

Выпускная квалификационная работа выполнена на базе ИФПМ СО РАН Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Список условных обозначений и сокращений

ГЛС – гибридная лазерно-дуговая сварка;

GMAW – дуговая сварка металлическим электродом в газовой среде (с англ. - gas metal arc welding);

GTAW – дуговая сварка вольфрамовым электродом в газовой среде (с англ. - gas tungsten arc welding);

PAW – плазменно-дуговая сварка (с англ. - plasma arc welding);

MAG – дуговая сварка в защитной среде активного газа (с англ. - Metal Active Gas);

MIG – дуговая сварка в защитной среде инертного газа (с англ. - Metal Inert Gas);

TIG – сварка вольфрамовым электродом в инертном газе (с англ. - tungsten inert gas);

ОМ – основной металл.

Содержание

Введение	15
1. Литературный обзор	16
1.1 Гибридная лазерно-дуговая сварка	16
1.2 Гибридные системы лазерной дуговой сварки	19
1.3 Гибридный процесс лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом (GMAW)	21
1.4 Гибридный лазерный процесс GTAW	22
1.5 Гибридный лазерный процесс PAW	23
1.6 Мощность лазера	23
1.7 Скорость сварки	24
1.8 Составы защитных газов	24
1.9 Зазор соединения	26
1.10 Виды соединений и подготовка кромок	26
1.11 Промышленное применение	27
2.МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА	31
2.1 Материалы для исследования	31
2.2 Методика получения образцов неразъёмных соединений	33
2.3 Методика получения образцов для испытаний	34
2.3.1 Методика получения образцов для структурных исследований макроскопических характеристик	34
2.3.2 Методика получения образцов для испытаний на статическое растяжение	36
2.3.3 Методика получения нестандартных образцов для определения временного сопротивления при статическом растяжении.	38

2.4 Оборудование.....	39
2.4.1 Универсальная испытательная машина УТС 110М-100.....	39
2.4.2 Металлографический микроскоп Altami MET 1С.....	40
3. Экспериментальная часть	42
3.1 Образцы неразъемных соединений крупногабаритных плоских сварных листовых заготовок.....	42
3.2 Макро- и микроструктура сварного шва	43
3.3 Испытания на растяжение образцов крупногабаритных конструкций.....	47
3.4 Определение микротвердости	48
3.5 Испытания нестандартных образцов	50
Выводы.....	53
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	55
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	55
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	55
4.1.3 SWOT-анализ	57
4.2 Организация и планирование работ.....	58
4.2.1 Определение трудоёмкости выполнения работ.....	59
4.2.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта.....	64
4.2.3 Расчет затрат на материалы.....	64
4.2.4 Расчет затрат на оборудование.....	65
4.2.5 Расчет заработной платы.....	66
4.2.6 Расчет затрат на социальный налог	67
4.2.7 Расчет затрат на электроэнергию	67

4.2.8 Расчет прочих расходов	68
4.2.9 Расчет общей себестоимости разработки.....	68
4.2.10 Расчет прибыли	69
4.2.11 Расчет НДС.....	69
4.2.12 Цена разработки НИР.....	69
Заключение	70
4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	71
Введение	71
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	72
5.2 Производственная безопасность	74
5.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	75
5.2.2 Отклонение показателей микроклимата.....	75
5.2.3 Воздействие химических веществ на кожу и верхние дыхательные пути.	76
5.2.4 Превышение уровня шума.	77
5.2.5 Отсутствие или недостаток естественного света.	78
5.2.6 Опасность поражения электрическим током.	78
5.3 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя	80
5.3.1 Отклонение показателей микроклимата.....	80
5.3.2 Воздействие химических веществ на кожу и верхние дыхательные пути	81
5.3.3 Превышение уровня шума	82
5.3.4 Отсутствие или недостаток естественного света	82

5.3.5 Опасность поражения электрическим током	83
5.3 Экологическая безопасность	83
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	85
Заключение	86
Выводы.....	87
Список публикаций:	88
Список литературы:	89
Приложение А	104

Введение

Лазерно-дуговая гибридная сварка - это процесс, в котором режим сварки гибридного источника тепла объединяет лазерный источник тепла и источник дугового тепла [1]. Технология гибридной лазерно-дуговой сварки с плавящимся или неплавящимся электродом обладает следующими преимуществами: высокая скорость сварки, меньшие деформации шва за счёт малого подвода тепла, превосходной способностью к свариванию зазоров и хорошей проникающей способностью [2-5].

В процессе гибридной лазерно-дуговой сварки (ГЛС) лазерный луч и электрическая дуга взаимодействуют в общей сварочной ванне и их совместный эффект используется для получения глубокого и узкого сварного шва за один проход [1-2]. Лазерная сварка известна своей способностью производить узкий и глубокий сварочный канал, так как лазерный луч может быть сфокусирован на относительно небольшой площади. Фокусирование луча позволяет повысить скорость сварки, что, в свою очередь, снижает теплотраты и вероятность тепловых искажений в свариваемых деталях [3]. Однако лазерные сварочные системы стоят дороже, чем конкурентные виды сварочных систем, а затраты электроэнергии очень высоки для большинства лазерных систем, используемых для сварки. Лазерная сварка обладает плохой способностью к соединению швов с зазорами, и требует тщательной предварительной подготовки и пригонки кромок. Лазерная сварка также испытывает трудности при сваривании материалов с поверхностями с высокой отражательной способностью, такие как алюминий, медь, золото и т. д.

С другой стороны, использование различных видов дуговой сварки, не требует высоких энергетических затрат и позволяет отлично сваривать швы с зазорами, а также материалы с высокой отражательной способностью [4]. Системы дуговой сварки значительно дешевле, чем системы лазерной сварки эквивалентной мощности [5]. Однако низкая плотность энергии при дуговой сварке замедляет процесс, что приводит к высокой теплоотдаче в зоне сварки

и тепловым искажениям свариваемой детали. Лазерная сварка и дуговая сварка при применении в одной сварочной ванне дает «эффект гибридизации», что компенсирует недостатки обоих процессов и дополняет их преимущества [6].

1. Литературный обзор

1.1 Гибридная лазерно-дуговая сварка

Существует два различных подхода к использованию лазера и электрической дуги для сварки. Первый подход называется лазерно-дуговой сваркой, где лазер используется только для предварительного нагрева металлов, которые должны быть сварены в процессе дуговой сварки [7]. В этом процессе источник лазера низкой мощности обычно используется для улучшения процесса дуговой сварки и, следовательно, улучшения глубины сварного шва и скорости сварки незначительны.

Во втором подходе, лазерный луч высокой мощности используется для выполнения сварки с глубоким проникновением. Это режим проплавления, характеризующийся образованием узкого и глубокого канала на стыке двух свариваемых частей [8-9]. В этом процессе для сварки используется совместное воздействие лазерного луча с высокой плотностью энергии и электрической дуги с высокой энергоэффективностью [10]. Этот процесс известен как лазерно-дуговой сварочный процесс, наиболее известный как гибридный процесс лазерной дуговой сварки [11]. Динамическое взаимодействие лазерного излучения, электрической дуги и добавление легирующих элементов определяет формирование размера и формы сварного шва и прочность сварного соединения [12]. Гибридные сварные швы имеют две отличительные зоны плавления, а именно верхнюю зону (дуга) и нижнюю зону (лазер) [13-14]. Геометрия шва в верхней его части имеет полусферическую форму «чашу». Нижняя часть похожа на «палец» [15-16].

В гибридной лазерной дуговой сварке лазерный луч используется в качестве основного источника тепла, который взаимодействует со вторым источником тепла – дугой в той же сварочной ванне [17-18]. Использование вторичного источника тепла компенсирует потребность в мощном лазерном источнике, что резко снижает стоимость установки [5, 19].

Гибридная лазерно-дуговая сварка была введена в конце 1970-х годов профессором В. М. Стином [11] и соавторами, и процесс получил название “лазерно-дуговая сварка”. Результаты исследований показали явные преимущества сочетания лазерного луча и электрической дуги для соединения металлов. Достижимый при этом эффект гибридизации обеспечивает значительное увеличение скорости сварки, глубины провара и стабильности процесса. После успешной демонстрации этого метода дальнейшие исследования и разработки по лазерно-дуговой гибридной сварке не получили быстрого развития из-за отсутствия надежного лазерного источника высокой мощности, необходимых человеческих навыков и неполных знаний процесса [20]. Разработанные надежные промышленные лазеры высокой мощности в конце 1980-х годов [21], вновь привлекли внимание исследователей из промышленной отрасли и научных кругов, к совершенствованию процесса, чтобы сделать его конкурентно-способным и применяемым в промышленности.

Были устранены некоторые недостатки процесса, в том числе такие как недостаточная способность перекрывать зазоры и влияние отражательной способности материалов, которые больше не являются проблемой для успешной сварки [22-24]. В 1990-х годах гибридная лазерная дуговая сварка получила значительное развитие благодаря доступности мощного CO₂-лазера. Проведен ряд исследований процессов гибридной лазерно-дуговой сварки с акцентом на экономическую целесообразность процесса, влияние относительного положения электрода и луча и подготовки кромок, минимизацию металлургических дефектов, оптимизацию технологических параметров и др. [25-28]. Однако, после сообщения о весомых

преимущества процесса, его очень ограниченное промышленное применение было связано с высокой стоимостью оборудования и сложностью процесса из-за большого количества параметров управления и недоступностью интегрированной коммерческой гибридной системы лазерной дуговой сварки.

Первая промышленная ГЛС система была разработана и введена в строй в 2000 году компанией Fraunhofer ILT, Германия, в нефтяной промышленности [29]. Эта система была далее внедрена в других отраслях промышленности, включая автомобилестроение, судостроение и трубную промышленность для сварки металлических листов [29]. В настоящее время в продаже имеется ряд систем гибридной лазерной дуговой сварки [30-33]. Промышленное применение гибридной лазерной сварки возросло в этом столетии не только благодаря разработке серийно выпускаемых интегрированных гибридных сварочных головок [5], но и за счет наличия более дешевых, надежных и эффективных лазерных систем высокой мощности, появившихся с развитием приборостроения, автоматизации и управления.

Процесс ГЛС имеет несколько технологических преимуществ по сравнению с отдельными процессами лазерной сварки и дуговой сварки. Это более высокая скорость сварки [34-36] и глубина проникновения [37-39], повышенная производительность [19, 34], меньшее количество проходов [40], узкий сварной шов с небольшими зонами термического влияния [41, 42], улучшенное сваривание швов с зазорами [5, 34, 43], повышенная стабильность сварного шва и плавление боковых стенок [44], более низкие финансовые затраты [5, 19] и т. д.

Использование вторичного источника тепла в качестве электрической дуги компенсирует потребность в лазерном источнике высокой мощности, что резко снижает стоимость установки [19, 34]. Гибридная лазерная дуговая сварка способна сваривать самые разные металлы и сплавы, в том числе материалы с высокой отражательной способностью и химически активные

металлы. Хотя процесс гибридной лазерной дуговой сварки имеет многочисленные технологические преимущества, он также имеет определенные ограничения, такие как более высокие начальные инвестиции, требование точного позиционирования и правильной сборки деталей, контроль большого количества параметров процесса и требование дополнительных мер безопасности.

1.2 Гибридные системы лазерной дуговой сварки

Разработан ряд гибридных систем лазерной дуговой сварки на основе различных комбинаций систем лазерной и дуговой сварки. Наиболее часто используемыми лазерами являются CO₂-лазеры и Nd:YAG-лазеры. Различные виды дуговой сварки такие как GMAW (сварка плавящимся электродом в защитном газе), GTAW (сварка вольфрамовым электродом в защитном газе) и PAW (плазменная дуговая сварка) используются в качестве дугового компонента ГЛС [5, 34, 43, 45, 46-52]. Наиболее часто используемой системой дуговой сварки при гибридной лазерной дуговой сварке является GMAW [11, 34, 37, 43, 49, 62-65]. GTAW и PAW также широко используются в процессах гибридной лазерной дуговой сварки [19, 45-48, 66-67]. Процесс сварки под флюсом (SAW) также может быть использован в гибридной лазерной дуговой сварке [68].

Лазеры используются в качестве основного источника тепла в гибридной лазерной дуговой сварке. CO₂-лазер - самый мощный лазер с непрерывной волной, доступный до сих пор. Выходная мощность CO₂-лазера с непрерывной волной может варьироваться от нескольких ватт до 50 киловатт или более, а в импульсном режиме пиковая мощность может достигать миллионов ватт.

Nd:YAG-лазер является наиболее широко используемым твердотельным лазером для обработки материалов. Максимальная доступная мощность серийного Nd:YAG-лазера с непрерывной волной находится в

диапазоне нескольких киловатт. В режиме модуляции добротности пиковая мощность Nd:YAG-лазера может быть достигнута в диапазоне гигавайт с длительностью импульса в наносекундах. Основное различие между CO₂-лазером и Nd:YAG-лазером заключается в их рабочих длинах волн. Nd:YAG-лазер имеет более короткую длину волны (1,064 мкм), а также имеет лучшее качество луча по сравнению с CO₂-лазером (10,6 мкм). Лазерный луч с более короткой длиной волны используется для сварки отражающих металлов, таких как алюминий, нержавеющая сталь, медь, золото и т. Д. Из-за более короткой длины волны Nd:YAG-лазера лазерный луч может транспортироваться от источника к рабочей станции через оптоволоконные кабели.

Качество сварки Nd:YAG-лазером для сварки алюминиевых и магниевых сплавов превосходит сварку CO₂-лазером, поскольку использование Nd:YAG-лазера снижает пороговое излучение, необходимое для сварки в замочной скважине, что, в свою очередь, приводит к более стабильной сварочной ванне [53]. Nd:YAG-лазер обладает большей эффективностью сварки, чем CO₂-лазер [53], [54]. Электрооптическая эффективность, как у лазера CO₂, так и у лазера Nd:YAG, очень низкая и находится в диапазоне всего 2–20%. Другими потенциальными альтернативами лазеров на CO₂ и Nd:YAG для гибридной лазерной дуговой сварки являются дисковые и волоконные лазеры [14, 52, 55-60].

Преимуществами волоконных и диодных лазеров являются их высокая выходная мощность, высокое оптическое качество, компактный размер, высокая пиковая мощность, более высокая электрооптическая эффективность (20–40%) и низкая стоимость за 1 кВт по сравнению с лазерами на CO₂ и Nd:YAG. Применение волоконных лазеров в гибридной лазерной дуговой сварке набирает популярность в последние годы благодаря увеличению выходной мощности и высокому качеству луча, способных сваривать алюминиевые [2, 55, 56] и титановые сплавы [57, 58], которые

трудно сваривать CO₂ лазерами. Диодные лазеры также могут быть использованы для сварки. Применение диодных лазеров в гибридной лазерной дуговой сварке ограничено его неспособностью образовывать узкий и длинный канал (keyhole-замочная скважина) из-за его относительно низкой выходной мощности и низкого качества луча. Однако использование мощного диодного лазера в сварке с глубоким проплавлением было описано в работе [61].

1.3 Гибридный процесс лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом (GMAW)

В гибридном лазерном процессе GMAW в качестве первичного источника тепла используется CO₂-лазер, Nd:YAG-лазер или волоконный лазер, а электрическая дуга, возникающая во время GMAW, широко известная также как сварка MIG (металл - инертный газ), используется в качестве вторичного источника тепла. В этом процессе возникает дуга между расходуемым металлическим электродом и заготовкой. Электрод непрерывно запитан от источника. Лазер проделывает узкий канал в сварочной ванне, который обеспечивает сварку с глубоким проникновением, в то время как расплавленный присадочный материал, полученный из электрода, помогает заполнить корневой зазор и позволяет осуществлять сварку деталей с относительно большими зазорами и проблемами при сборке [34]. Известно, что стабильность дуги улучшается при ее сочетании с лазерным лучом [28]. Использование присадочных материалов улучшает химический состав сварного шва за счет добавления легирующих элементов в сварочную ванну, а также улучшает механические свойства сварного шва [69]. Большой объем ванны расплава, образующейся во время GMAW процесса, способствует большей эффективности этого процесса для преодоления сварочных зазоров, чем в случае сварки неплавящимся электродом.

Защитные газы используются для защиты расплавленной сварочной ванны от атмосферного загрязнения. Инертные газы, такие как гелий, аргон

или азот, или смесь этих газов в различных пропорциях обычно используются во время сварки MIG (металл - инертный газ), тогда как во время MAG используются активные газы, такие как CO₂, O₂ или смесь CO₂ с инертными газами в различных пропорциях, как сварка в среде защитного газа [6, 12, 70-72].

1.4 Гибридный лазерный процесс GTAW

В гибридном лазерном процессе GTAW электрическая дуга возбуждается между заготовкой и неплавящимся вольфрамовым электродом, используемым в качестве вторичного источника тепла. Из-за использования нерасходуемого вольфрамового электрода во время сварки могут потребоваться дополнительные присадочные материалы. Скорость осаждения металла во время гибридного лазерного процесса с неплавящимся электродом намного меньше, чем в случае использования плавящегося (GMAW), потому что только часть тепла дуги используется для расплавления присадочной проволоки во время процесса гибридной лазерной сварки неплавящимся электродом. Поскольку присадочная проволока электрически отделена от электрической цепи установки гибридной лазерно-дуговой сварки GTAW, сварочный ток и скорость осаждения металла во время сварки определяются независимо друг от друга. Однако загрязнение электрода из-за горячих паров металла, эрозия наконечника вольфрамового электрода из-за использования высокочастотного зажигания дуги и высокое сродство вольфрама с кислородом являются общими проблемами, связанными с процессом GTAW [21]. Защитный газ используется для защиты сварочной ванны, а также для защиты электрода от атмосферного загрязнения или образования оксидов. Скорость плавления основного материала для гибридного лазера GTAW почти вдвое больше суммы плавления лазерной сварки и сварки TIG в отдельности [75].

1.5 Гибридный лазерный процесс PAW

В гибридном лазерном процессе PAW сжатая плазменная дуга используется в качестве вторичного источника тепла. Нерасходуемый вольфрамовый электрод, используемый в PAW, утоплен в сварочную горелку. Сжатое сопло малого диаметра с водяным охлаждением используется внутри сварочной горелки для сжатия дуги, что увеличивает ее интенсивность и улучшает стабильность и форму дуги. Инертный газ, пропущенный через сужающее сопло, используется для производства плазмы. Эффект экранирования дополнительно усиливается за счет использования другого защитного газа, который проходит через внешнее кольцо горелки. В PAW дуга устанавливается либо между электродом и сужающим соплом (дуга без переноса), либо между электродом и материалом заготовки (дуга переноса). По сравнению с дугой, получаемой с использованием неплавящегося электрода, плазменная дуга более стабильна и не может легко отклоняться в ближайшей точке основного металла из-за эффекта сужения струи плазмы. Эффект гибридации лазера и плазменной дуги увеличивает скорость сварки и стабилизирует плазменную дугу. Глубина провара для гибридного лазерного процесса PAW больше, чем для лазерной сварки при одинаковом подводе энергии на единицу длины сварного шва [46]. По сравнению с показателями ГЛС сварки с использованием неплавящегося электрода (GTAW) подвод тепла от дуги может быть снижен до 40% при использовании гибридного лазера PAW [48].

1.6 Мощность лазера

Мощность лазера является основным источником тепла при гибридной лазерной дуговой сварке, которая обеспечивает сварку с глубоким проникновением [10, 60, 87]. Благодаря использованию электрической дуги с лазером в одной сварочной ванне, поглощение энергии лазерного излучения металлом [18] и циркуляция расплавленного металла в сварочной ванне увеличиваются [88]. Мощность лазера оказывает наибольшее влияние на

параметры сварки. Глубина сварного шва увеличивается с увеличением мощности лазера [71, 89].

1.7 Скорость сварки

Высокая скорость сварки является характерной особенностью гибридной лазерно-дуговой сварки, которая повышает производительность. Тем не менее, ширина сварного шва и глубина провара зависят от скорости сварки [1, 4, 10, 91]. Для увеличения скорости сварки требуется одновременно увеличить мощность лазера и скорость подачи присадочной проволоки, с тем чтобы поддержать постоянство объема сварочной ванны [91]. Скорость сварки и скорость подачи присадочной проволоки являются важными факторами стабильности всего процесса [34]. Слишком высокая скорость сварки может привести к неправильному плавлению или недостаточному провару сварного шва, в то время как слишком низкая скорость сварки может создать большую сварочную ванну с избыточным проваром или, даже прожогом шва, а также может вызвать частичное оплавление основного металла [60]. Быстрый цикл нагрева и охлаждения из-за более высокой скорости сварки приводит к резкому температурному перепаду в зоне сварки шва [92], что может привести к металлургическим дефектам в сварном шве [10]. Однако увеличение скорости сварки может эффективно снизить величину остаточных термических напряжений [16].

1.8 Составы защитных газов

Защитные газы в основном используются для защиты сварочной ванны от действия окружающей атмосферы. Использование защитных газов и их состав также влияют на характеристики дуги, формирование профиля сварного шва и режим переноса металла [105]. Инертные газы, такие как гелий и аргон, являются преобладающими компонентами защитных газов, используемых в гибридных процессах лазерной дуговой сварки [17, 41, 84, 100, 106]. Азот, углекислый газ, угарный газ (CO) также используются в качестве компонентов защитного газа на основе выбора материалов,

лазерного источника и параметров дуги [4, 15, 70, 98, 107, 108]. Поглощение лазерной энергии лазерно-индуцированной плазмой или газовым шлейфом в процессе гибридной сварки лазерной дугой CO_2 является хорошо известной проблемой. Это уменьшает интенсивность излучения, достигающего сварочной ванны, уменьшает величину провара. Использование защитного газа с высоким потенциалом ионизации, такого как гелий, при сварке CO_2 -лазером снижает эффект поглощения плазмы [15, 70].

Смесь аргона, гелия и CO_2 также используется в процессах гибридной дуговой сварки CO_2 лазером [34, 98, 106]. Использование гелия обеспечивает более глубокий провар, в то время как использование аргона улучшает стабильность дуги. Обнаружено, что при гибридной сварке высокопрочной стали с использованием CO_2 -лазера и дуговой сварки плавящимся электродом (GMAW), при котором содержание гелия в защитном газе составляет менее 30%, требуется дополнительный источник гелия [62]. Обнаружено, что использование CO в защитном газе до 10% в процессе GMAW гибридного CO_2 -лазера стабилизирует дугу [62]. Использование небольшого процента кислорода ($\leq 5\%$) в защитном газе уменьшает образование брызг и улучшает перенос металла во время сварки [15]. Использование CO_2 в качестве защитного газа в значительной степени при гибридной лазерной дуговой сварке приводит к увеличению провара, снижению пористости и стоимости процесса при одновременном увеличении количества брызг [109]. Поглощение лазерного излучения газовой плазмой при гибридной сварке незначительно для лазеров с относительно небольшой длиной волны [110].

Таким образом, выбор состава защитного газа при сварке с использованием Nd:YAG, волоконного и дискового лазеров основывается главным образом на требованиях защиты и поддержания стабильности горения дуги. В некоторых случаях, например, при сварке химически активных металлов (титан), для подачи защитного газа используется дополнительная насадка/горелка, которая перемещается вслед за дугой для

предотвращения образования оксидов на поверхности во время его охлаждения [69].

1.9 Зазор соединения

Лазерный луч может сваривать стыковые швы с зазором между деталями до 0,2–0,25 мм без формирования видимых дефектов, таких как подрез или непровар сварной шов. В то же время ГЛС способна легко сваривать детали с зазором в 1 мм [5, 34, 36, 74]. Отношение величин вводимой лазером энергии лазера к энергии дуги, расстояние между лазером и дугой, скорость сварки и скорость подачи проволоки являются критическими параметрами, которые определяют скорость заполнения стыкового зазора и формирования шва [119]. В ходе гибридной сварки высокопрочной углеродистой стали с использованием CO₂-лазера и плавящегося электрода наблюдалось увеличение скорости подачи проволоки из-за зазора в стыке [34]. В [34, 43] показано, что скорость сварки может быть увеличена во время сварки деталей, имеющих зазор в стыке до 1 мм, поскольку небольшой зазор в соединении упрощает проварку металла шва, за счет того, что большее количество присадочного материала достигает корня шва. Однако увеличение зазора в стыке более 1 мм требует уменьшения скорости сварки, а также дополнительного выбора оптимальных параметров процесса [34]. Большой зазор в стыке шва может потребовать несколько проходов сварки и использование опорной пластины.

1.10 Виды соединений и подготовка кромок

Стыковые, угловые, кромочные, кольцевые и тройниковые соединения - основные виды соединений, получаемые при сварке. Все эти конфигурации соединений также используются в гибридной лазерной дуговой сварке. Из-за малого диаметра пятна лазерного луча для сварки лазером используются неподготовленные кромки без фасок, в то время как при дуговой сварке, особенно для толстых сечений, на краях стыков выполняются канавки. Заполнение шва путем наплавки с использованием

дуговой сварки и лазерного луча на листах металла различной толщины требует изменения технологии подготовки кромок [40]. Тонкие металлические листы или металлические пластины толщиной менее 6–8 мм не требуют подготовки кромок для сварки с использованием гибридной лазерной дуговой сварки. Для материала толщиной более 6–8 мм требуется подготовка кромок. V- или Y-образная канавка, используемая для лазерной дуговой гибридной сварки, напоминает форму «бокала» или «воронки» [1, 16, 104, 120]. Канавки, используемые в деталях для гибридной лазерной дуговой сварки, обычно имеют меньший угол, узкое корневое отверстие и большую толщину поверхности по сравнению с канавками, используемыми в дуговой сварке [40, 97, 121]. Установлено, что двойная Y-канавка может обеспечить оптимальные условия для стабильности дуги и лазера [97]. Для детали, имеющей различную толщину, канавка выполнена таким образом, что толщина обеих частей ближе к поверхности шва должна быть одинаковой, а разность высот компенсироваться валиком. Большая сварочная ванна на поверхности имеет лучшую устойчивость к геометрическим несоответствиям.

1.11 Промышленное применение

Более высокая производительность и лучшее качество шва по сравнению с лазерной или дуговой сваркой, делают ГЛС привлекательной альтернативой для различных отраслей промышленности. Капитальные затраты на сварочную систему могут быть компенсированы за счет обеспечения более высокой скорости сварки и более глубокого провара для снижения стоимости на единицу длины сварного шва. Гибридная лазерная дуговая сварка может быть использована для сварки широкого спектра металлов от черных металлов, таких как углеродистые конструкционные и нержавеющие стали до цветных металлов, таких как алюминий, магний, никель, титан и их сплавы и т. д. [6, 9, 10, 14, 83, 89, 90-111, 113, 131]. ГЛС может сваривать как тонкие листовые металлы, так и толстые металлические

пластины. Высокая скорость сварки и глубокий провар позволяют сваривать толстые листы с использованием меньшего числа проходов, что способствует уменьшению деформаций сварного соединения.

Первая промышленная гибридная лазерная дуговая система была развернута в Fraunhofer ILT компании - производителе нефтяных резервуаров в 2000 году. Этот вид сварки вызывает интерес среди отраслей промышленности, использующих сварку в больших объемах, что приводит к установке ряда систем лазерной дуговой гибридной сварки в автомобильной промышленности, судостроении и промышленности по производству труб [29]. Гибридная лазерная дуговая сварка также нашла свое применение в аэрокосмической промышленности, производстве подвижного состава и контейнеров, оффшорной промышленности в строительстве, производстве трубопроводов, тяжелом машиностроении, энергетике и т. д. Различные аспекты ГЛС, такие как большой потенциал для автоматизации, низкая стоимость на единицу длины сварного шва, свариваемость материалов исследуется многими учёными для различных промышленных применений, таких как судостроение, трубопроводная промышленность, морская промышленность и т. д. [125, 132, 133].

Возможность перекрытия зазоров с более быстрой обработкой гибридной лазерной дуговой сварки делает ее весомой альтернативой в автомобильной промышленности. Крупные автомобильные отрасли, такие как Volkswagen и Audi, внедрили гибридную лазерную дуговую сварку на своих производственных линиях [134]. Всего 48 различных гибридных сварных швов изготавливаются на каждом из автомобилей Volkswagen Phaeton для получения высококачественных угловых и стыковых соединений для различных профилей, отливок и алюминиевых листов. Каркас и различные части автомобиля Audi A8 свариваются с помощью гибридной лазерной дуговой сварки. Исследована ГЛС-свариваемость высокопрочной TRIP-стали (трансформационно-индуцированной пластичности) для автомобильной промышленности с использованием Nd:YAG-лазера

мощностью 2 кВт и системы сварки MIG 350A, а также улучшен перенос металла и провар шва [135].

Немецкая судостроительная компания Meyer-Werft GmbH внедрила гибридный лазер GMAW на своей производственной линии для сварки стальных панелей и элементов жесткости конструкций судов. При использовании CO₂-лазера мощностью 12 кВт с установкой GMAW 450 A успешно изготавливаются угловые соединения толщиной 12 мм со сварными швами длиной до 20 м. Использование гибридной техники сварки уменьшило деформацию сварного шва и, таким образом, в значительной степени снизило необходимость доработки для выравнивания деталей. Также наблюдается увеличение скорости сварки и снижение потребности в присадочном материале. Характеристики сварных профилей определяются испытаниями на растяжение, испытаниями на твердость, испытаниями на удар, испытаниями на изгиб и испытаниями на усталость, получены удовлетворительные результаты [136].

Итальянская судостроительная компания Fincantieri также внедрила гибридную лазерную дуговую сварку, используя лазер Nd:YAG и технику сварки MAG, что позволяет им эффективно решать такие проблемы, как остаточные деформации сварного шва и устранение зазора в стыке [137]. Гибридная система дуговой сварки с использованием волоконного лазера также разработана и для судостроительства [138]. Результат опубликован в работе [139], где сообщается о применении автоматической гибридной установки мощностью 25 кВт CO₂-лазер мощностью 6 кВт в судостроительной и других отраслях промышленности. Установка интегрирована с различными системами и контролируется в режиме онлайн с возможностью отслеживания шва, мониторинга качества сварки и программного обеспечения для управления процессом.

Такие материалы, как сталь ASTM A-36, высокопрочная легированная сталь (HLSA 65) и супер-аустенитная нержавеющая сталь (AL6-XN) толщиной до 12 мм, успешно свариваются с полным проваром, используя

скорости сварки от 1,9 м / мин до 2,5 м. / мин. Так же, успешно выполняется гибридная лазерная TIG-сварка стальных листов 10CrNiMnMoV толщиной 16 мм [1], с хорошей микроструктурой и размером зерна, а также достигаются лучшие механические характеристики, которые выше, чем CCS (China Classification Society) требования морских стандартов. Стальные плиты для судостроения АНЗ6 толщиной 8 мм успешно сваривают гибридной лазерной MAG-сваркой в перевернутой T-конфигурации [119].

Авиационно-космическая промышленность использует материалы, имеющие малый удельный вес и высокую удельную прочность: алюминий, магний, титан и их сплавы. Конструкции воздушных судов в первую очередь испытываются на усталостную прочность и выносливость с определением критических режимов. Удовлетворительные механические свойства с повышенной усталостной прочностью достигаются при гибридной CO₂-лазерной и MIG сварке на алюминиевом сплаве AA6013[49]. Пластины из алюминиевого сплава толщиной 12,7 мм успешно свариваются с использованием гибридных процессов лазерной Nd:YAG и дуговой MIG сварки, а также волоконного лазера и MIG сварке [55]. Коммерчески чистый титановый лист толщиной 1,5 мм сваривался со скоростью сварки до 9 м / мин с использованием гибридной волоконной лазерной и сварки MIG. Прочность и пластичность сварных деталей гибридной сваркой по сравнению с волоконно-лазерной сваркой значительно выше [58].

Гибридная лазерно-дуговая сварка используется в энергетике для сварки плотных стеновых панелей и ребристых труб котлов. Методы сварки гибридным лазером MAG были приняты компанией Energoinstal SA для изготовления стеновых панелей и ребристых труб котлов из-за стабильности процесса, более низкой чувствительности к зазорам в стыках, хорошего провара и более высокой эффективности гибридной технологии сварки [141]. Промышленное применение гибридной системы CO₂-лазера и GMAW для сварки телескопических подъемников описано в работе [142]. Основная причина использования этой системы в производственной единице

заклучалась в ее способности эффективно сваривать швы с стыковыми зазорами. Сплав AA6005-T5 применяется в кузовах высокоскоростных железнодорожных транспортных средств. Использование гибридной лазерной сварки MIG из сплава AA6005-T5 приводит к узкой ширине зоны зазора и большей прочности соединения, чем у сварного соединения MIG [42].

2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1 Материалы для исследования

Материалом для данного исследования была выбрана конструкционная ферритно-перлитная сталь 09Г2С. В качестве заготовок использовались пластины толщиной 12 мм и размером 300×120мм.

Сталь 09Г2С – это очень востребованная сталь, используется как в строительстве, так и во многих отраслях промышленности. Существуют отечественные и зарубежные аналоги этого вида. Наиболее часто используется для изготовления труб, металлопроката и сварных металлоконструкций, температурный диапазон использования которых от минус 70 до плюс 425 °С с допустимыми нагрузками на них.

Табл. 2.1

Химический состав стали 09Г2С (13Мнб) (массовая доля элементов, %)

С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	V	Fe
до 0,12	0,5- 0,8	1,3- 1,7	до 0,3	до 0,035	до 0,03	до 0,3	до 0,3	до 0,12	Ост.

Как видно из таблицы химический состав стали 09Г2С включает, кроме углерода, кремния и марганца, также никель, сера, фосфор, хром, азот,

медь и примеси. Процентная составляющая легирующих металлов не более 1-2 суммарных %.

Принято считать, что если на легирующие элементы приходится менее 2,5% состава, то сталь имеет низколегированный состав. Концентрация углерода и наличие примесей определяют характеристики применения стали 09Г2С.

Сталь марки 09Г2С имеет следующие критические точки:

- $A_{c1} = 732^{\circ}\text{C}$, когда аустенит превращается в перлит процессах охлаждения;
- $A_{c3}(A_{cm}) = 870^{\circ}\text{C}$ (с – от французского *chauffage*/нагрев) точка конца растворения цементита;
- $A_{r3}(A_{rcm}) = 854^{\circ}\text{C}$ (*refroidissement* – охлаждение) начало выделения Fe_3C ;
- $A_{r1} = 680^{\circ}\text{C}$ доэвтектоидная сталь, соответствует выделению феррита.

Характеристики рассматриваемой стали:

За счет включения в состав определенных примесей сталь 09Г2С приобретает характеристики следующего типа:

- Описание стали 09Г2С. Повышенный механический предел прочности.
- Сопротивление воздействию высоких температур.
- Возможность проведения термообработки для повышения эксплуатационных качеств. К примеру, закалка существенно повышает твердость поверхности.
- Плотность или удельный вес составляет 7,85 грамма на кубический сантиметр материала. Этот момент определяет возможность получения легких изделий.

Кроме этого, сварка может проходить без предварительного подогрева конструкции. Поэтому процесс сваривания отдельных деталей, изготавливаемых из рассматриваемого материала, существенно упрощен. Хорошая свариваемость определяется низкой концентрацией углерода.

2.2 Методика получения образцов неразъёмных соединений

Образцы получены методом гибридной лазерной сварки из листового проката стали 09Г2С толщиной 5-12 мм. Схема получения образцов приведена на рис. 2.1. Для получения неразъёмных соединений использовался иттербиевый волоконный лазер производства компании IPG с длиной волны 1,03 мкм. При сварке лазерное излучение было направлено перпендикулярно к плоскости заготовок, фокус лазерного излучения находился на плоскости лицевой поверхности сварных заготовок. Плоскопараллельные заготовки фиксировались на сварочном столе механическим устройством. Для достижения полного проплавления выдерживался воздушный зазор между свариваемыми пластинами, величина которого составляла 0,8 мм. Данная величина зазора обеспечивала наибольшую эффективность сварочного процесса.

Постановка сварочной горелки производилась следующим образом. Сварочная горелка дугового источника находилась позади лазерного источника на расстоянии $D_L=8,0$ мм, что дало возможность разделить две взаимодействующие зоны: сварочную ванну от лазерного источника и сварочную ванну от дугового источника. Мощность лазерного излучения при сварке составляла 10 кВт, ток дуги – 184 А, напряжение дуги – 26,2 В, скорость сварки – 1 м/мин.

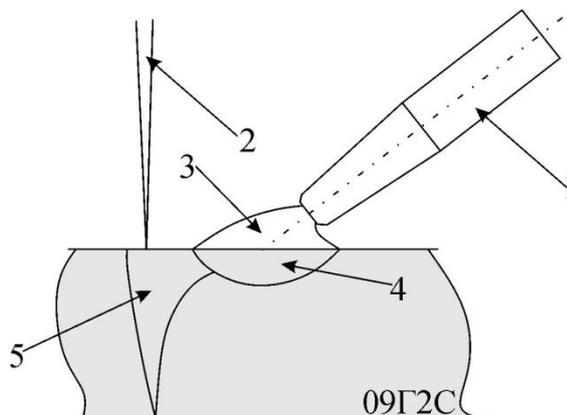


Рис. 2.1. Схема процесса гибридной лазерной сварки

1-дуговой источник, 2- лазерный луч, 3-дуга, 4-сварочная ванна от дуги, 5- сварочная ванна от лазера.

Сварка осуществляется комбинированным методом посредством дуги 3 от дугового источника 1 и лазерного луча 2. В результате образуются сварочные ванны от лазера 5 и дуги 4 с запаздыванием ванны от дуги на некоторое расстояние относительно ванны от лазера.

2.3 Методика получения образцов для испытаний

2.3.1 Методика получения образцов для структурных исследований макроскопических характеристик

Отбор образцов производится из элементов крупногабаритных сварных заготовок на расстоянии не менее 50 мм от начала или от конца сварного шва. Вырезка образцов должна производиться из различных участков по длине сварного шва. Из неразъемных соединений производится вырезка образцов для каждого типа механических испытаний или структурных исследований.

Образцы для проведения структурного анализа изготавливаются методом механической вырезки из образцов крупногабаритных цилиндрических и плоских листовых заготовок с дальнейшей вырезкой шлифов на электроискровом станке. Дальнейшая подготовка заключается в механическом шлифовании и полировке. После полировки образцы подвергать химическому травлению.

Вырезка образцов производится поперечно направлению сварного шва по схеме, представленной на рисунке 2.2. Толщина шлифов для ГЛС соединений должна быть не менее 5 мм, ширина - соответствовать толщине свариваемых листов, а длина от 15 до 55 мм в зависимости от толщины листового проката. Длина подбирается таким образом, чтобы на шлифе присутствовали помимо шва и околошовной зоны участки основного металла, не подверженные влиянию сварки. Шлифы необходимо вырезать на расстоянии не менее 50 мм от края сварного шва.

Шлифы должны храниться в условиях, не способствующих химическому или механическому повреждению подготовленных поверхностей в процессе хранения.

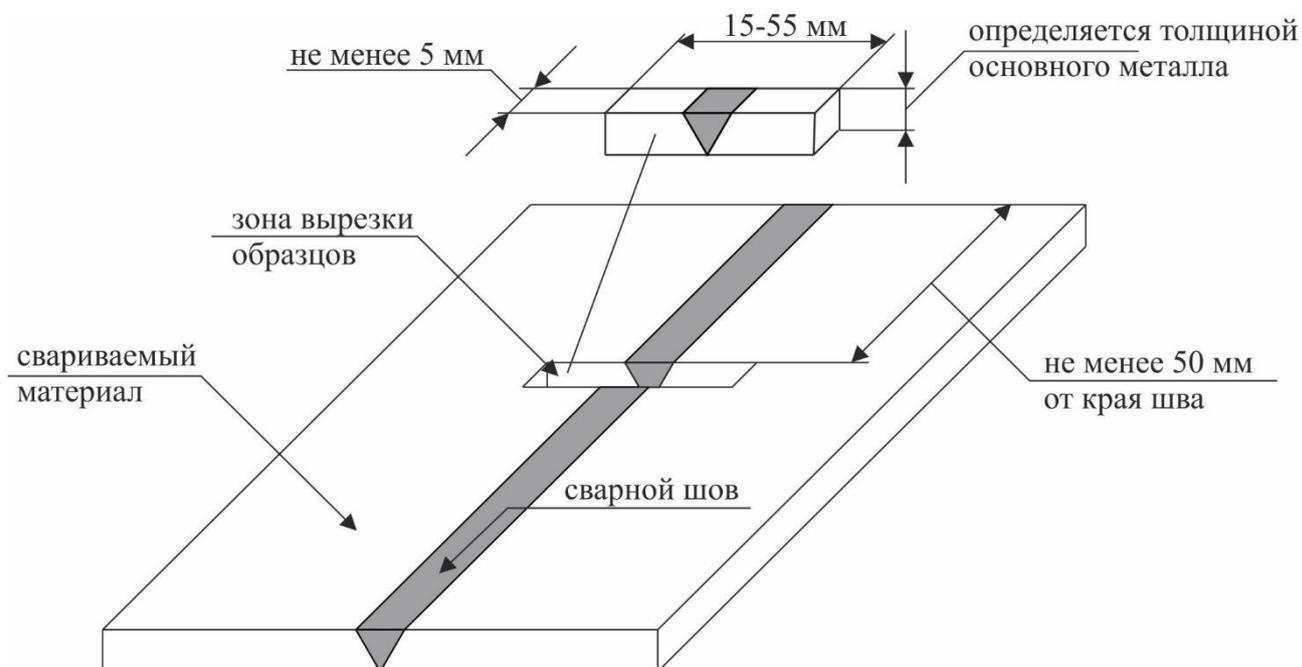


Рисунок 2.2. Схема вырезки образцов для структурных исследований макроскопических характеристик

Для исследования макроструктуры сварных ГЛС соединений, полученных при изготовлении крупногабаритных плоских и цилиндрических конструкций необходимо производить подготовку шлифов следующим образом.

Сначала выполняется шлифование поверхности шлифов с помощью шлифовальной бумаги различной зернистости (ГОСТ 6456), а в дальнейшем полируются с применением алмазной пасты зернистости АСМ 1/0, АСМ 0,5/0 ВОМ (ГОСТ 25593).

Образцы после полировки необходимо хранить в условиях, препятствующих окислению и ухудшению качества образцов.

Обработанные шлифовкой и полировкой поверхности шлифов подвергают химическому или электрохимическому травлению следующим

образом, для стали 09Г2С применяется 4 % водный раствор азотной кислоты. Травить погружением в раствор на 1-2 с.

2.3.2 Методика получения образцов для испытаний на статическое растяжение

Для определения временного сопротивления при статическом растяжении в соответствии с ГОСТ 6996-66 производится вырезка образцов из заготовок сварных конструкций ГЛС соединений. Вырезка образцов осуществляется в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.3 с соблюдением отступов от начала и конца шва таким образом, чтобы сварной шов располагался преимущественно в центральной части рабочей зоны лопатки для испытаний.

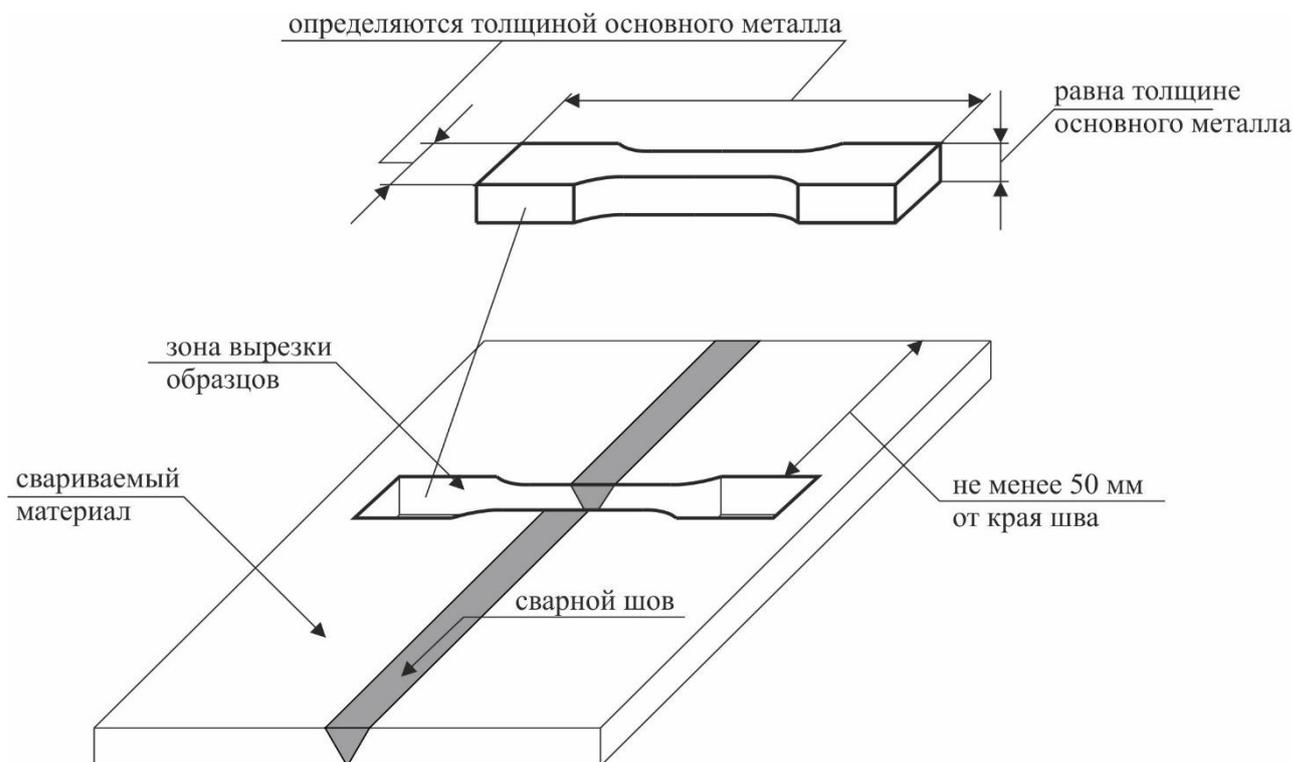


Рисунок 2.3. Схема вырезки образцов для определения временного сопротивления при растяжении и количества циклов до разрушения из ГЛС соединений

Размеры образцов в зависимости от толщины основного металла выбираются в соответствии с ГОСТ 6996-66. Схемы образцов с указанием

размеров приведены на рисунке 2.4. Наличие усиления сварного шва с лицевой стороны, не препятствующее проведению испытаний не учитывается при испытаниях и само утолщение в зоне шва не удаляется. При необходимости данное утолщение может быть удалено механической обработкой.

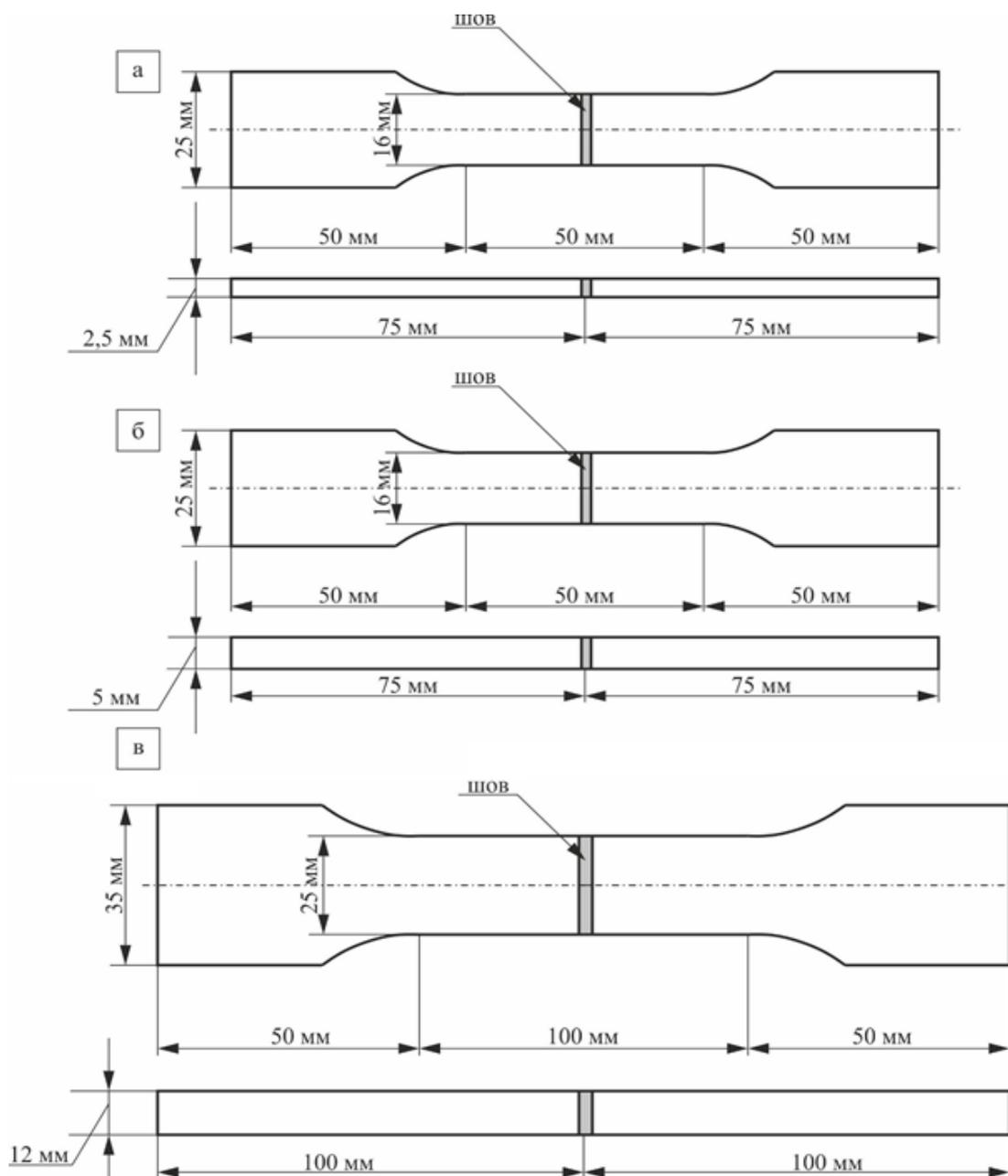


Рисунок 2.4 – Схемы изготовления образцов для испытаний на растяжение неразъемных соединений, полученных методом ГЛС

2.3.3 Методика получения нестандартных образцов для определения временного сопротивления при статическом растяжении

Исследования проводились как на стандартных, так и на специально подготовленных образцах меньшего размера, позволяющих испытать металл шва разных зон плавления – дуговой и лазерной. Способ заключался в исследовании на статическое растяжение. При изготовлении нестандартных образцов для испытаний на статическое растяжение производилась их резка на электроискровом станке по схеме, указанной на рис. 2.5. Затем, рабочая поверхность подготавливалась наждачной бумагой разной зернистости с последующей полировкой и травлением для выявления места последующего утонения. Для испытания нестандартных образцов на растяжение была изготовлена соответствующая оснастка. Испытания на статическое растяжение проводились на универсальной испытательной машине УТС 110М-100 при комнатной температуре.

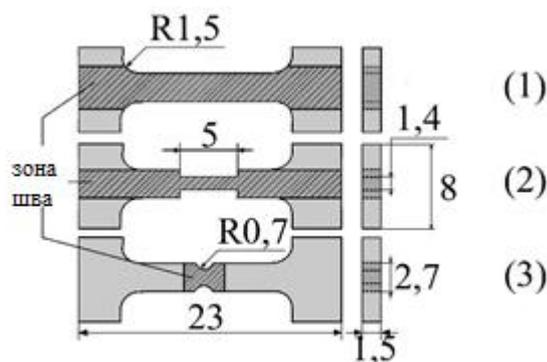


Рисунок 2.5. Схема вырезки нестандартных образцов для испытаний на статическое растяжение: тип 1 – образец для исследования механических свойств в продольном направлении сварного шва в области дугового источника, тип 2 – утоненный в области плавления лазерным излучением образец для исследования механических свойств в продольном направлении сварного шва, тип 3 – образец для исследования механических свойств в поперечном направлении сварного шва с утонением в области металла шва.

2.4 Оборудование

2.4.1 Универсальная испытательная машина УТС 110М-100

Испытания, с определением механических свойств, проводились на универсальной испытательной машине УТС 110М.

Универсальная испытательная машина УТС 110М-100 ТУ 4271-003-99369822-08 представлена на рисунке 2.6. Испытательная машина УТС 110М-100 - универсальная электромеханическая двухколонная напольная модель с двумя рабочими зонами для проведения различных механических испытаний материалов.



Рисунок 2.6. Универсальная испытательная машина УТС 110М-100.

Основные технические характеристики:

- Максимальная нагрузка 100 кН;
- Погрешность измерений в пределах $\pm 0,2\%$ от заданной скорости перемещения захватов;
- Количество испытательных зон 2;
- Габаритные размеры 2400x1200x800 мм;
- Вес машины 1100 кг.

2.4.2 Металлографический микроскоп Altami MET 1C

Исследования макро- и микроструктуры проводились на полированных и травленных в растворе (4 мл HNO_3 + 96 мл $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) шлифах поперечного сечения с использованием металлографического микроскопа Альтами MET 1С.

Металлографический цифровой комплекс Альтами MET 1С изображённый на рисунке 2.7 предназначен для исследования микроструктуры металлов и сплавов в отраженном свете в светлом поле при прямом освещении, что определяет сферу его использования: металлографические лаборатории научно-исследовательских институтов и предприятий металлургической, микроэлектронной, машиностроительной промышленности, а также в учебных заведениях.

Наличие фотоаппарата или камеры дает возможность получать цифровые снимки высокого качества, выводить их на экран компьютера или телевизора, обрабатывать и оценивать с помощью программ для анализа изображений.



Рисунок 2.7. Оптический микроскоп Altami MET 1C.

Основные технические характеристики:

- цена деления шкалы объекта-микрометра 0,01 мм;

- предметный столик, позволяющий разместить и перемещать образец весом до 2 кг;
- увеличение от $\times 50$ до $\times 2000$;
- револьверное устройство пяти позиционное.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Проведены исследовательские испытания экспериментальных образцов плоских и цилиндрических крупногабаритных листовых сварных заготовок, полученных гибридной лазерно-дуговой сваркой из стали марки 09Г2С.

3.1 Образцы неразъемных соединений крупногабаритных плоских сварных листовых заготовок

Исследования структуры и свойств образцов крупногабаритных плоских листовых сварных заготовок заключались в определении макроскопических параметров заготовок путем замеров линейных размеров заготовок, исследовании макроструктуры сварного шва по металлографическим шлифам и определению механических свойств посредством испытаний на растяжение. При исследованиях цилиндрических крупногабаритных листовых сварных заготовок проводились измерения макроскопических параметров заготовок путем замеров линейных размеров и их сравнения с требованиями технического задания, и исследования макроструктуры по типу шва по ГОСТ Р 57180 и определение макродефектов по ГОСТ Р ИСО 6520-1.

После определения размеров плоских и цилиндрических крупногабаритных листовых заготовок, полученных гибридной лазерной сваркой с ультразвуковым воздействием, производилась вырезка образцов для проведения исследовательских испытаний механических свойств и макроструктурного анализа. Типичные картины разрушения образцов при испытаниях представлены на рисунке 3.1.

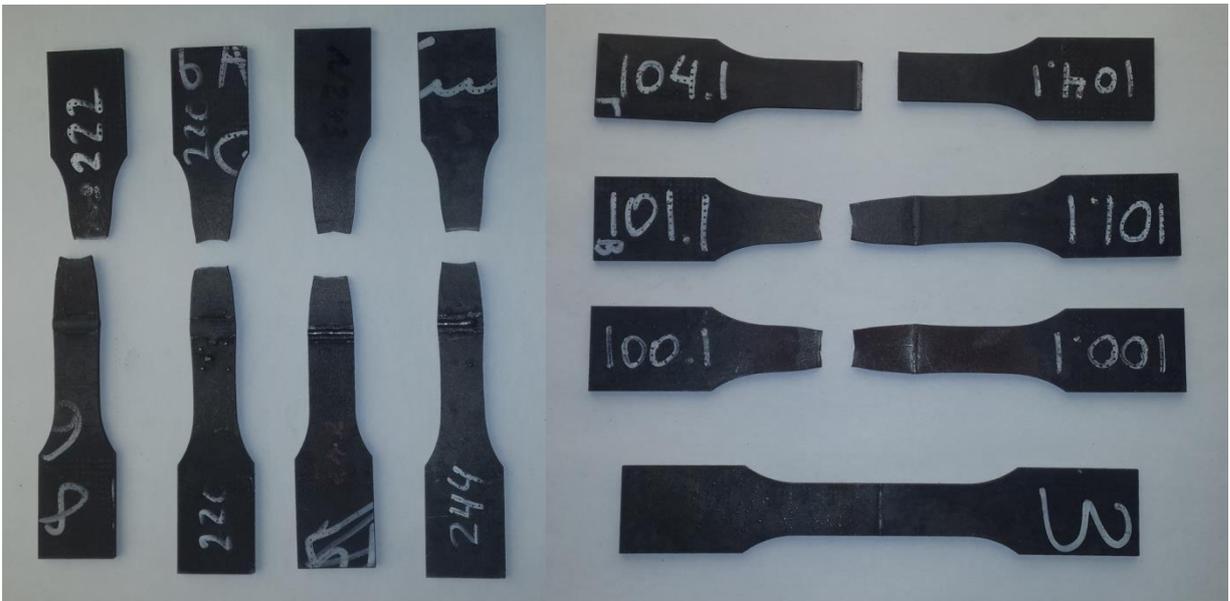


Рисунок 3.1. Образцы неразъемных соединений крупногабаритных плоских сварных листовых заготовок, полученных гибридной лазерно-дуговой сваркой, после испытаний на растяжение

3.2 Макро- и микроструктура сварного шва

Исследовательские испытания образцов стали 09Г2С толщиной 2,5 мм, показывают, что в образцах формируется бездефектная структура как для плоских (рисунок 3.2), так и для цилиндрических (рисунок 3.3) крупногабаритных сварных заготовок.

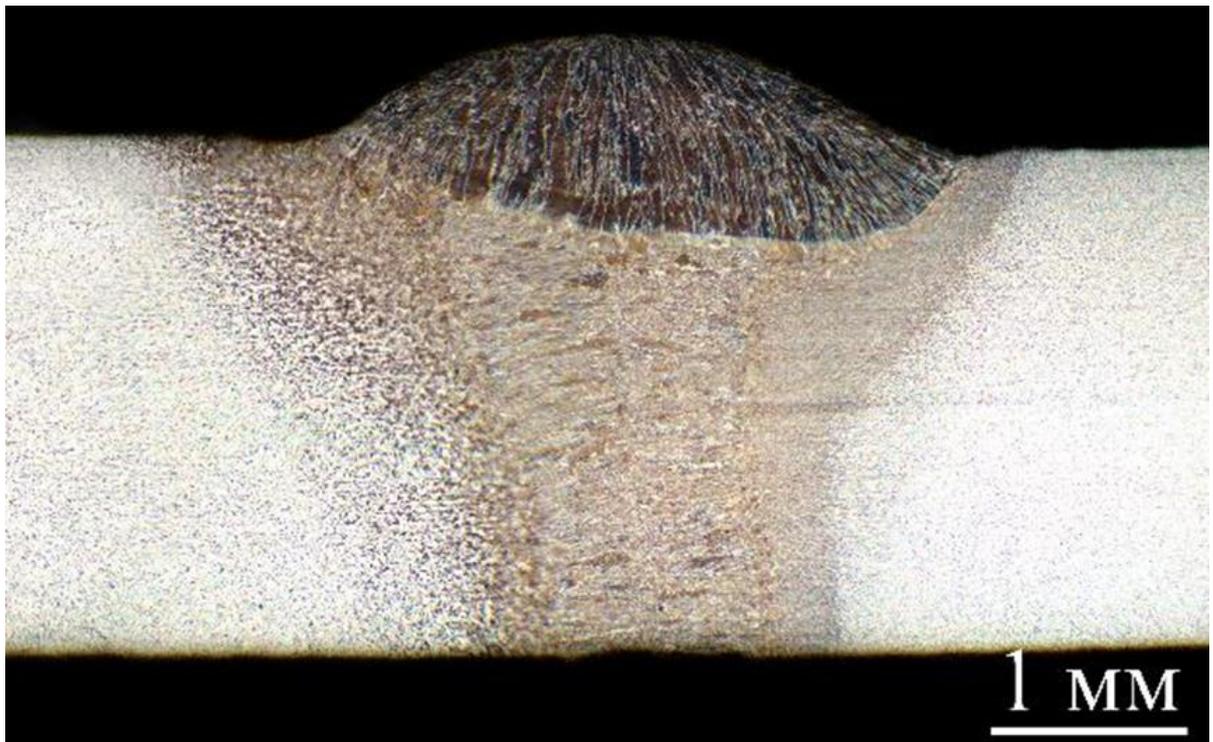


Рисунок 3.2 – Макроструктура сварного шва стали 09Г2С, вырезанного из крупногабаритной плоской сварной заготовки толщиной 2,5 мм



Рисунок 3.3 – Макроструктура сварного шва стали 09Г2С, вырезанного из крупногабаритной цилиндрической сварной заготовки толщиной 2,5 мм

Исследования макроструктуры образцов крупногабаритных сварных заготовок, полученных из стали 09Г2С толщиной 5 мм показывают, что как в плоских (рисунок 3.4), так и в цилиндрических (рисунок 3.5) сварных заготовках, практически полностью отсутствуют дефекты швов.

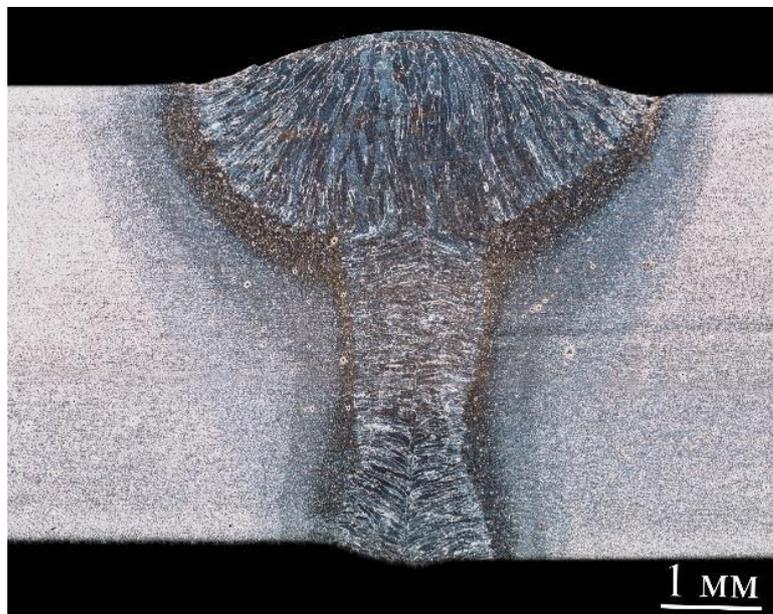


Рисунок 3.4 – Макроструктура сварного шва стали 09Г2С, вырезанного из крупногабаритной плоской сварной заготовки толщиной 5 мм

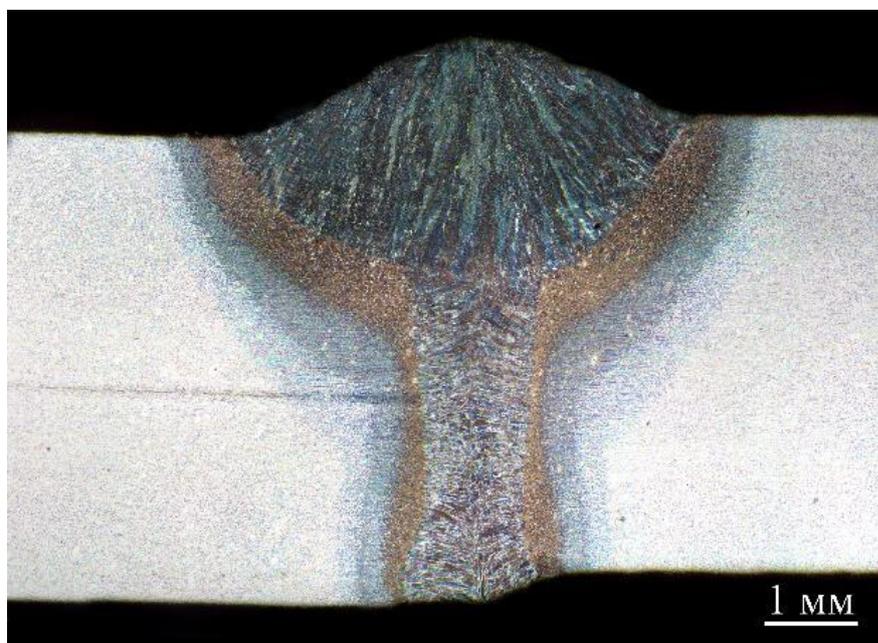


Рисунок 3.5 – Макроструктура сварного шва стали 09Г2С, вырезанного из крупногабаритной цилиндрической сварной заготовки толщиной 5 мм

На рисунках 3.6, 3.7 представлены растровые электронные изображения поверхностей разрушения образцов неразъемных соединения стали 09Г2С толщиной 2,5 и 5,0 мм после испытания на статическое растяжение. В структуре изломов преобладает квазивязкий тип разрушения.

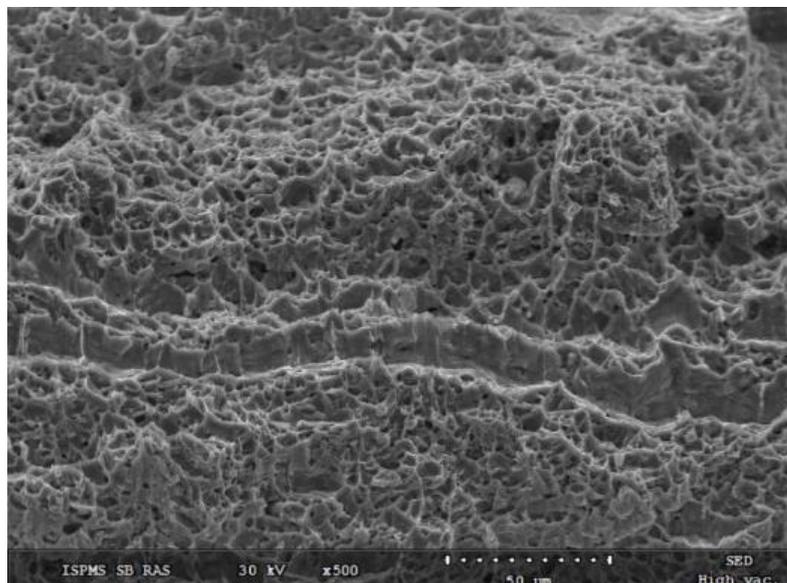


Рисунок 3.6 – Растровое электронное изображение поверхности разрушения образца неразъемного соединения стали 09Г2С толщиной 2,5 мм, после испытания на статическое растяжение

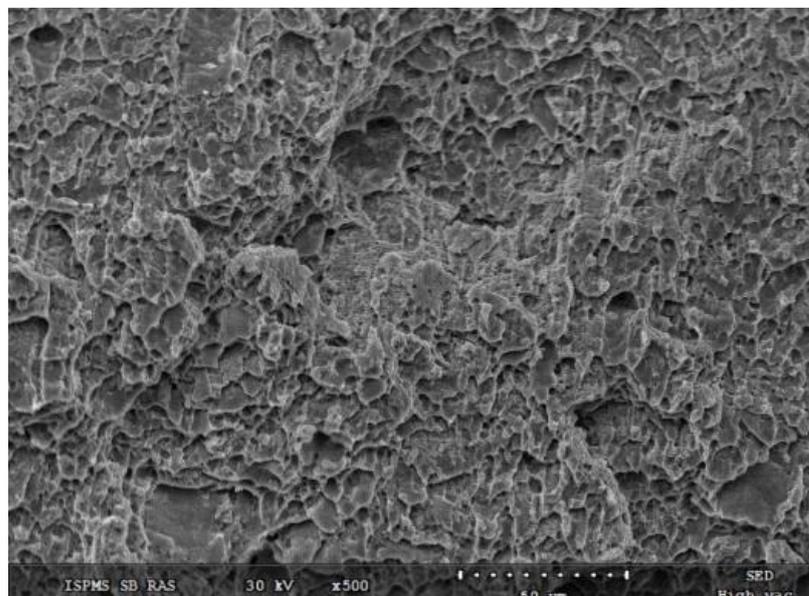


Рисунок 3.7 – Растровое электронное изображение поверхности разрушения образца неразъемного соединения стали 09Г2С толщиной 5,0 мм, после испытания на статическое растяжение

3.3 Испытания на растяжение образцов крупногабаритных конструкций

Механические испытания образцов крупногабаритных плоских сварных заготовок показывают, что средние значения временного сопротивления при растяжении составляют 513 МПа. Типичная диаграмма испытания представлена на рисунке 3.8. Временное сопротивление образца составляет 512 МПа. При переходе от упругой стадии к стадии пластического течения четко выделяется площадка текучести. Разрушение образцов происходит после достаточно продолжительного падения нагружающего усилия.

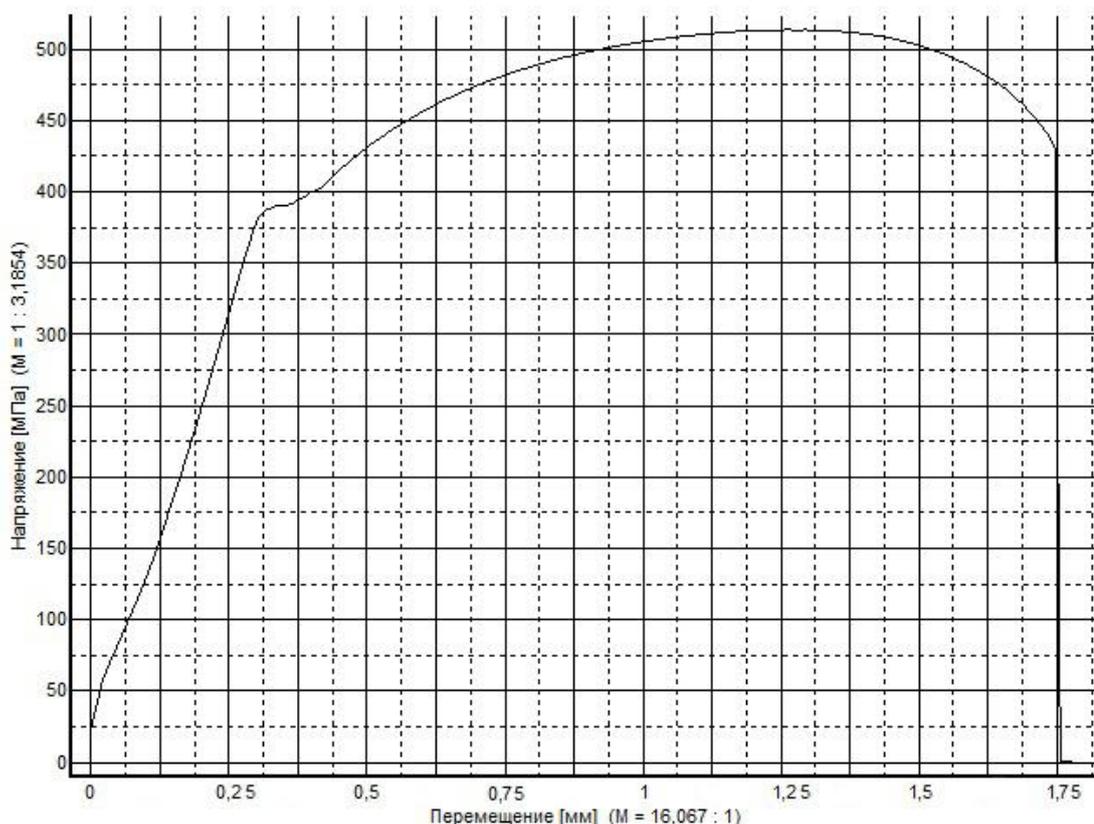


Рисунок 3.8 – Диаграмма испытания на растяжение образца крупногабаритной конструкции из стали 09Г2С толщиной 2,5 мм

Испытания на растяжение показывают, что среднее значение временного сопротивления образцов составляет 625 МПа, временное сопротивление которых составляет 566 МПа. На рисунке 3.9 представлена типичная диаграмма испытания образца стали 09Г2С на растяжение. Временное сопротивление образца составляет 624 МПа. Общий характер деформации аналогичен образцам толщиной 2,5 мм, за исключением отсутствия в данном случае площадки текучести.

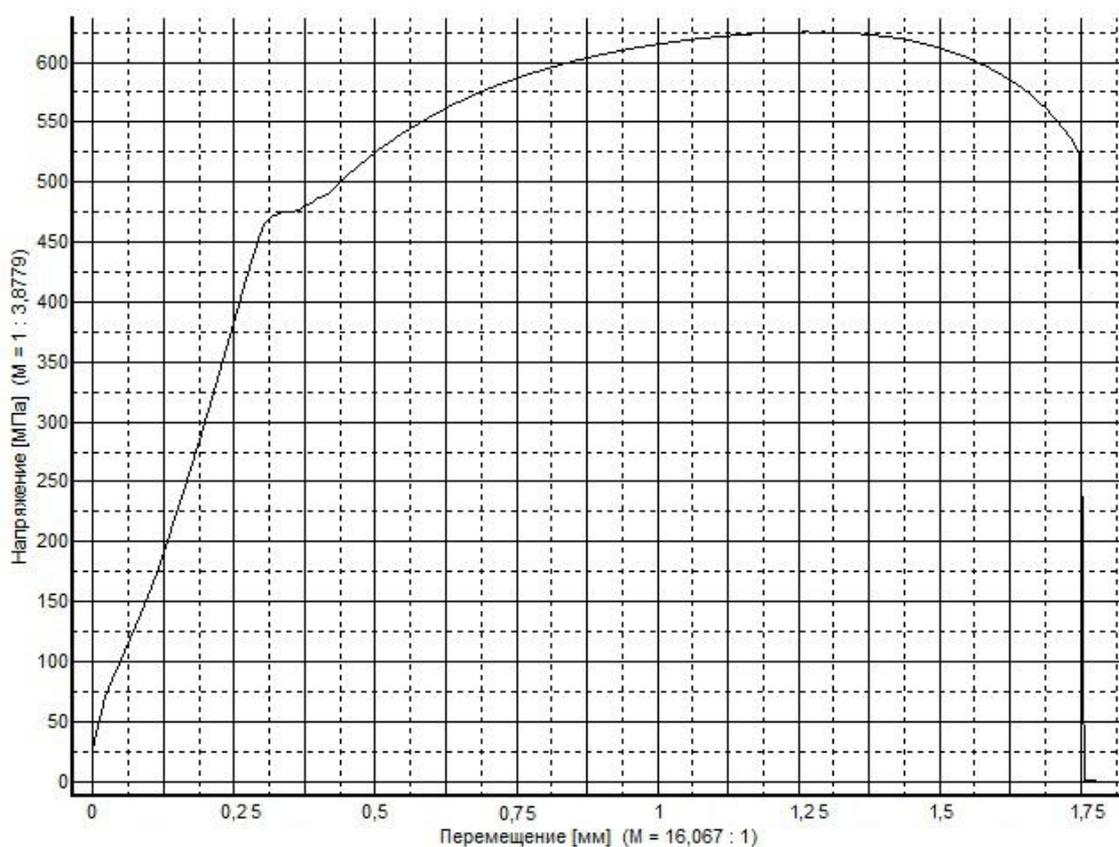


Рисунок 3.9 – Диаграмма испытания на растяжение образца крупногабаритной конструкции из стали 09Г2С толщиной 5 мм

3.4 Определение микротвердости

Проведенные измерения микротвердости зоны сварного шва образцов, полученных методом ГЛС, показывают, что для сварных соединений стали 09Г2С характерно существенное упрочнение в зоне сварного шва, достигающее двукратной величины и более. При этом такое

упрочнение характерно как для образцов толщиной 2,5 мм (рисунок 3.10), так и 5 мм (рисунок 3.11).

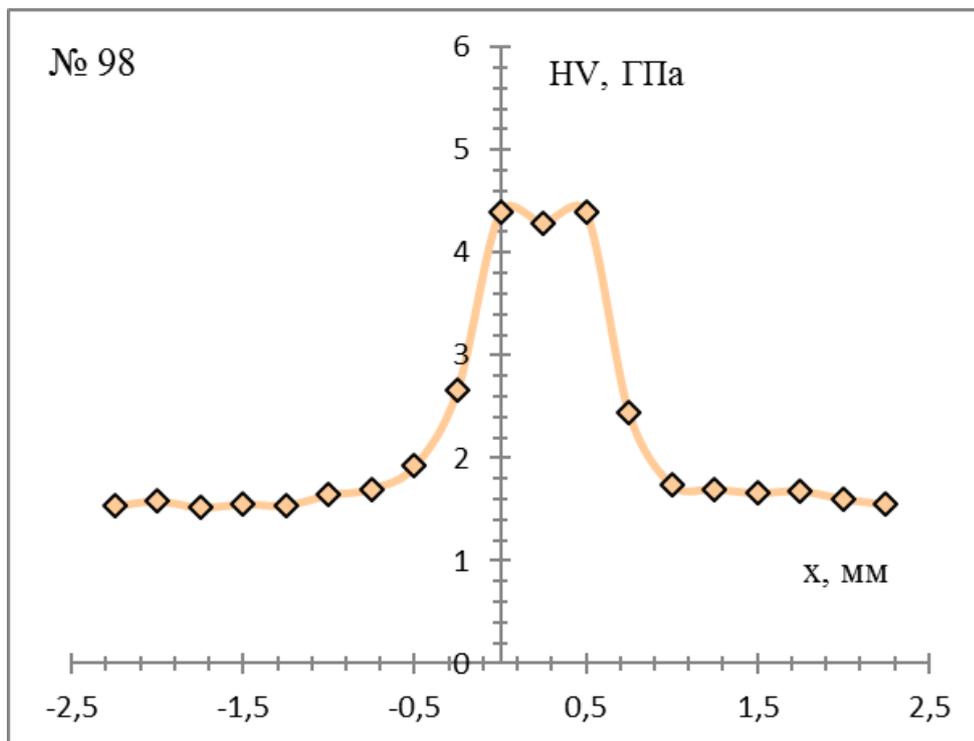


Рисунок 3.10 – Изменение микротвердости вдоль секущей проходящей через сварной шов в центральной части листового проката образца стали 09Г2С толщиной 2,5 мм

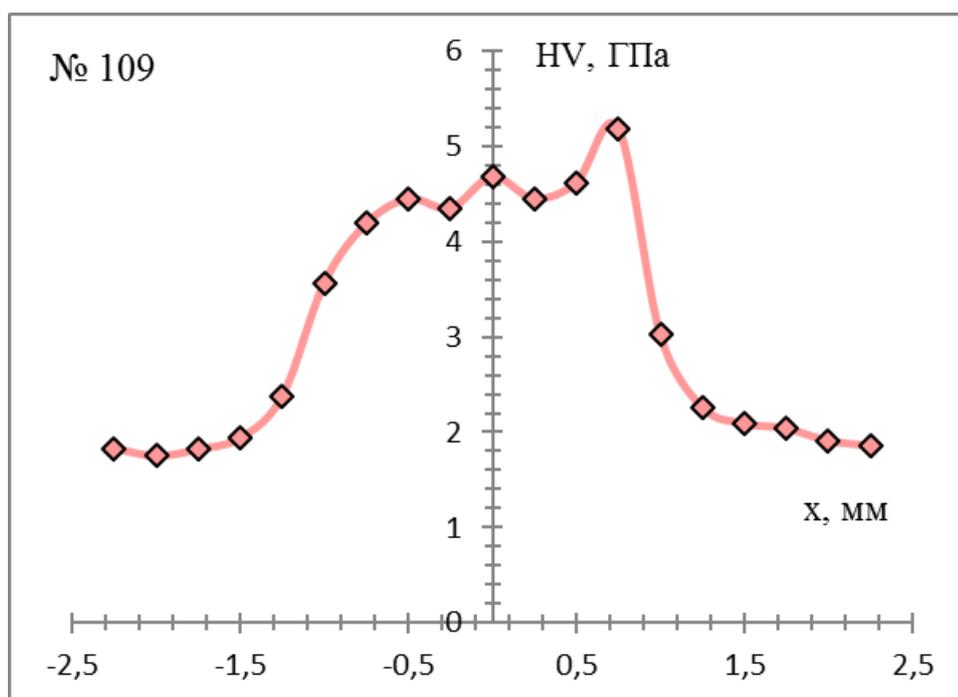


Рисунок 3.11 – Изменение микротвердости вдоль секущей проходящей через сварной шов в центральной части листового проката образца стали 09Г2С толщиной 5 мм

3.5 Испытания нестандартных образцов

Наряду с представленными исследованиями на стандартных образцах, проведен ряд испытаний на статическое растяжение нестандартных образцов. Ввиду того, что данный сплав в литом состоянии имеет повышенную твердость и прочность по сравнению с основным металлом, были вырезаны нестандартные образцы, позволяющие оценить механические свойства металла шва в различных зонах. На рисунке 3.12 показаны нестандартные образцы с необходимым утонением в зоне металла шва, для проведения испытаний на статическое растяжение.

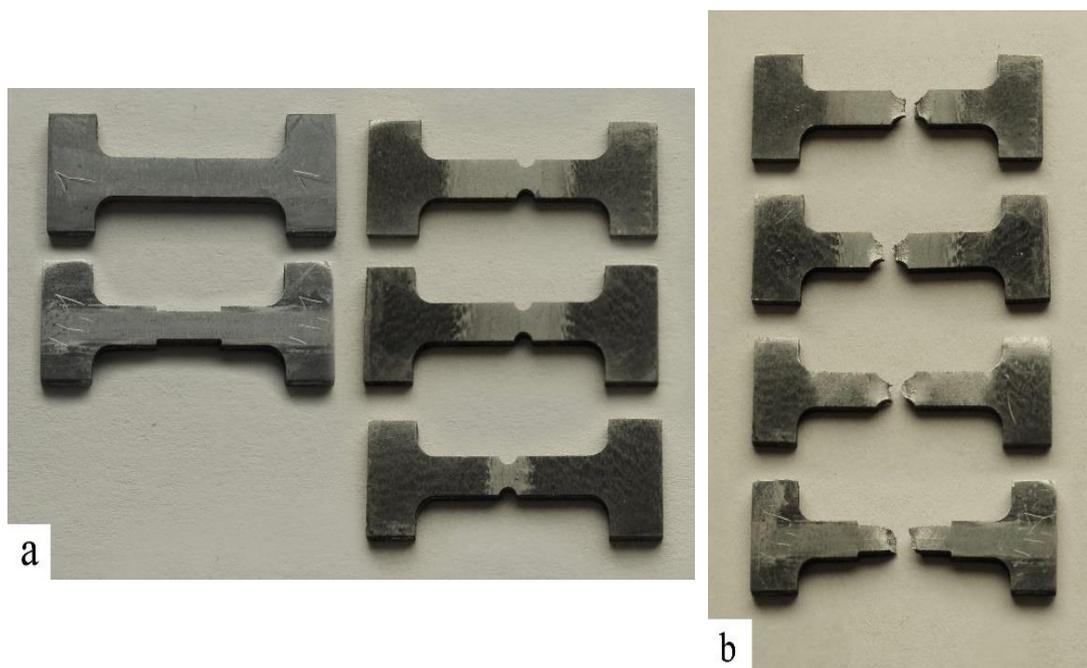


Рис. 3.12 Примеры нестандартных образцов для испытаний на статическое растяжение до испытаний (а) и после испытаний на статическое растяжение (b)

По результатам испытаний сварного шва на статическое растяжение (табл. 3.1) можно сделать вывод о том, что предел прочности металла шва в

зоне плавления дуговым источником оказался в среднем выше, чем в зоне плавления лазерным излучением. Данные испытаний образцов, вырезанных из области границы между дуговой и лазерной ванной расплава оказались не так однозначны. По полученным данным сложно сказать что-то определенное о прочностных характеристиках этой зоны. Образец под маркировкой «ОМ» – образец для определения предела прочности основного металла.

Таблица 3.1

Результаты испытаний металла шва разных зон сварки на статическое растяжение

Образец	Тип образца	Положение разрушения	Предел прочности при растяжении, МПа	Среднее значение предела прочности при растяжении, МПа
3.1 лазер	2, вдоль	металл шва	650	722
4.1 лазер	2, вдоль	металл шва	767	
4 лазер	2, вдоль	металл шва	750	
1.1 дуга	1, вдоль	металл шва	783	755
1 дуга	1, вдоль	металл шва	728	
2.1 дуга + лазер	1, вдоль	металл шва	755	755
2 дуга + лазер	1, вдоль	металл шва	754	
2.0 дуга + лазер	3, поперек	металл шва	847	869
2.1 дуга + лазер	3, поперек	металл шва	892	
1.1 дуга	3, поперек	металл шва	894	900
1.0 дуга	3, поперек	металл шва	906	
4.1 лазер	3, поперек	металл шва	875	877
3.1 лазер	3, поперек	металл шва	887	
4.0 лазер	3, поперек	металл шва	877	
3.0 лазер	3, поперек	металл шва	867	
ОМ	1	основной металл	538	

Необходимо отметить, что по полученным данным испытаний, предел прочности при растяжении образцов в поперечном направлении к сварному

шву выше предела прочности металла шва в продольном направлении более чем на 100 МПа.

Ввиду подготовки образцов типа 3, с овальным утонением в области металла шва, о протекающей во время растяжения деформации образца судить не корректно из-за слишком маленькой рабочей части образца. В данном случае предел прочности при растяжении является главной характеристикой в испытании.

Напротив, образцы, вырезанные вдоль сварного соединения из разных зон металла шва, несут в себе данные не только о пределе прочности, но и информацию о деформации образца при испытаниях. В образцах, вырезанных по типу 1 и 2, дендритная структура направлена под углом $\approx 90^\circ$ к прилагаемому при испытании на статическое растяжение напряжению. На рисунке 3.13 продемонстрированы кривые, полученные во время испытаний на статическое растяжение. Однозначно определяется, что образцы из зоны плавления лазерным излучением менее пластичны, чем образцы из зоны плавления дуговым источником. Подобное поведение металла шва согласуется с данными по микротвердости. В зоне воздействия чисто лазерным излучением, значения микротвердости выше, чем в других зонах, что не может не сказаться на пластичности материала.

Образцы на растяжение, вырезанные из области границы между дуговой и лазерной ваннами расплава (рисунок 3.13, кривые красного цвета), как оговаривалось выше, не удалось интерпретировать однозначно. Одна кривая лежит в области пластичности образцов зоны лазерного плавления, вторая же, напротив, в зоне плавления дугового источника.

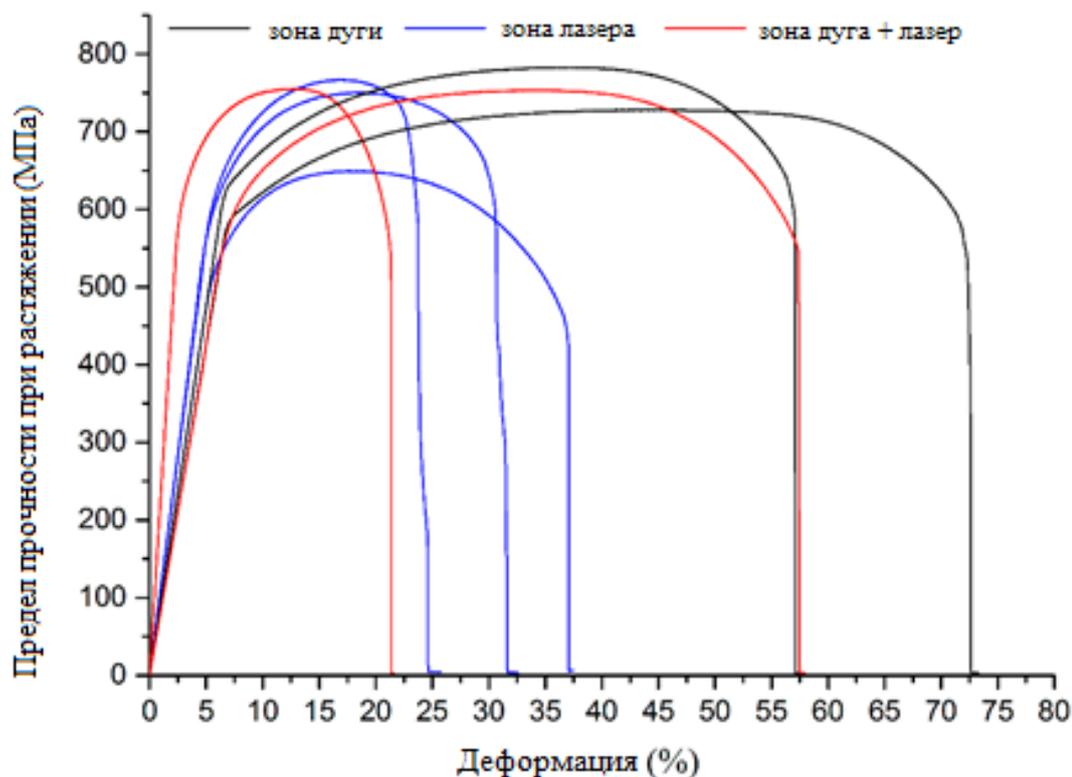


Рисунок 3.13. Кривые испытания на статическое растяжение металла шва в области влияния лазера (синие кривые), в области влияния дугового источника (красные кривые) и в области границы между зонами влияния двух источников тепла (зеленые кривые).

Выводы

Исследована структура и механические свойства металла шва гибридной лазерно-дуговой сварки. На основании проделанной работы сделаны следующие выводы:

Исследованные образцы стали 09Г2С толщиной 2,5 мм, демонстрируют оптимальные структурные параметры и механические характеристики. Образцы, изготовленные из листового проката толщиной 5,0 мм демонстрируют оптимальные свойства как в структурных исследованиях, так и при исследовании механических характеристик;

Структура зон плавления от дугового и лазерного источника исследованных образцов является неоднородной. Дендритная структура шва в области плавления дуговым источником представлена более крупными столбчатыми зернами, чем в области плавления лазерным источником;

Микротвердость металла шва выше значений микротвердости в исходном металле. Профиль микротвердости от лицевой стороны шва к его корню, охватывая две зоны плавления, дуговую и лазерную, изменяется в зависимости от тепловой истории сварочного процесса;

Проведенные испытания на статическое растяжение металла шва дуговой и лазерной зон плавления различны между собой. В зависимости от направления роста дендритов по отношению к напряжению при испытаниях, наблюдается анизотропия металла шва.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела работы является технико-экономическое обоснование научно-исследовательских работ (НИР). Оно проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию НИР, а также уровня научно-технической результативности НИР. Рамки данной работы НИР включают в себя исследование структуры и механических свойств сварного шва двухфазной стали (09Г2С), полученного при совместном воздействии дугового источника и лазерного излучения.

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Развитие промышленности требует разработки и применения новых методов сварки, которые обладали бы низким энергопотреблением, высокой эффективностью и обеспечивали бы высокое качество изделий и конструкций. Перспективным промышленным методом получения неразъемных соединений является гибридная лазерно-дуговая сварка. Благодаря своим преимуществам этот процесс является привлекательной альтернативой для различных отраслей промышленности.

Гибридная лазерно-дуговая сварка вызывает интерес среди отраслей промышленности, использующих сварку в большом объеме. Это приводит к установке систем лазерно-дуговой сварки в судостроительной, автомобильной и трубной промышленности. Так же гибридная лазерная сварка нашла свое применение в аэрокосмической промышленности, производство контейнеров, тяжелое машиностроение и энергетику.

Результаты моей научно - исследовательской работы предназначены для нефтяной промышленности, топливно-энергетического сектора.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В данном исследовании конкурирующими методами являются все методы сварки. Однако, так как тема посвящена исследованию структуры и

механических свойств сварного шва двухфазной стали (09Г2С), полученного при совместном воздействии дугового источника и лазерного излучения. Неразъемные соединения из двухфазной стали можно получить разными методами. Но в большинстве случаев возникают основные трудности сварки двухфазных сталей, обусловлены громоздкостью и разнообразием условий эксплуатации сварных конструкций. В связи с этими проблемами, как конкурентов рассмотрим наиболее подходящие процессы сварки двухфазных сталей такие, как лазерная сварка и сварка в среде инертных газов (MIG).

В таблице 4.1 приведена оценка конкурентов, где Ф – технологический процесс гибридной лазерно-дуговой сварки, к1 – технологический процесс лазерной сварки, к2 – технологический процесс MIG.

Таблица 4.1

Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Энергоэкономичность	0,1	4	3	5	0,4	0,3	0,5
3. Удобство в эксплуатации	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
4. Глубина проплавления	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
5. Подготовка кромок	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
6. Квалификация пользователя	0,08	3	3	4	0,24	0,24	0,32
7. Высокая скорость сварки	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
1.Конкурентоспособность	0,08	5	4	4	0,4	0,32	0,32
2.Использование в промышленности	0,1	3	4	5	0,3	0,4	0,5
3. Цена	0,1	4	3	5	0,4	0,3	0,5
4.Предполагаемый срок эксплуатации	0,06	5	4	4	0,3	0,24	0,24
Итого Σ	1	48	40	43	4,36	3,62	3,9

Исходя из таблицы 4.1 видно, что такие критерии как производительность, глубина проплавления, высокая скорость сварки выше, чем у конкурентов, тем самым технологический процесс гибридной лазерной сварки является более перспективным. Преимуществом конкурентов перед

гибридной лазерной сварки является использование в промышленности и квалификация пользователя.

4.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ – это выявление сильных (S – strength) и слабых (W – weakness) сторон исследуемого объекта, что описывает внутреннюю среду, а также возможностей (O – opportunities) и угроз (T – troubles) внешней среды. SWOT-анализ дает возможность принимать любые управленческие решения.

Таблица 4.2

Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно исследовательского проекта:</p> <p>C1: Высокая производительность</p> <p>C2: Снижение потребления энергии</p> <p>C3: Стабильность получения качественных сварных соединений</p> <p>C4: Получения качественных сварных швов, проблематично свариваемых материалов</p> <p>C5: Экономическая эффективность</p>	<p>Слабые стороны научно исследовательского проекта:</p> <p>Сл1: Высокие затраты на оборудование</p> <p>Сл2: Контроль большого количества параметров процесса</p> <p>Сл3: Требования дополнительных мер безопасности</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1: автоматизация данного процесса</p> <p>В2: Податливость математическому моделированию</p> <p>В3: Больше внедрение в производство данной технологии.</p>	<p>Используя полученные результаты исследования можно получить качественное сварное соединение широко используемого свариваемого материала. И исследование структуры и свойств полученного соединения.</p>	<p>Результаты исследования могут послужить полезной информацией при применении данного метода в производстве.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1: Присутствие зарубежных конкурентов на рынке</p> <p>У2: Появление новых инновационных технологий</p>	<p>Большой процент от общего объёма рынка приходится на долю зарубежных производителей.</p>	<p>Отсутствие квалификации у специалистов может повлиять на спрос потенциальных потребителей.</p>

На основе SWOT-анализа можно сделать выводы, что данная научно исследовательская работа перспективна. Рассматриваемая технология позволит улучшить качество и снизить временные и финансовые затраты.

4.2 Организация и планирование работ

Таблица 4.3

Перечень работ и продолжительность их выполнения

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Исполнители
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания.	Руководитель(100%)
Выбор направления исследования	2	Поиск и изучение материалов	Руководитель(20%) Студент(100%)
	3	Календарное планирование работ	Руководитель(100%)
Теоретическая часть	4	Поиск и изучение литературы	Руководитель(10%) Студент(100%)
	5	Составление литературного обзора	Студент(100%)
	6	Оценка правильности полученных результатов	Руководитель(100%)
	7	Исправление недочетов	Студент(100%)
Экспериментальная часть	8	Подготовка и получение неразъемных соединений	Руководитель(100%), Студент(50%)
	9	Проведение испытаний на растяжение	Руководитель(40%), Студент(100%)
	10	Измерение микротвёрдости образцов	Руководитель(30%), Студент(100%)
	11	Исследование макро и микроструктуры образцов	Руководитель(50%), Студент(100%)
Оформление результатов исследования	12	Анализ результатов	Руководитель(80%), Студент (100%)
	13	Составление пояснительной записки	Студент(100%)
	14	Подготовка презентации и доклада	Руководитель(10%), Студент(100%)

4.2.1 Определение трудоёмкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоёмкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоёмкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоёмкости $t_{ож}$ используется следующая формула (4.1):

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} \quad (4.1)$$

где $t_{ож}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения i -ой работы чел/дн.; t_{\min} – минимально возможная трудоёмкость выполнения заданной работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел/дн.; t_{\max} – максимально возможная трудоёмкость выполнения заданной работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел/дн.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д} \quad (4.2)$$

где $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно $K_{ВН} = 1$;

K_d – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_d = 1-1,2$; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_K \quad (4.3)$$

где $T_{КД}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

T_K – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле

$$T_K = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (4.4)$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 365$);

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 118$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 14$).

$$T_K = \frac{365}{365 - 118 - 14} = 1,56$$

В таблице 4.2 приведена продолжительность этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах (3-5) реализован экспертный способ по формуле (5.1-а). Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоемкости этапа для каждого из двух участников проекта (научный руководитель и инженер) с учетом коэффициента $K_d = 1,2$. Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{ож} * K_d$. Столбцы 8 и 9 содержат те же трудоемкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на T_K (здесь оно равно 1,205). Итог по столбцу 5 дает общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоемкости для

каждого из участников проекта. Две последних величины далее будут использованы для определения затрат на оплату труда участников и прочие затраты. Величины трудоемкости этапов по исполнителям $T_{КД}$ (данные столбцов 8 и 9 кроме итогов) позволяют построить линейный график осуществления проекта – см. пример в табл. 5.3.

Расчёт трудозатрат на поиск и изучение материалов:

Определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож}$:

$$T_{ож} = \frac{3 \cdot 4 + 2 \cdot 5}{5} = 4,4;$$

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$), при $K_{д} = 1,2$:

$$T_{рд} = \frac{4,4 \cdot 1,2}{1} = 5,28;$$

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$) для научного руководителя, при $K_{д} = 1,2$:

$$T_{рд} = \frac{4,4 \cdot 1,2 \cdot 0,2}{1} = 1,05;$$

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$) для студента, при $K_{д} = 1,2$:

$$T_{рд} = \frac{4,4 \cdot 1,2 \cdot 1}{1} = 5,28;$$

Продолжительность выполнения этапа в календарных днях:

$$T_{КД} = 5,28 \cdot 1,56 = 8,23;$$

Продолжительность выполнения этапа в календарных днях, для научного руководителя:

$$T_{КД} = 5,28 \cdot 1,56 \cdot 0,2 = 1,63;$$

Продолжительность выполнения этапа в календарных днях:

$$T_{КД} = 5,28 \cdot 1,56 = 8,23.$$

Таблица 4.4 Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	$T_{рд}$		$T_{кд}$	
					НР	С	НР	С
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания.	НР	1	3	1,8	2,16	–	3,37	–
2. Поиск и изучение материалов	НР,С	4	5	4,4	1,05	5,28	1,63	8,23
3. Календарное планирование работ	НР	1	2	1,4	1,68	–	2,62	–
4. Поиск и изучение литературы	НР,С	7	10	8,2	0,99	9,84	1,55	15,35
5. Составление литературного обзора	С	4	7	5,2	–	6,24	–	9,73
6. Оценка правильности полученных результатов	НР	1	2	1,4	1,68	–	2,62	–
7. Исправление недочетов	С	1	2	1,4	–	1,68	–	2,62
8. Подготовка и получение неразъемных соединений	НР,С	4	6	4,8	5,76	2,88	8,73	4,5
9. Проведение испытаний на растяжение	НР, С	4	6	4,8	2,3	5,76	3,6	8,73
10. Измерение микротвердости образцов	НР, С	4	6	4,8	1,72	5,76	2,68	8,73
11. Исследование макро и микроструктуры образцов	НР, С	4	6	4,8	2,88	5,76	4,5	8,73
12. Анализ результатов	НР, С	10	11	10,4	9,98	12,48	15,56	19,46
13. Составление пояснительной записки	С	10	11	10,4	–	12,48	–	19,46
14. Подготовка презентации и доклада	НР, С	6	7	7,8	0,93	9,36	1,45	14,6
Итого:		61	84 62	71.6	31,13	77,52	48,34	120,14

Таблица 4.5 Линейный график работ

Этап	НР	С	Февраль 2019			Март 2019			Апрель 2019			Май 2019		
			10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	3,37	–	■											
2	1,63	8,23	■	■										
3	2,62	–			■									
4	1,55	15,35			■	■								
5	–	9,73				■	■							
6	2,62	–					■							
7	–	2,62					■							
8	8,73	4,5					■	■						
9	3,6	8,73						■	■					
10	2,68	8,73							■	■				
11	4,5	8,73								■	■			
12	15,56	19,46									■	■		
13	–	19,46										■	■	
14	1,45	14,6											■	■

НР – ■ С – ■

4.2.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

4.2.3 Расчет затрат на материалы

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода. Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов).

Таблица 4.6

Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Листовой прокат 09Г2С	371	10 кг.	3710
Алмазная паста зернистости АСМ 1/0 ВОМ	860	1 уп.	860
Азотная кислота	212	1 л.	212
Фторид натрия	248	1 кг.	248
Соляная кислота	170	1 л.	170
Дистиллированная вода	17	5 л.	85
Наждачная бумага	450	3 уп.	1350
Итого:			6635

4.2.4 Расчет затрат на оборудование

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 4.7

Список оборудования для исследования

№	Наименование оборудования	Количество
1	Универсальная испытательная машина УТС 110М	1
2	Микротвердомер Duramin 5	1
3	Металлографический микроскоп Альтами МЕТ 1С.	1
4	Электроискровой станок	1

Вышеуказанное спецоборудование для научных работ были в лаборатории. Для оборудования не было финансовых расходов.

4.2.5 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера (в его роли выступает исполнитель проекта), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{дн-т}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{дн-т} = MO/20,58 \quad (4.5)$$

учитывающей, что в году 247 рабочий день и, следовательно, в месяце в среднем 20,58 рабочих дня (при пятидневной рабочей неделе).

Расчет затрат на полную заработную плату приведены в таблице 4.5. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 4.2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{ПР} = 1,1$; $K_{доп.ЗП} = 1,113$; (при пятидневной рабочей неделе) $K_p = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{и} = 1,1 * 1,113 * 1,3 = 1,62$.

Таблица 4.8

Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб. день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	47 104	2288,82	31	1,62	114 944,54
И	10 633	516,6	77	1,62	64 440,68
Итого:					179 385,22

4.2.6 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е. $C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} * 0,3$.
Итак, в нашем случае $C_{\text{соц.}} = 174\,840,44 * 0,3 = 53\,815,56$ руб.

4.2.7 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{Э}} \quad (4.6)$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{\text{Э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

Для ТПУ $Ц_{\text{Э}} = 5,748$ руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 4.2 для инженера ($T_{\text{РД}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{РД}} * K_t, \quad (4.7)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{РД}}$, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение $t_{\text{об}}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном.}} * K_c \quad (4.8)$$

где $P_{\text{ном.}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_C \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_C = 1$.

Пример расчета затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 4.6.

Таблица 4.9

Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$, час	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $\mathcal{E}_{об}$, руб.
Универсальная испытательная машине УТС 110М	8	1,7	78,17
Микротвердомер Duramin 5	15	0,4	34,48
Металлографический микроскоп Альтами МЕТ 1С.	20	0,07	8,05
Электроискровой станок	7	2	80,47
Итого:			201,17

4.2.8 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{проч.} = (C_{мат} + C_{зп} + C_{соц} + C_{эл.об.}) \cdot 0,1$$

Для нашего примера это

$$C_{проч.} = (6635 + 179\,385,22 + 53\,815,56 + 201,17) \cdot 0,1 = 24\,003,7 \text{ руб.}$$

4.2.9 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Структура и свойства сварного

соединения аустенитной стали, полученного при совместном воздействии электрической дуги и лазерного излучения».

Таблица 4.10

Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	6635
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	179 385,22
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	53 815,56
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	201,17
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	24 003,7
Итого:		264 040,65

Затраты на разработку составили $C = 256\,398,21$

4.2.10 Расчет прибыли

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации может определяться различными способами. Если исполнитель работы не располагает данными для применения «сложных» методов, то прибыль следует принять в размере $5 \div 20$ % от полной себестоимости проекта. В нашем примере она составляет 52 808,13 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

4.2.11 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это $(264\,040,65 + 52\,808,13) * 0,2 = 316\,848,78 * 0,2 = 63\,369,76$ руб.

4.2.12 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае $\text{ЦНИР(КР)} = 264\,040,65 + 52\,808,13 + 63\,369,76 = 380\,218,54$ руб.

Заключение

В ходе проделанной работы определены затраты на научно исследовательскую работу. Результаты расчетов доказывают целесообразность и эффективность проведения данного научного исследования. Анализ конкурентных методов получения неразъемных соединения показал, что технологический процесс гибридной лазерной сварки является перспективным.

4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Развитие промышленности требует разработки и применения новых методов сварки, которые обладали бы низким энергопотреблением, высокой эффективностью и обеспечивали бы высокое качество изделий и конструкций. Перспективным промышленным методом получения неразъемных соединений является гибридная лазерная дуговая сварка. Двухфазные низколегированные стали широко применяются в нефтяной и химической промышленности, в топливно-энергетической сфере и машиностроении, где необходимо выполнение огромного объема сварочных работ. В связи с этим повышение производительности сварки также является необходимым условием дальнейшего развития отраслей. Гибридная лазерно-дуговая сварка обеспечивает увеличение производительности и снижение трудозатрат за счет сочетания действия лазера и дуги. Немаловажное значение имеет и изменение условий труда в связи с внедрением процесса ГЛС, что делает актуальным данное исследование.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В соответствии с законодательством Российской Федерации режим рабочего времени должен предусматривать продолжительность рабочей недели (пятидневная с двумя выходными днями, шестидневная с одним выходным днем, рабочая неделя с предоставлением выходных дней по скользящему графику, неполная рабочая неделя), работу с ненормированным рабочим днем для отдельных категорий работников, продолжительность ежедневной работы (смены), в том числе неполного рабочего дня (смены), время начала и окончания работы, время перерывов в работе, число смен в сутки, чередование рабочих и нерабочих дней, которые устанавливаются правилами внутреннего трудового распорядка в соответствии с трудовым законодательством и иными нормативными правовыми актами, содержащими нормы трудового права, коллективным договором, соглашениями, а для работников, режим рабочего времени которых отличается от общих правил, установленных у данного работодателя, - трудовым договором [143].

Нормальная продолжительность рабочего дня не может превышать 40 часов в неделю. При наличии вредных условий труда рабочий день лимитирован 26 часами в неделю. Рабочим временем является совокупный период выполнения индивидуальных трудовых обязанностей, определяемый договором и ПВР (правилами внутреннего распорядка), и иные, не связанные с фактической работой периоды. К иным периодам законодательно относятся:

- вынужденный простой, связанный с техническими, экономическими и другими причинами;
- время приёма пищи без оставления рабочего места, если отдельные перерывы для этих целей не предусмотрены;

Защита персональных данных – определяет порядок обработки персональных данных субъекта, обеспечивает защиту прав и свобод при обработке их персональных данных, а также устанавливает ответственность должностных лиц, имеющих доступ к персональным данным, за невыполнение

требований законодательства, регулирующих отношения, связанные с обработкой и защитой персональных данных.

К субъектам персональных данных относятся:

Носители персональных данных, передавшие их (как на добровольной основе, так и в рамках выполнения требований нормативно-правовых актов) для приема, получения, поиска, сбора, систематизации, накопления, хранения, уточнения, обновления, изменения, использования, распространения.

В целях информационного обеспечения могут создаваться общедоступные источники персональных данных, в которых с письменного согласия субъекта персональных данных могут содержаться фамилия, имя, отчество и иные персональные данные.

Персональные данные защищаются от несанкционированного доступа в соответствии с нормативно-правовыми актами, нормативно распорядительными актами и рекомендациями регулирующих органов в области защиты информации, а также утвержденными положениями.

Сбор, хранение, использование и распространение персональных данных лица без письменного его согласия не допускаются. Персональные данные относятся к категории конфиденциальной информации. Режим конфиденциальности персональных данных прекращается в случаях обезличивания или по истечении 75 – летнего срока хранения, если иное не предусмотрено законодательством.

Персональные данные не могут быть использованы в целях:

- причинения имущественного и морального вреда гражданам;
- затруднения реализации прав и свобод граждан Российской Федерации.

Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78: рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество; рабочий стул должен иметь дизайн, исключаящий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем

месте; рабочее место должно соответствовать техническим требованиям и санитарным нормам.

В соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 в помещении должен быть организован воздухообмен. Для улучшения воздухообмена необходимо выполнить следующие технические и санитарно-гигиенические требования: общий объем притока воздуха в помещении должен соответствовать объему вытяжки; правильное размещение приточной и вытяжной вентиляции.

В соответствии с СН-181-70 рекомендуются следующие цвета окраски помещений: потолок - белый или светлый цветной; стены - сплошные, светло-голубые; пол - темно-серый, темно-красный или коричневый. Применение указанной палитры цветов обусловлено ее успокаивающим воздействием на психику человека, способствующим уменьшению зрительного утомления. При выполнении интерьера, обычно выбирают не более трех основных цветов небольшой насыщенности. Окраска оборудования и приборов, в основном, имеет светлые цвета с высококонтрастными органами управления и надписями к ним.

5.2 Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований в лаборатории, при разработке проекта.

Таблица 5.1

Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Эксплуа тация	
1.Отклонение показателей микроклимата.	+	+	+	Требования к микроклимату помещений устанавливаются в соответствии СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений[145].

2. Воздействие химических веществ на кожу и верхние дыхательные пути		+	+	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности[146].
3. Превышение уровня шума		+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности[147].
4. Отсутствие или недостаток естественного света.	+	+	+	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95[148].
5. Поражение электрическим током.		+	+	1)ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля[149]; 2)ГОСТ 12.2.091-2012 (IEC 61010-1:2001) Безопасность электрического оборудования для измерения, управления и лабораторного применения[150].

5.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.

5.2.2 Отклонение показателей микроклимата.

Микроклимат производственных помещений – это комплекс физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда. Поддержание микроклимата рабочего места в пределах гигиенических норм – важнейшая задача охраны труда.

Показатели микроклимата:

1. Температура воздуха;
2. Относительная влажность воздуха;
3. Скорость движения воздуха;
4. Мощность теплового излучения.

При высокой температуре воздуха в помещении кровеносные сосуды поверхности тела расширяются. При понижении температуры окружающего воздуха реакция человеческого организма иная: кровеносные сосуды кожи

сужаются. Приток крови к поверхности тела замедляется, и отдача тепла уменьшается. Влажность воздуха оказывает большое влияние на терморегуляцию (способность человеческого организма поддерживать постоянную температуру при изменении параметров микроклимата) человека.

Повышенная влажность ($\phi > 85\%$) затрудняет терморегуляцию вследствие снижения испарения пота, а слишком низкая влажность ($\phi < 20\%$) вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей. Движение воздуха в помещении является важным фактором, влияющим на самочувствие человека. Таким образом, для теплового самочувствия человека важно определенное сочетание температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха.

5.2.3 Воздействие химических веществ на кожу и верхние дыхательные пути.

При попадании на поверхность тела агрессивные жидкости могут вызывать химические ожоги, нередко тяжелые, способные привести к потере трудоспособности и даже инвалидности. При обширных химических ожогах возможен смертельный исход. Особенно опасно попадание агрессивных жидкостей в глаза, что может явиться причиной безвозвратной потери зрения.

Причинами местных поражений могут быть не только сами агрессивные жидкости, но и высокие концентрации в воздухе различных паров азотной кислоты и других веществ. При этом чаще всего поражаются органы дыхания и глаза, а также влажная кожа. Действие газообразных веществ на слизистые оболочки дыхательных путей и глаз и в значительной мере зависит от растворимости этих веществ в воде и способности вступать в химическое взаимодействие с тканями организма. Газы, хорошо растворимые в воде и имеющие высокую химическую активность, обычно оказывают сильное раздражающее действие на верхние дыхательные пути и глаза. При этом наблюдаются чувство першения в носу и в горле, резкая боль за грудиной и в глазах, кашель, затруднение дыхания, слезотечение. Воздействие особо

агрессивных газов способно вызвать спазм гортани, что может привести к удушью.

Для проявления структуры металла шва неразъемного соединения применяются вредные вещества такие как азотная кислота, соляная кислота, фторид натрия. Они являются едким веществом и относятся к веществам 3-го класса опасности. Азотная кислота вызывает сильные ожоги при контакте с кожей, а её пары поражают слизистые оболочки, дыхательные пути.

5.2.4 Превышение уровня шума.

Шумом называют любой нежелательный звук или совокупность таких звуков. Звук представляет собой волнообразно распространяющийся в упругой среде колебательный процесс в виде чередующихся волн сгущения и разряжения частиц этой среды - звуковые волны. Источником звука может являться любое колеблющееся тело. При соприкосновении этого тела с окружающей средой образуются звуковые волны. Волны сгущения вызывают повышение давления в упругой среде, а волны разряжения - понижение. Отсюда возникает понятие звукового давления - это переменное давление, возникающее при прохождении звуковых волн дополнительно к атмосферному давлению.

Шум является одним из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды, воздействие которого на работающих сопровождается развитием у них преждевременного утомления, снижением производительности труда, ростом общей и профессиональной заболеваемости, а также травматизма.

Основными источниками в лаборатории, где проводятся исследования является универсальная испытательная машина УТС 110М и персональные компьютеры, а так же шум при шлифовании образцов.

Санитарные нормы шума на рабочих местах устанавливаются в соответствии с СанПиН 2.2.4.3359-16 под названием «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».

Он утверждён постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 21 июня 2016 года № 81 и действует с 01 января 2017 года. Раздел III посвящен нормам производственного шума.

5.2.5 Отсутствие или недостаток естественного света.

Освещение рабочего места – важнейший фактор создания нормальных условий труда. Освещению следует уделять особое внимание, так как при работе наибольшее напряжение получают глаза. Освещение делится на естественное, искусственное и совмещенное.

Правильно спроектированное и выполненное производственное освещение улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие на работающего, повышает безопасность труда и снижает травматизм.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, дезориентировать работающего. Превышение нормативных параметров освещения ведет к снижению работоспособности, так как чрезмерная яркость и блескость слепит глаза и искажает видимость. Все эти причины могут привести к несчастному случаю или профзаболеваниям.

5.2.6 Опасность поражения электрическим током.

Источником опасности при эксплуатации электрического оборудования является повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.

Электрический ток является важнейшим опасным фактором, воздействию которого может подвергаться персонал во время работы.

Поражающее действие электрического тока зависит от следующих факторов: - значение и длительность проникания тока через тело человека; - род и частота тока; - индивидуальные особенности человека. Наиболее опасным является переменный ток с частотой 20...100 Гц.

Устанавливаются пять классов защиты: 0; 0I; I; II; III.

К классу 0 должны относиться изделия, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию и не имеющие элементов для заземления, если эти изделия не отнесены к классу II или III.

К классу 0I должны относиться изделия, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания.

К классу I должны относиться изделия, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию и элемент для заземления. В случае, если изделие класса I имеет провод для присоединения к источнику питания, этот провод должен иметь заземляющую жилу и вилку с заземляющим контактом.

К классу II должны относиться изделия, имеющие двойную или усиленную изоляцию и не имеющие элементов для заземления.

К классу III следует относить изделия, предназначенные для работы при безопасном сверхнизком напряжении, не имеющие ни внешних, ни внутренних электрических цепей, работающих при другом напряжении.

Действующим правилам устройства электроустановок помещения подразделены на три класса

I. Помещения без повышенной опасности: сухие, с нормальной температурой воздуха, с токонепроводящими полами.

II. Помещения с повышенной опасностью: сырые с относительной влажностью воздуха (длительной) более 75%; жаркие с температурой воздуха, длительно превышающей +30°C; с полами из токопроводящих материалов; с большим количеством выделяющейся токопроводящей технологической пыли, оседающей на проводах и проникающей внутрь электроустановок.

III. Помещения особо опасные: особо сырые с относительной влажностью воздуха, близкой к 100%, химически активной средой, одновременным наличием двух и более условий, свойственных помещениям с повышенной опасностью.

Общие травмы, вызванные действием электрического тока – электрический удар, могут привести к судорогам, остановке дыхания и сердечной деятельности. Местные травмы: металлизация кожи, механические повреждения, ожоги, также очень опасны.

5.3 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя

5.3.1 Отклонение показателей микроклимата

Оптимальные нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха производственных помещений для работ, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением (категория Ib), приведены в таблице 5.2, в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и СанПиН 2.2.4.548-96.

Таблица 5.2

Нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха

Период года	Категория работы	Температура, °С	Относительная влаж. воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	21-23	40-60	0,1
Теплый	Ia	22-24	40-60	0,1

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Они устанавливаются в случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономически обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные величины.

Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3

Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория работы	Температура, °С	Относительная влаж. воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	19-23	40-60	0,1
Теплый	Ia	20-24	40-60	0,1

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. В холодное время года предусматривается система отопления. Для отопления помещений используются водяные системы центрального отопления. При недостаточной эффективности центрального отопления должны быть использованы масляные электрические нагреватели.

5.3.2 Воздействие химических веществ на кожу и верхние дыхательные пути

При работе с опасными веществами применяют средства индивидуальной защиты (перчатки латексные, защитные маски, защитные очки). Хранение и работа опасных веществ производится в вытяжном шкафу.

При термических ожогах первой степени (краснота и припухлость) обожженное место надо обработать спиртовым раствором танина, 96%-ным этиловым спиртом или раствором перманганата калия. При ожогах второй и третьей степени (пузыри и язвы) допустимы только обеззараживающие примочки из раствора перманганата калия,

При ожогах кислотами необходимо промыть пораженное место большим количеством проточной воды, а затем 3%-ным раствором

гидрокарбоната натрия, после чего – снова водой. При ожогах щелочами нужно промыть очаг поражения проточной водой, а затем разбавленным раствором борной или уксусной кислоты.

При попадании щелочи или кислоты в глаза необходимо промыть их проточной водой (3 – 5 мин), а затем раствором борной кислоты (в случае попадания щелочи) или гидрокарбоната натрия (в случае попадания кислоты)

При попадании на кожу едких органических веществ, не растворимых в воде, их необходимо смыть большим количеством подходящего растворителя. После оказания первой помощи пострадавший должен быть направлен в медпункт.

5.3.3 Превышение уровня шума

Для уменьшения шума в лаборатории были применены следующие меры: оборудование, которое производит сильный шум располагается в отдельных комнатах, благодаря чему сотрудники лаборатории не подвержены воздействию вредного шума. При работе с шумным оборудованием выдаются средства индивидуальной защиты в виде противозумных наушников.

5.3.4 Отсутствие или недостаток естественного света

Помещения подразделяются по задачам зрительной работы. Лаборатории относятся к I группе – помещения, в которых производится различение объектов зрительной работы при фиксированном направлении линии зрения работающих на рабочую поверхность. В лаборатории используется совмещенное освещение. Научно – технические лаборатории средняя освещенность должно быть равным 400 люкс. В лаборатории находятся ЭВМ, крайне важно, чтобы все поле зрения было освещено равномерно. Степень освещения помещения и яркость экрана ЭВМ должны быть примерно одинаковыми, так как яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряженность глаз, что приводит к быстрой

утомляемости глаз. Для работы с ЭВМ рекомендуются помещения с односторонним боковым естественным освещением с северной, северо-восточной или северо-западной ориентацией светопроемов.

5.3.5 Опасность поражения электрическим током.

Перед допуском к проведению операций, выполняемых на оборудовании проводится инструктаж по безопасности с регистрацией в журнале. Инструктаж должен производиться периодически.

К работам по проведению технологических операций при проведении технологического процесса допускаются лица, имеющие квалификационную группу не ниже III по электробезопасности для работы с электроустановками напряжением до 1000 В.

Для предотвращения поражения электрическим током в лаборатории применяются следующие основные методы защиты:

- изоляция, защитное заземление;
- недоступность токоведущих путей;
- использование двойной (рабочей и дополнительной изоляции);
- защитное отключение;
- применение специальных электротехнических средств;
- организация безопасной эксплуатации.

При обнаружении неисправности обслуживающий персонал обязан отключить оборудование и принять меры к немедленному устранению обнаруженных неисправностей.

5.3 Экологическая безопасность

Загрязнение окружающей среды предприятиями связано в большей степени с загрязнением атмосферы.

Поэтому мероприятия по повышению экологической чистоты производства можно отнести к охране и рациональному использованию воздушного бассейна.

Эти мероприятия связаны с сооружением установок, для очистки воздуха, удаляемого вытяжной вентиляцией из предприятий. Одним из наиболее совершенных видов очистки газов от взвешенных в них частиц пыли являются электрофильтры. Их принцип основан на ударной ионизации газа в зоне коронирующего заряда, передачи заряда ионов частицам примесей и осаждении последних на осадительных и коронирующих электродах, с которых они затем удаляются механически. Также широкое применение для очистки газов от частиц пыли получили сухие пылеуловители – циклоны.

Для очистки технологических и вентиляционных выбросов от газов и паров применяют адсорберы. Адсорбция представляет собой процесс поглощения газов или паров поверхностью твердых веществ – адсорбентов. В качестве адсорбентов (поглотителей) применяют такие вещества, как глинозем, силикагель, активированный уголь и др.

Работа по утилизации и захоронению отходов ведется в соответствии с требованиями «Правил охраны окружающей среды от отходов производства и потребления в Российской Федерации». В процессе производства образуется большое количество отходов, которые при соответствующей обработке могут быть вновь использованы как сырье для промышленной продукции. Основными направлениями ликвидации твердых промышленных отходов является вывоз и захоронение на полигонах, сжигание, складирование и хранение на территории предприятия до появления новой технической переработки их в полезный продукт – сырье. Порядок сбора, накопления, транспортировки, утилизации и захоронения отходов регламентируется приказами руководителя предприятия, главного инженера, инструкциями по эксплуатации оборудования.

Использованные растворы кислот собирают в тару, затем нейтрализуют твердыми карбонатами или гидроксидами натрия или калия. Затем жидкость выливают в канализацию с одновременной подачей воды.

Отходы производства в виде стружки и обрезков листовых материалов подлежат утилизации согласно СНиП 2.01.08-85. На сегодняшний день корпус сотрудничает с компанией «Экорекс», которая организует централизованный сбор и переработку вторичного сырья в Томске и Томской области.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В процессе исследования в лаборатории возможны ЧС, так как используется электрическое оборудование и инструменты. Не исключена возможность возникновения пожара. Основной причиной взрывов и пожаров во время научной работы является нарушение правил эксплуатации и техники безопасности при работе с электрическим оборудованием, подключенным к сети. Следовательно, при работе с оборудованием необходимо придерживаться техники безопасности основанной на Тои Р-45-068-97: электроинструменты и электрические машины должны быть безопасными в работе, не иметь доступных для случайного прикосновения токоведущих частей, не иметь повреждений корпусов и изоляции питающих проводов.

К основным видам техники, предназначенной для защиты различных объектов от пожаров, относятся средства сигнализации и пожаротушения. В 7 корпусе предусмотрена электрическая пожарная сигнализация. Она должна быстро и точно сообщать о пожаре с указанием места его возникновения. Сигнализация обеспечивает также автоматический ввод в действие предусмотренных на объекте средств пожаротушения и дымоудаления.

Наиболее широко применяемым средством тушения является вода. Для такого способа тушения предусмотрены пожарные краны. В качестве первичных средств пожаротушения используют огнетушители. В качестве огнетушителей в корпусе распространены огнетушители углекислотные ОУ-5. Преимущества углекислотных огнетушителей: эффективность тушения жидких

и газообразных веществ и электроустановок под напряжением до 1000 В; отсутствие следов тушения; диапазон рабочих температур от -40 °С до +50 °С

При возгорании и пожаре в производственном помещении должна быть произведена аварийная остановка технологического процесса и отключены питающие рубильники.

При необходимости персонал должен быть эвакуирован из производственных помещений.

Заключение

При рассмотрении безопасности и гигиены труда при изучении процесса получения неразъемных соединений полученного при совместном воздействии дугового источника и лазерного излучения, а так же исследовании свойств и структуры полученных швов были выявлены вредные факторы такие как: шум, микроклимат, освещенность, вредные вещества и опасные: поражение электрическим током. Был проведен их анализ по воздействию фактора на организм человека, по допустимым нормам и средствам защиты. Рассмотрена типичная чрезвычайная ситуация, представлены предупредительные меры по ее предупреждению. Проведено знакомство законодательных и нормативных документов по данной теме.

ВЫВОДЫ

Исследована структура и механические свойства металла шва гибридной лазерно-дуговой сварки. На основании проделанной работы сделаны следующие выводы:

Исследованные образцы стали 09Г2С толщиной 2,5 мм, демонстрируют оптимальные структурные параметры и механические характеристики. Образцы, изготовленные из листового проката толщиной 5,0 мм демонстрируют оптимальные свойства как в структурных исследованиях, так и при исследовании механических характеристик;

Структура зон плавления от дугового и лазерного источника исследованных образцов является неоднородной. Дендритная структура шва в области плавления дуговым источником представлена более крупными столбчатыми зернами, чем в области плавления лазерным источником;

Микротвердость металла шва выше значений микротвердости в исходном металле. Профиль микротвердости от лицевой стороны шва к его корню, охватывая две зоны плавления, дуговую и лазерную, изменяется в зависимости от тепловой истории сварочного процесса;

Проведенные испытания на статическое растяжение металла шва дуговой и лазерной зон плавления различны между собой. В зависимости от направления роста дендритов по отношению к напряжению при испытаниях, наблюдается анизотропия металла шва.

Список публикаций:

1. Структура и механические свойства металла шва стали 09Г2С, полученного методом гибридной лазерно-дуговой сварки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. –

2. Структура и механические свойства неразъемных соединений стали 09Г2с, полученных методом гибридной лазерной сварки // XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» Россия, Томск, 23–26 апреля 2019 г.

Список литературы:

1. Z. Shenghai, S. Yifu, Q. Huijuan. The technology and welding joint properties of hybrid laser-TIG welding on thick plate // *Opt. Laser Technol.*, 48 (2013), pp. 381-388
2. M.M. Atabaki, M. Nikodinovski, P. Chenier, J. Maa, W. Liu, R. Kovacevic. Experimental and numerical investigations of hybrid laser arc welding of aluminum alloys in the thick T-joint configuration // *Opt. Laser Technol.*, 59 (2014), pp. 68-92
3. W.M. Steen. *Laser Material Processing* (third ed.), Springer, Heidelberg (2003)
4. E.L. Guen, R. Fabbro, M. Carin, F. Coste, P.L. Masson. Analysis of hybrid Nd: Yag laser-MAG arc welding processes // *Opt. Laser Technol.*, 43 (2011), pp. 1155-1166
5. T. Ishide, S. Tsubota, M. Watanabe, Latest MIG, TIG, arc-YAG laser hybrid welding systems for various welding products, in: *Proc. of 1st International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing*, (SPIE 2003), vol. 4831, Osaka, Japan, 2002, pp. 347–352.
6. A. Ascari, A. Fortunato, L. Orazi, G. Campana. The influence of process parameters on porosity formation in hybrid LASER-GMA welding of AA6082 aluminum alloy // *Opt. Laser Technol.*, 44 (2012), pp. 1485-1490
7. A. Mahrle, M. Schnick, S. Rose, T. Pinder, E. Beyer, U. Füssel. Laser-assisted plasma arc welding of stainless steel // *J. Laser Appl.*, 25 (3) (2003) 032006-1-8
8. L. Liu, M. Chen. Interactions between laser and arc plasma during laser-arc hybrid welding of magnesium alloy // *Opt. Lasers Eng.*, 49 (2011), pp. 1224-1231
9. G. Casalino, M. Mortello, P. Leo, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi. Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy // *Mater. Des.*, 61 (2014), pp. 191-198

10. L.J. Zhang, J. Ning, X.J. Zhang, G.F. Zhang, J.X. Zhang. Single pass hybrid laser–MIG welding of 4-mm thick copper without preheating // *Mater. Des.*, 74 (2015), pp. 1-18
11. W.M. Steen, M. Eboo, J. Clarke, Arc augmented laser welding, in: *Proc. of the 4th International Conference on Advances in Welding Processes*, vol. 1, Harrogate, U.K., 1978, pp. 257–265.
12. E.L. Guen, M. Carin, R. Fabbro, F. Coste, P.L. Masson. 3D heat transfer model of hybrid laser Nd:Yag-MAG welding of S355 steel and experimental validation // *Int. J. Heat Mass Transf.*, 54 (2011), pp. 1313-1322
13. Y. Chen, J. Feng, L. Li, S. Chang, G. Ma
Microstructure and mechanical properties of a thick-section high-strength steel welded joint by novel double-sided hybrid fibre laser-arc welding // *Mater. Sci. Eng., A*, 582 (2013), pp. 284-293
14. K. Hao, C. Zhang, X. Zeng, M. Gao. Effect of heat input on weld microstructure and toughness of laser-arc hybrid welding of martensitic stainless steel // *J. Mater. Process. Technol.*, 245 (2017), pp. 7-14
15. P. Sathiya, M.K. Mishra, R. Soundararajan, B. Shanmugarajan. Shielding gas effect on weld characteristics in arc-augmented laser welding process of super austenitic stainless steel // *Opt. Laser Technol.*, 45 (2013), pp. 46-55
16. F. Kong, J. Ma, R. Kovacevic. Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser–GMA welding process // *J. Mater. Process. Technol.*, 211 (2011), pp. 1102-1111
17. W. Piekarska, M. Kubiak. Three-dimensional model for numerical analysis of thermal phenomena in laser–arc hybrid welding process // *Int. J. Heat Mass Transf.*, 54 (2011), pp. 4966-4974
18. C. Tan, L. Li, Y. Chen, W. Guo. Laser-tungsten inert gas hybrid welding of dissimilar metals AZ31B Mg alloys to Zn coated steel // *Mater. Des.*, 49 (2013), pp. 766-773

19. E. Bayer, B. Brenner, R. Poprawe, Hybrid laser welding techniques for enhanced welding efficiency, in: Proc // of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'96, Detroit, USA, 1996, pp. 157–166.
20. J.F. Ready. Industrial Applications of Lasers. (second ed.), Academic Press, London (1997)
21. P. Seyffarth, I.V. Krivtsun. Laser-arc Processes and Their Applications in Welding and Material Treatment. Taylor & Francis, London (2002)
22. H. Cui, I. Decker, J. Ruge. Wechselwirkungen zwischen WIGSchweißlichtbogen und fokussiertem Laserstrahl // Proc. of the Conference Laser'89, Springer, Berlin (1989), pp. 577-581
23. K.H. Magee, V.E. Merchant, C.V. Hyatt, Laser assisted gas metal arc weld characteristics, in: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO'90, Boston, USA, 1990, pp.382–389.
24. B.R. Finke, F. Stern, I. Decker. Auswirkungen eines unterstützenden Laserstrahls auf den WIG-Schweißprozess // DVS-Ber., 135 (1991), pp. 149-152
25. U. Dilthey, F. Lüder, A. Wieschemann. Expanded capabilities in the welding of aluminium alloys with the laser-MIG hybrid process. Aluminium, 75 (1999), pp. 64-75
26. U. Dilthey, A. Wieschemann. Prospects by combining and coupling laser beams and arc welding processes // Rivista Italiana della Saldatura, 52 (6) (1999), pp. 749-759
27. T. Graf, H. Staufer, Laser hybrid process at Volkswagen, International Institute of Welding, 1999, IIW-Doc. XII-1730-02.
28. U. Dilthey, F. Lueder, A. Wieschemann. Technical and economical advantages by synergies in laser arc hybrid welding // Weld. World, 43 (1999), pp. 141-152
29. D. Petring, C. Fuhrmann, Recent progress and innovative solutions for laser-arc hybrid welding, in: Proc. of the 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, Melbourne, Australia., 2004, pp. 7–10.

30. Fronius International GmbH, https://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-F92B902E-920234D8/fronius_international/hs.xsl/79_687_ENG_HTML.htm#.WLQh5dR97Gg.
31. ESAB, <http://www.esab.com/automation/en/process/Hybrid-Laser-Welding.cfm>.
32. Carl Cloos Schweisstechnik GmbH, <http://www.cloos.de/de-en/products/qineo/laser-hybrid-weld/>.
33. Laser Trader Limited, <http://www.lasertrader.co.uk/index.php/products/precitec-roducts/laser-welding-heads/yh50-hybrid-welding-head/>.
34. K. Nilsson, S. Heimbs, H. Engström, A.F.H. Kaplan, Parameter influence in CO₂-laser/MIG hybrid welding, in: Proc. of 56th Annual Assembly of the International Institute of Welding, Bucharest, Romania, 2003, IIW Doc. IV-843-03.
35. W.M. Steen. Arc augmented laser processing of materials // J. Appl. Phys., 51 (11) (1980), pp. 5636-5641
36. C. Bagger, B.D. Wiwe, N.A. Paulin, F.O. Olsen, Closing the weld gap with laser/MIG hybrid welding process, in: Proc. of the 9th Nordic Laser Materials Processing Conference, Trondheim, Norway, 2003, pp. 113–124.
37. P.T. Swanson, C.J. Page, E. Read, H.Z. Wu. Plasma augmented laser welding of 6 mm steel plate // Sci. Technol. Weld. Joining, 12 (2) (2007), pp. 153-160
38. J. Matsuda, A. Utsumi, M. Katsumura, M. Hamasaki, S. Nagata. TIG or MIG arc augmented laser welding of thick mild steel plate // Join. Mater., 1 (1988), pp. 31-34
39. X. Gu, H. Li, L. Yang, Y. Gao. Coupling mechanism of laser and arcs of laser-twin-arc hybrid welding and its effect on welding process // Opt. Laser Technol., 48 (2013), pp. 246-253
40. X. Zhan, Y. Li, W. Ou, F. Yu, J. Chen, Y. Wei. Comparison between hybrid laser-MIG welding and MIG welding for the invar36 alloy // Opt. Laser Technol., 85 (2016), pp. 75-84

41. S. Yan, Y. Nie, Z. Zhu, H. Chen, G. Gou, J. Yu, G. Wang. Characteristics of microstructure and fatigue resistance of hybrid fiber laser-MIG welded Al–Mg alloy joints // *Appl. Surf. Sci.*, 298 (2014), pp. 12-18
42. S. Yan, H. Chen, Z. Zhu, G. Gou. Hybrid laser-Metal Inert Gas welding of Al–Mg–Si alloy joints: Microstructure and mechanical properties // *Mater. Des.*, 61 (2014), pp. 160-167
43. S.E. Nielsen, M.M. Andersen, J.K. Kristensen, T.A. Jensen, Hybrid welding of thick section C/Mn steel and aluminium, International Institute of Welding, 2002, IIW doc. XII 1731-02.
44. W. Piekarska, M. Kubiak. Modeling of thermal phenomena in single laser beam and laser-arc hybrid welding processes using projection method // *Appl. Math. Model.*, 37 (2013), pp. 2051-2062
45. Y. Naito, S. Katayama, A. Matsuunawa, Keyhole behaviour and liquid flow in molten pool during laser-arc hybrid welding, in: *Proc. of 1st International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing*, (SPIE 2003), vol. 4831, Osaka, Japan, 2002, pp. 357–362.
46. C. Emmelmann, M. Kirchhoff, N. Petri. Development of plasma-laser-hybrid welding process // *Phys. Proc.*, 12 (2011), pp. 194-200
47. F. Möller, C. Thomy. Interaction effects between laser beam and plasma arc in hybrid welding of aluminum // *Phys. Proc.*, 41 (2013), pp. 81-89
48. C.H. Kim, Y.N. Ahn, J.H. Kim. CO₂ laser micro plasma arc hybrid welding for galvanized steel sheets // *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, 21 (2011), pp. s47-s53
49. W.V. Vaidya, K. Angamuthu, M. Koçak, R. Grube, J. Hackius. Strength and fatigue resistance of laser-MIG hybrid butt-welds of an airframe aluminium alloy AA6013 // *Weld. World*, 50 (11/12) (2006), pp. 88-97
50. C. Bagger, F. Olsen, Comparison of plasma, metal inactive gas (MIG) and tungsten inactive gas (TIG) processes for laser hybrid welding, in: *Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO 2003*, Jacksonville, USA, 2003, pp. 13–17.

51. A.V. Birdeanu, C. Ciuca, A. Puicea. Pulsed LASER-(micro) TIG hybrid welding: Process characteristics // *J. Mater. Process. Technol.*, 212 (2012), pp. 890-902
52. M. Gao, S. Mei, Z. Wang, X. Li, X. Zeng. Process and joint characterizations of laser-MIG hybrid welding of AZ31 magnesium alloy // *J. Mater. Process. Technol.*, 212 (2012), pp. 1338-1346
53. P.G. Sanders, J.S. Keske, K.H. Leong, G. Kornecki. High power Nd:YAG and CO2 laser welding of magnesium. *J. Laser Appl.*, 2 (11) (1999), pp. 96-103
54. K.G. Watkins, Laser welding of magnesium alloys, magnesium Technology, TMS Annual Meeting and Exhibition, San Diego, USA, 2003, pp. 153-156.
55. C.M. Allen, G. Verhaeghe, P.A. Hilton, C.P. Heason, P.B. Prangnell. Laser and hybrid laser-MIG welding of 6.35 and 12.7mm thick aluminium aerospace alloy // *Mater. Sci. Forum.*, 519-521 (2006), pp. 1139-1144
56. S. Katayama, Y. Kawahito, M. Mizutani, Laser welding and hybrid welding of aluminium alloys, in: *Proc. of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*, Yokohama, Japan, 2010, pp. 908-914.
57. C. Thorny. Application of high power fibre laser in laser and laser-MIG welding of steel and titanium // *Weld. World*, 46 (9s) (2005), pp. 88-98
58. C. Li, K. Muneharua, S. Takao, H. Kouji. Fiber laser-GMA hybrid welding of commercially pure titanium // *Mater. Des.*, 30 (2009), pp. 109-114
59. N. Ma, L. Li, H. Huang, S. Chang, H. Murakawa. Residual stresses in laser-arc hybrid welded butt-joint with different energy ratios // *J. Mater. Process. Technol.*, 220 (2015), pp. 36-45
60. D.Y. Kim, Y.W. Park. Weldability evaluation and tensile strength estimation model for aluminum alloy lap joint welding using hybrid system with laser and scanner head // *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, 22 (2012), pp. s596-s604
61. C.E.A. Walsh. Characteristics of high-power diode-laser welds for industrial assembly // *J. Laser Appl.*, 15 (2) (2003), pp. 68-76

62. A. Fellman, P. Jernstrøm, V. Kujanpää, The effect of shielding gas composition in hybrid welding of carbon steel, in: Proc. of the 9th Nordic Laser Materials Processing Conference, Trondheim, Norway, 2003, pp. 103–112.
63. S. Webster, J.K. Kristensen, D. Petring. Joining of thick section steels using hybrid laser welding. *Ironmak. Steelmak.*, 35 (7) (2008), pp. 496-504
64. M. Ono, Y. Shinbo, A. Yoshitake, M. Ohmura. Development of laser-arc hybrid welding // *NKK Tech. Rev.* (2002), pp. 70-74
65. S. Shi, Laser and hybrid laser MAG welding of thick section C-MN steel, in: Proc. of the 2005 International Forum on Welding Technologies in Energy Engineering, Shanghai, China, 2005.
66. Y. Chen, Z. Lei, L. Li, L. Wu. Experimental study on welding characteristics of CO₂ laser TIG hybrid welding process // *Sci. Technol. Weld. Joining*, 11 (4) (2006), pp. 403-411.
67. J.L. Arias, A. Vandewynckele, J. Vazquez, P. Romero, Laser TIG hybrid welding of very thin austenitic stainless steel sheet, in: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO 2005, Miami, USA, 2005, pp. 104–107.
68. U. Reisgen, S. Olschok. Laser-submerged arc hybrid welding // *Paton Weld. J.*, 4 (2009), p. 38
69. R. Li, Z. Li, Y. Zhua, L. Ronga. A comparative study of laser beam welding and laser–MIG hybrid welding of Ti–Al–Zr–Fe titanium alloy // *Mater. Sci. Eng., A*, 528 (2011), pp. 1138-1142
70. W. Zhang, X. Hua, W. Liao, F. Li, M. Wang. Study of metal transfer in CO₂ laser + GMAW-P hybrid welding using argon–helium mixtures // *Opt. Laser Technol.*, 56 (2014), pp. 158-166
71. L. Bidia, P.L. Masson, E. Cicala, C. Primault. Experimental design method to the weld bead geometry optimization for hybrid laser-MAG welding in a narrow chamfer configuration // *Opt. Laser Technol.*, 89 (2017), pp. 114-125
72. M. Moradi, M. Ghoreishi, J. Frostevarg, A.F.H. Kaplan. An investigation on stability of laser hybrid arc welding // *Opt. Lasers Eng.*, 51 (2013), pp. 481-487

73. S. Liu, S. Chen, Q. Wang, Y. Li, H. Zhang, H. Ding. Analysis of plasma characteristics and conductive mechanism of laser assisted pulsed arc welding // *Opt. Lasers Eng.*, 92 (2017), pp. 39-47
74. J. Frostevarg, A.F.H. Kaplan. Undercuts in laser arc hybrid welding // *Physics Procedia*, 56 (2014), pp. 663-672
75. D.M. Gureev, A.E. Zaikin, A.B. Zolotarevsky. Method of laser-arc material processing and its applications // *Trans. Phys. Inst. USSR Acad. Sci.*, 198 (1989), pp. 41-61
76. U.A. Dilthey, U. Wiesschemann. Prospective offered by combining and coupling laser beam and arc welding // *Weld. Int.*, 16 (9) (2002), pp. 711-719.
77. M. Chen, J. Xu, L. Xin, Z. Zhao, F. Wu, S. Ma, Y. Zhang. Effect of keyhole characteristics on porosity formation during pulsed laser-GTA hybrid welding of AZ31B magnesium alloy // *Opt. Lasers Eng.*, 93 (2017), pp. 139-145
78. L. Liu, M. Chen, C. Li. Effect of electric arc on laser key hole behavior based on direct observation during low power pulsed laser-arc hybrid welding process // *Opt. Lasers Eng.*, 51 (2013), pp. 1153-1160
79. W.M. Steen, M. Eboo. Arc augmented laser welding // *Metal Constr.*, 11 (7) (1979), pp. 332-335
80. C. Bagger, F.O. Olsen. Review of laser hybrid welding // *J. Laser Appl.*, 17 (1) (2005), pp. 2-14
81. H.B. Cary, S.C. Helzer. *Modern Welding Technology* // (sixth ed.), Pearson, New Jersey (2005)
82. J. Yan, M. Gao, X. Zeng. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding // *Opt. Lasers Eng.*, 48 (2010), pp. 512-517
83. P. Leo, G. Renna, G. Casalino, A.G. Olabi. Effect of power distribution on the weld quality during hybrid laser welding of an Al-Mg alloy // *Opt. Laser Technol.*, 73 (2015), pp. 118-126
84. M.M. Alam, Z. Barsoum, P. Jonsen, A.F.H. Kaplan, H.A. Haggblad. The influence of surface geometry and topography on the fatigue cracking behaviour of

laser hybrid welded eccentric fillet joints // *Appl. Surf. Sci.*, 256 (2010), pp. 1936-1945

85. Y. Chen, Q. Xu, Y. Su. Welding application of combined laser coaxial arc heat source // *Trans. China Weld. Inst.*, 16 (4) (1995), pp. 239-242

86. L. Liu, X. Hao, G. Song. A new laser-arc hybrid welding technique based on energy conservation // *Mater. Trans.*, 47 (6) (2006), pp. 1611-1614

87. M. Gao, X.Y. Zeng, Q.W. Hu. Effects of welding parameters on melting energy of CO₂ laser-GMA hybrid welding // *Sci. Technol. Weld. Joining*, 11 (5) (2006), pp. 517-522

88. W. Piekarska, M. Kubiak, A. Bokota. Numerical simulation of thermal phenomena and phase transformations in laser-arc hybrid welded joints // *Arch. Metall. Mater.*, 56 (2) (2011), pp. 409-421

89. Z. Gao, X. Shao, P. Jiang, L. Cao, Q. Zhou, C. Yue, Y. Liu, C. Wang. Parameters optimization of hybrid fiber laser-arc butt welding on 316L stainless steel using Kriging model and GA // *Opt. Laser Technol.*, 83 (2016), pp. 153-162

90. C. Tan, W. He, X. Gong, L. Li, J. Feng. Influence of laser power on microstructure and mechanical properties of fiber laser-tungsten inert gas hybrid welded Mg/Cu dissimilar joints // *Mater. Des.*, 78 (2015), pp. 51-62

91. L. Bidi, S. Mattei, E. Cicala, H. Andrzejewski, P.L. Masson, J. Schroeder. The use of exploratory experimental designs combined with thermal numerical modeling to obtain a predictive tool for hybrid laser/MIG welding and coating processes // *Opt. Laser Technol.*, 43 (2011), pp. 537-545.

92. H.S. Bang, H.S. Bang, Y.C. Kim, S.M. Joo. Analysis of residual stress on AH32 butt joint by hybrid CO₂ laser-GMA welding // *Comput. Mater. Sci.*, 49 (2010), pp. 217-221

93. I. Bunaziv, O.M. Akselsen, A. Salminen, A. Unt. The Fiber laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum alloy // *J. Mater. Process. Technol.*, 233 (2016), pp. 107-114

94. G. Casalino, S.L. Campanelli, U.D. Maso, A.D. Ludovico, Arc leading versus laser leading in the hybrid welding of aluminum alloy using a fiber laser, in:

Proc. of 8th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2013, pp. 151–156.

95. W. Zhang, X. Hua, W. Liao, F. Li, M. Wang. The effect of the welding direction on the plasma and metal transfer behavior of CO₂ laser + GMAW-P hybrid welding processes // *Opt. Lasers Eng.*, 58 (2014), pp. 102-108

96. S. Liu, Y. Li, F. Liu, H. Zhang, H. Ding. Effects of relative positioning of energy sources on weld integrity for hybrid laser arc welding // *Opt. Lasers Eng.*, 81 (2016), pp. 87-96

97. M.M. Atabaki, J. Ma, G. Yang, R. Kovacevic. Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations // *Mater. Des.*, 64 (2014), pp. 573-587

98. S. Liu, F. Liu, H. Zhang, Y. Shi. Analysis of droplet transfer mode and forming process of weld bead in CO₂ laser–MAG hybrid welding process // *Opt. Laser Technol.*, 44 (2012), pp. 1019-1025

99. L. Liu, R. Xu. Investigation of corrosion behavior of Mg-steel laser-TIG hybrid lap joints // *Corros. Sci.*, 54 (2012), pp. 212-218

100. K. Zhang, Z. Lei, Y. Chen, M. Liu, Y. Liu. Microstructure characteristics and mechanical properties of laser-TIG hybrid welded dissimilar joints of Ti–22Al–27Nb and TA15 // *Opt. Laser Technol.*, 73 (2015), pp. 139-145

101. M. El Rayes, C. Walz, G. Sepold. The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry // *Weld. J.*, 83 (5) (2004), pp. 147s-153s

102. C.V. Hyatt, K.H. Magee, J.F. Porter, V.E. Merchant, J.R. Matthews. Laser-assisted gas metal arc welding of 25-mm-thick HY-80 plate // *Weld. J.*, 80 (7) (2001), pp. 163s-172s

103. M. Kutsuna, L. Chen, Interaction of both plasma in CO₂ laser—MAG hybrid welding of carbon steel, International Institute of Welding, 2002, IIW document, XII 1708-02.

104. T. Liu, F. Yan, S. Liu, R. Li, C. Wang, X. Hu. Microstructure and mechanical properties of laser-arc hybrid welding joint of GH909 alloy // *Opt. Laser Technol.*, 80 (2016), pp. 56-66

105. M. Gao, X. Zeng, Q. Hu. Effects of gas shielding parameters on weld penetration of CO₂ laser-TIG hybrid welding // *J. Mater. Process. Technol.*, 184 (2007), pp. 177-183
106. S. Liu, F. Liu, C. Xu, H. Zhang. Experimental investigation on arc characteristic and droplet transfer in CO₂ laser–metal arc gas (MAG) hybrid welding // *Int. J. Heat Mass Transf.*, 62 (2013), pp. 604-611
107. J. Ma, M.M. Atabaki, W. Liu, R. Pillai, B. Kumar, U. Vasudevan, R. Kovacevic. Laser-based welding of 17–4 PH martensitic stainless steel in a tubular butt joint configuration with a built-in backing bar // *Opt. Laser Technol.*, 82 (2016), pp. 38-52
108. T. Ishide, S. Tsubota, M. Watanabe, K. Ueshiro, Development of YAG laser and arc hybrid welding method-development of various TIG-YAG and MIG-YAG welding methods, International Institute of Welding, 2002, IIW doc. XII-1705-02.
109. M. Wahba, M. Mizutani, S. Katayama. Hybrid welding with fiber laser and CO₂ gas shielded arc // *J. Mater. Process. Technol.*, 221 (2015), pp. 146-153
110. Y.T. Cho, W.I. Cho, S.J. Na. Numerical analysis of hybrid plasma generated by Nd:YAG laser and gas tungsten arc // *Opt. Laser Technol.*, 43 (2011), pp. 711-720
111. L. Liu, X. Hao. Improvement of laser keyhole formation with the assistance of arc plasma in the hybrid welding process of magnesium alloy // *Opt. Lasers Eng.*, 47 (2009), pp. 1177-1182
112. F. Möller, H. Kügler, S.F. Goecke, Laser-GMA-hybrid welding of high strength multi-material joints, in: *Proc. of the 3rd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich, Germany, 2015.*
113. G. Song, Z. Luo. The influence of laser pulse wave form on laser–TIG hybrid welding of AZ31B magnesium alloy // *Opt. Lasers Eng.*, 49 (2011), pp. 82-88
114. C. Cai, J. Feng, L. Li, Y. Chen. Influence of laser on the droplet behavior in short-circuiting, globular, and spray modes of hybrid fiber laser-MIG welding // *Opt. Laser Technol.*, 83 (2016), pp. 108-118

115. Z. Lei, L. Ni, B. Li, K. Zhang. Numerical simulation of droplet shapes in laser-MIG hybrid welding // *Opt. Laser Technol.*, 88 (2017), pp. 1-10
116. X.S. Gao, C.S. Wu, S.F. Goecke, H. Kügler. Numerical simulation of temperature field, fluid flow and weld bead formation in oscillating single mode laser-GMA hybrid welding // *J. Mater. Process. Technol.*, 242 (2017), pp. 147-159
117. G. Campana, A. Fortunato, A. Ascari, G. Tani, L. Tomesani. The influence of arc transfer mode in hybrid laser-MIG welding // *J. Mater. Process. Technol.*, 191 (2007), pp. 111-113
118. W. Liu, J. Ma, G. Yang, R. Kovacevic. Hybrid laser-arc welding of advanced high-strength steel // *J. Mater. Process. Technol.*, 214 (2014), pp. 2823-2833
119. A. Unt, I. Poutiainen, A. Salminen. Influence of filler wire feed rate in laser-arc hybrid welding of T-butt joint in shipbuilding steel with different optical setups // *Phys. Proc.*, 78 (2015), pp. 45-52
120. I. Bendaoud, S. Matteï, E. Cicala, I. Tomashchuk, H. Andrzejewski, P. Sallamand, A. Mathieu, F. Bouchaud. The numerical simulation of heat transfer during a hybrid laser–MIG welding using equivalent heat source approach // *Opt. Laser Technol.*, 56 (2014), pp. 334-342
121. D. Petring, C. Fuhrmann, N. Wolf, R. Poprawe, Progress in laser-MAG hybrid welding of high-strength steels up to 30 mm, in: *Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO 2007, Orlando, USA, 2007*, pp. 300–307.
122. H. Staufer. Laser Hybrid Welding in the Automotive Industry // *Weld. J.*, 86 (2007), pp. 36-40
123. D. Petring, C. Fuhrmann, N. Wolf, R. Poprawe, Investigations and applications of laser-arc hybrid welding from thin sheets up to heavy section components, in: *Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO 2003, Jacksonville, USA, 2003*, pp. 1–10.
124. T. Graf, H. Staufer. Laser-hybrid welding drives VW improvements // *Weld. J.*, 82 (2003), pp. 42-48

125. E.W. Reutzel, M.J. Sullivan, D.A. Mikesic. Joining pipe with the hybrid laser-GMAW process: Weld test results and cost analysis // *Weld. J.*, 85 (6) (2006), pp. 66-71
126. C. Zhang, M. Gao, X. Zeng. Effect of microstructural characteristics on high cycle fatigue properties of laser-arc hybrid welded AA6082 aluminum alloy // *J. Mater. Process. Technol.*, 231 (2016), pp. 479-487
127. C. Zhang, M. Gao, D. Wang, J. Yin, X. Zeng. Relationship between pool characteristic and weld porosity in laser arc hybrid welding of AA6082 aluminum alloy // *J. Mater. Process. Technol.*, 240 (2017), pp. 217-222
128. S. Fujinaga, R. Ohashi, S. Katayama, A. Matsunawa, Improvements of welding characteristics of aluminum alloys with YAG laser and TIG arc hybrid system, in: *Proc. of the 1st International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing*, (SPIE 2003), vol. 4831, Osaka, Japan, 2002, pp. 301–306.
129. L. Liu, R. Xu. Investigation of the corrosion behaviour of laser-TIG hybrid welded Mg alloys // *Corros. Sci.*, 52 (2010), pp. 3078-3085
130. F. Kong, R. Kovacevic. 3D finite element modeling of the thermally induced residual stress in the hybrid laser/arc welding of lap joint // *J. Mater. Process. Technol.*, 210 (2010), pp. 941-950
131. Z. Zeng, X. Li, Y. Miao, G. Wu, Z. Zhao. Numerical and experiment analysis of residual stress on magnesium alloy and steel butt joint by hybrid laser-TIG welding // *Comput. Mater. Sci.*, 50 (2011), pp. 1763-1769
132. S. Olschok, U. Reisgen, U. Diltthey, Robot application for laser-GMA hybrid welding in shipbuilding, in: *Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO 2007*, Orlando, USA, 2007, pp. 308–315.
133. C. Walz, I.S. Springer, M. El Rayes, T. Seefeld, G. Sepold, Hybrid welding of steel for offshore applications, in: *Proc. of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Stavanger, Norway, 2001.
134. H. Staufer, Laser hybrid welding and laser brazing: State of the art in technology and practice by the examples of the Audi A8 and VW-Phaeton, in: *Proc.*

of the 3rd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing Conference 2015, Munich, Germany, 2015, pp. 203–208.

135. M. Lee, W. Chang, Y. Kweon, D. Lee, Laser-MIG hybrid weldability of high strength steel for car industry, in: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO 2005, Miami, USA, 2005, pp.134–142.

136. F. Roland, T. Reinert, G. Pethan, Laser welding in ship building—An overview of the activities at Meyer Werft, in: Proc. of the IIW International Conference in Connection with Annual Assembly 2002, Copenhagen, Denmark, 2002, pp. 103–115.

137. C.H.J. Gerritsen, J. Weldingh, J.K. Kristensen, Development of Nd:Yag laser-MAG hybrid welding of T joints for shipbuilding, in: Proc. of the 10th Nordic Laser Materials Processing Conference, Lulea, Sweden, 2005, pp. 395–406.

138. U. Jasnau, A. Sumpf, Laser hybrid welding with high power fiber laser—New chances for use of laser technology, in: Proc. of the Nordic Welding Conference 2006, Tampere, Finland, 2006.

139. N.J. Orozco, Fully integrated hybrid-laser welding control process, processes for laser hybrid welding, in: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO 2003, Jacksonville, USA, 2003, pp. 31–40.

140. M.M. Atabaki, J. Ma, W. Liu, R. Kovacevic. Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel to aluminum alloy by using structural transition insert // Mater. Des., 75 (2015), pp. 120-135

141. J. Adamiec, M. Więcek, W. Gawrysiuk. Fibre laser usage in boiler elements' production for the power industry // Weld. Int., 24 (11) (2010), pp. 853-860

142. P. Jernstrøm, Hybrid welding of hollow section beams for a telescopic lifter, in: Proc. of the 1st International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing, (SPIE 2003), vol. 4831, Osaka, Japan, 2002, pp. 353–356.

143. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)

144. Положение о порядке обработки и защите персональных данных в ИФПМ СО РАН [Текст]. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2018. – 18с.

145. СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

146. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

147. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

148. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95

149. ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

150. ГОСТ 12.2.091-2012 (IEC 61010-1:2001) Безопасность электрического оборудования для измерения, управления и лабораторного применения.

Приложение А

Literature review

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ71	Ступаков А. Н.		

Консультант школы отделения ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Коростелева Е.Н.	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Рыбушкина С.В.	-		

1.1 Hybrid laser-arc welding

There are two different approaches of using laser along with electric arc for welding. The first approach is referred to as laser assisted arc welding process, where the laser is used only to preheat the metals, which are to be welded by the arc welding process [7]. In this process a low power laser source is commonly used to augment the arc welding process and, therefore, improvements in weld penetration and the welding speed is not significant. In second approach, a high power laser beam is used to perform a deep penetration welding. This is a penetration mode welding process characterized by formation of keyhole at the joint [8-9]. In this process, the synergic action of a laser beam having high energy density and an electric arc having high-energy efficiency is used for welding [10]. This process is known as arc augmented laser-welding process, most commonly known as hybrid laser arc welding process [11]. The dynamic interaction of laser irradiation, electric arc and the filler droplet govern the formation of shape and size of the weld bead and the strength of the weld [12]. Hybrid weld beads have two distinctive fusion zones, namely upper zone (arc) and lower zone (laser) [13-14]. The bead geometry of upper zone resembles a semi hemispherical ‘cup’ shape. The lower zone looks like a “finger”, clearly illustrating the laser keyhole effect [15-16]. In hybrid laser arc welding process, the laser beam is used as the primary heat source which interacts in the same weld pool created by a secondary heat source, i.e., the arc, generated during an electric arc welding process [17-18]. The use of secondary heat source compensates the requirement of high power laser source, which drastically reduce the cost of the set-up [5, 19].

The hybrid laser arc welding process is introduced in late 1970s by Prof. W. M. Steen [11] and co-researchers, and the process is termed as “arc-augmented laser welding”. The results of their research showed the clear advantages of combining a laser beam and an electric arc for welding. The hybridization effect shows a remarkable increase of welding speed, penetration depth and process stability. After the successful demonstration of this technique, further research and development on laser arc hybrid welding experienced a slow growth due lack of availability of high power, reliable laser source, required human skills, and incomplete knowledge of the

process [20]. The development of reliable high power industrial lasers in late 1980s [21], catch the attention of the researchers from industry and academics, to engage in the improvement of the process, to make it viable for industrial applications. Several drawbacks of the individual welding processes are eliminated, including the problems like gap bridging ability and reflectivity of the materials are no longer an issue for performing successful welding [22-24]. In 1990s, the hybrid laser arc welding seen greater developments due to availability of high power CO₂ laser. A number of studies on hybrid laser arc welding processes were carried out focusing on the economic viability of the process, welding position and preparation of edges, minimization of metallurgical defects, optimization of process parameters, etc. [25-28]. However, after reporting of several process advantages, its very limited industrial application was due to the high equipment cost and complexity of the process because of large number of control parameters, and the unavailability of an integrated commercial laser arc hybrid welding system. The first industrial laser arc hybrid welding system was introduced in 2000 by Fraunhofer ILT, Germany, in an oil tank manufacturing industry [29]. This system has been installed in different industries including automotive industry, ship building and tube manufacturing industries for welding of metallic sheets [29]. A number of laser arc hybrid welding systems are commercially available now [30-33]. The industrial applications of the laser arc hybrid welding have grown in this century due to not only the development of commercially available integrated hybrid welding heads [5], but also due to the availability of cheaper, reliable and efficient high power laser systems with the advancement of the instrumentation, automation and control.

Hybrid laser arc welding process offers several process advantages over the laser welding and arc weld processes, such as: higher welding speed [34-36] and penetration depth [37-39] with increased productivity [19, 34], requirement of less number of welding passes [40], narrow weld seam with small heat affected zones (HAZ) [41-42], better gap bridging ability [5, 34, 43], improved weld seam stability and side wall fusion [44], lower capital cost [5, 19], improved plug efficiency, etc. The use of secondary heat source, as electric arc, compensates the requirement of

high power laser source, which drastically reduce the cost of the set-up [19, 34]. Hybrid laser arc welding can weld a wide variety of metals and alloys including highly reflective materials and reactive metals. Although the hybrid laser arc welding process has numerous process advantages, the process has certain limitations too, such as: higher initial investment, requirement of accurate positioning and proper part fit-up, controlling large numbers of process parameters, and requirement of additional safety measures.

1.2 Hybrid laser arc welding systems

A number of hybrid laser arc welding systems have been developed based on different combinations of laser and arc welding systems. CO₂ lasers and Nd:YAG lasers are the most commonly used lasers and GMAW (gas metal arc welding), GTAW (gas tungsten arc welding) and PAW (plasma arc welding) are mostly used arc welding systems, employed in laser arc hybrid welding processes [5, 34, 43, 45-52]. Lasers are used as primary heat source in hybrid laser arc welding. CO₂ laser is the highest power continuous wave laser available till now. The output power of a continuous wave CO₂ laser can range from a few watts to 50 kilowatts or more, and in a pulse mode the peak power can reach to millions of watts. Nd:YAG laser is the most widely used solid state laser for materials processing. The maximum available power of a commercially available continuous wave Nd:YAG laser is in the range of few kilowatts. In Q-switch mode the peak power of a Nd:YAG laser can be achieved in the range of Gigawatts with a pulse duration in nanoseconds. The main difference between the CO₂ laser and Nd:YAG laser is their operating wavelengths. Nd:YAG laser has shorter wavelength (1.064 μm) and also have better beam quality as compared to CO₂ laser (10.6 μm). Laser beam with shorter wavelength is used for welding reflective metals like aluminium, stainless steel, copper, gold, etc. Because of the shorter wavelength of Nd:YAG laser, the laser beam can be transported from the source to the workstation via optical fiber cables. The weld quality of Nd:YAG laser welding of aluminium and magnesium alloys is found superior to CO₂ laser welding, because the use of Nd:YAG laser reduces the threshold irradiation required for keyhole welding which in turn produces a more stable weld pool [53]. The

Nd:YAG laser has greater welding efficiency than the CO₂ laser [53-54]. The electro-optical efficiency, commonly known as plug efficiency of both, CO₂ laser and Nd:YAG laser, is very poor, which is in the range of 2–20% only. Other potential alternatives of CO₂ and Nd:YAG lasers for hybrid laser arc welding are disk and fiber lasers [14, 52, 55-60]. The advantages of fiber and disk lasers are their high output power, high optical quality, compact size, high peak power, higher plug efficiency (20–40%) and low cost per kW as compared to CO₂ and Nd:YAG lasers. Application of fiber lasers in hybrid laser arc welding is gaining popularity in recent years with increasing output power and high beam quality, able to weld aluminium alloys [2, 55-56] and titanium alloys [57-58] which are difficult to weld with CO₂ lasers. Diode lasers can also be used for welding. The application of diode lasers in hybrid laser arc welding is limited by its inability to form key hole because of its relatively low output power and poor beam quality. However, the use of high power diode laser in deep penetration welding has been reported in Ref. [61].

An electric arc of an arc welding system is used as a secondary heat source during hybrid laser arc welding. The most commonly used arc welding system during hybrid laser arc welding is GMAW [11, 34, 37, 43, 49, 62-65]. GTAW and PAW are also extensively used in hybrid laser arc welding processes [19, 45, 46-48, 66-67]. Submerged arc welding (SAW) process can also be used in hybrid laser arc welding processes [68].

1.3 Hybrid laser GMAW process

In hybrid laser GMAW process a CO₂ laser, Nd:YAG laser or a fiber laser is used as primary heat source and the electric arc produced during GMAW, commonly known as MIG (metal inert gas) welding, is used as secondary heat source. In this process the arc is generated between the consumable metal electrode and the workpiece. The electrode is continuously fed from a spool. The laser generates a keyhole at weld pool which ensures a deep penetration weld, whereas, the molten filler material produced during GMAW helps to fill the root gap and permits welding of the parts with higher gaps and fit-up issues [34]. It is observed that the stability of GMAW arc improves when it combine with a laser beam [28]. The use of filler

materials improves chemical composition of the weld by adding alloying elements in the weld pool and also improves the mechanical properties of the weld seam [69]. The greater volume of melt pool produced during GMAW makes this process more efficient for bridging the weld gap than GTAW and PAW. Shielding gases are used to protect the molten weld pool from atmospheric contamination. Inert gases like helium, argon or nitrogen or mixture of those gases in different proportions are generally used during MIG (metal inert gas) welding, whereas, active gas like CO₂, O₂ or mixture of CO₂ with inert gases in different proportions are used during MAG (metal active gas) welding, as shielding gases [6, 12, 70-72].

1.4 Hybrid laser GTAW process

In hybrid laser GTAW process, the electric arc produced during GTAW, commonly known as TIG (tungsten inert gas) welding, is used as a secondary heat source. Because of the use of non-consumable tungsten electrode, additional filler materials may be required during welding. The rate of metal deposition during hybrid laser GTAW is much lesser than that of hybrid laser GMAW, because only a fraction of heat of the arc is used to melt the filler wire during hybrid laser GTAW process. As the filler wire is separated from the electrical circuit of the hybrid laser GTAW set up, the welding current and the metal deposition rate during welding can be determined independently. However, the electrode contamination due to hot metal vapor, erosion of tungsten electrode tip due to use of high frequency arc ignition, and high affinity of tungsten for oxygen are the common problems associated with GTAW process [21]. Shielding gas is used to protect the weld pool and also to protect the electrode from atmospheric contamination or oxide formation. The melting rate of base material for hybrid laser GTAW is nearly twice of the sum of melting rate of laser welding and TIG welding, individually [75].

1.5 Hybrid laser PAW process

In hybrid laser PAW process, a constricted plasma arc is used as secondary heat source. The non-consumable tungsten electrode used in PAW is recessed in the welding torch. A water-cooled constricting nozzle of small diameter is used inside the welding torch to squeeze the arc which increases its intensity, and improves stability

and shape of the arc. The inert gas passed through the constricting nozzle, known as orifice gas, is used to produce plasma. The shielding effect is further enhanced by using another shielding gas, which is passed through the outer ring of the torch. In PAW, the arc is established either between the electrode and the constricting nozzle (non-transfer arc) or between the electrode and the workpiece material (transfer arc). As compared to TIG arc, the plasma arc is more stable and pointed, and the plasma arc does not deflect easily at the closest point of base metal because the jet action due to constriction of the arc plasma. The hybridization effect of laser and plasma arc increases the welding speed and stabilized the arc plasma. The penetration depth is more for hybrid laser PAW process than that for laser welding for the same energy input per unit length of the weld [46]. As compared to the results of hybrid laser GTAW, the heat input from the arc can be reduced up to 40% when hybrid laser PAW is used [48].

1.6 Laser power

The laser power is the main source of heat during hybrid laser arc welding, which produces the keyhole and ensures the deep penetration welding [10, 60, 87]. Because of using electric arc with the laser at same weld pool, the laser absorption within the metal [18] and the circulation of molten metal at weld pool are increased [88]. The power density has the greatest effect on welding during welding with laser. The weld penetration increases with laser power [71, 89].

1.7 Welding speed

Higher welding speed is the characteristic feature of hybrid laser arc welding process, which increases the productivity. However, weld width and weld penetration are inversely effected by the welding speed [1, 4, 10, 91]. To compensate this, more laser power is required to be applied and the filler wire feed rate to be increased to maintain a constant volume of weld pool [91]. The welding speed to filler wire feeding ratio is an important factor for the stability of the keyhole and for the entire process [34]. A too high welding speed may cause improper fusion or lack of penetration of the weld, whereas, a too low welding speed may create a larger weld pool with deep penetration till the limit of burn through the material and may cause

partial decomposition [60]. The fast heating and cooling cycle due to higher welding speed produce steep temperature gradient at weld zone [92], which may results in metallurgical defects within the weld [10]. However, an increase in welding speed can effectively reduce the thermal residual stress concentration [16].

1.8 Compositions of shielding gases

The shielding gases are mainly used to protect the weld pool from surrounding atmosphere. The use of shielding gases and their compositions also influence the arc characteristics, formation of weld profile, and mode of metal transfer [105]. The inert gases like helium and argon are the predominant constituents of shielding gases used in hybrid laser arc welding processes [17, 41, 84, 100, 106]. Nitrogen, carbon dioxide, carbon monoxide (CO) are also used as shielding gas constituents based on the selection of materials, laser source and arc parameters [4, 15, 70, 98, 107-108]. The laser energy absorption by the laser induced plasma or by gas plume during CO₂ laser arc hybrid welding process is a well-known problem. This reduces the laser intensity reaching to the weld pool, decreasing the weld penetration. The use of high ionization potential shielding gas like helium during welding with CO₂ laser reduces the effect of plasma absorption [15, 70]. A mixture of argon, helium and CO₂ is also used in CO₂ laser arc hybrid welding processes [34, 98, 106]. The use of helium ensures deeper penetration, whereas, the use of argon improves the arc stability. It is found during welding of high strength steel using hybrid CO₂ laser GMAW process, using helium content less than 30% in shielding gas, requires additional source of helium as a secondary plume suppression gas [62]. The use of CO in shielding gas up to 10%, during hybrid CO₂ laser GMAW process, is found to stabilize the arc [62]. The use of a small percentage of oxygen ($\leq 5\%$) in shielding gas reduces the spatter formation and improves metal transfer during welding [15]. The use of CO₂ as shielding gas, in large proportion during hybrid laser arc welding, results in increase of weld penetration and reduction in porosity and cost, while increasing the number of spatters [109]. Laser absorption by the gas plasma during hybrid welding, is not significant for the lasers with relatively shorter wavelength [110]. Thus the choice of shielding gas composition during welding with

Nd:YAG, fiber and disc lasers are based mainly on the requirement of shielding and arc stability. An additional nozzle/torch is used in some cases, such as welding of reactive metals like titanium, to supply shielding gas, which trails the arc to avoid formation of oxides during the cooling [69].

1.9 Joint gap

The laser beam can weld parts with a gap up to 0.2–0.25 mm only, without visible defects like undercut or incomplete weld bead. However, a joint gap of 1 mm can easily be welded with hybrid laser arc welding process [5, 34, 36, 74]. The laser to arc energy ratio, laser arc distance, welding speed and wire feed rate are the critical parameters which determines the rate of deposition of the filler materials to fill the joint gap [119]. It is observed during the hybrid CO₂ laser MIG welding of high strength carbon steel that the wire feed rate is to be increased with the joint gap [34]. The results presented in Ref. [34, 43], shows that the welding speed can be increased during welding of parts having joint gap up to 1 mm, because the small joint gap simplifies the penetration, as more filler material reaches to the root of the joint. However, increasing the joint gap more than 1 mm requires the welding speed to be reduced and also requires proper selection of process parameters [34]. A larger joint gap may require multiple weld passes and the use of backing plate.

1.10 Joint configuration and edge preparation

Butt, corner, edge, lap and tee joints are the basic joint configurations used in welding. All these joint configurations are also used in hybrid laser arc welding process. Due to the small spot diameter of the laser beam the square edges are used for welding, whereas, grooves are made at joints when using arc welding, especially for thick sections. The simultaneous action of joint filling by filler deposition using arc welding and deep penetration by laser requires a different joint design for hybrid laser arc welding [40]. Thin metal sheets or metal plates having thickness less than 6–8 mm do not require edge preparation for welding using hybrid laser arc welding. For material having thickness more than 6–8 mm requires preparation of edges. The V or Y groove used for laser arc hybrid welding resembles the shape of a ‘wine glass’ or a ‘funnel’ [1, 16, 104, 120]. The grooves used in parts for laser arc hybrid welding

generally have smaller include angle, narrow root opening and larger land thickness as compared to the grooves used in arc welding [40, 97, 121]. It is found that double Y groove can provide the optimum condition for the stability of arc and laser [97]. For part having different thickness, the groove is made in such a way that the land thickness of both the part should be same at joint and the height difference to be compensated at the cap. The large weld pool at the cap has better tolerance to geometrical mismatch.

1.11 Industrial applications

Due to several process advantages of hybrid laser arc welding, such as: higher productivity and better weld quality as compared to laser welding or arc welding, makes it an attractive alternative for the different industries. The capital cost of the welding system can be compensated by providing faster welding speed and deeper penetration to reduce the cost per unit length of weld. The hybrid laser arc welding can be used to weld a wide variety of metals from ferrous metals like steels, stainless steels to the non-ferrous metals like aluminum, magnesium, nickel, titanium and their alloys, etc. [6, 9, 10, 14, 83, 89, 90, 100, 111, 113, 131]. This can weld thin sheet metals as well as thick metal plates. The high welding speed and deep penetration allows the welding of thick plates using less number of weld passes, which reduces the weld distortion.

The first industrial hybrid laser arc system was deployed by Fraunhofer ILT in an oil tank manufacturing company in 2000. It generates interest among the industries using high volume welding, which results in installation of a number of laser arc hybrid welding systems in automotive, ship building and tube manufacturing industries in the succeeding years [29]. The hybrid laser arc welding also found its application in aerospace industry, rolling stock and containers manufacturing industries, the offshore industry to construction, pipeline production, heavy engineering, energy sectors, etc. Different aspects like automation potential of laser arc hybrid welding, reduction of cost per unit length of weld, weldability of materials are investigated by several researchers for different industrial applications like in shipbuilding, pipeline, offshore industries, etc. [125, 132, 133]. The major

applications of laser arc hybrid welding are found in automobile and ship building industries where a large number of metallic components are welded to build light or heavy vehicles and ships.