

## Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 621.9.048.7

ГРНТИ 55.20.15

Инв. №

<b>ПРИНЯТО:</b>	<b>УТВЕРЖДЕНО:</b>
Исполнитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"	Государственный заказчик Министерство образования и науки Российской Федерации
От имени Руководителя организации  /Рудской А.И./	От имени Государственного заказчика  / / /

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 2 этапа Государственного контракта  
№ П63 от 02 апреля 2010 г.

Исполнитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"
Программа (мероприятие): Федеральная целевая программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.2 Проведение научных исследований целевыми аспирантами.
Проект: Решение обратной задачи по обеспечению необходимого распределения энергии для получения требуемых свойств сварного соединения трубной стали 09Г2ФБЮ при гибридной лазерно-дуговой сварке плавящимся электродом
Руководитель проекта:  /Кузнецов Михаил Валерьевич (подпись) М.П.

город Санкт-Петербург  
2011 г.

**СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ**  
**по Государственному контракту П63 от 02 апреля 2010 на выполнение поисковых**  
**научно-исследовательских работ для государственных нужд**

Организация-Исполнитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования \"Санкт-Петербургский государственный политехнический университет\"

Руководитель темы:

без ученой степени, без  
ученого звания

\_\_\_\_\_ Кузнецов М.В.  
подпись, дата

Исполнители темы:

без ученой степени, без  
ученого звания

\_\_\_\_\_ Сомонов В.В.  
подпись, дата

## Реферат

Отчет 45 с., 6 ч., 21 рис., 15 табл., 6 источн., 1 прил.

### «лазерно-дуговая сварка, гибридная сварка, металлы больших толщин, механические свойства сварных соединений»

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 2 этапу Государственного контракта № П63 "Решение обратной задачи по обеспечению необходимого распределения энергии для получения требуемых свойств сварного соединения трубной стали 09Г2ФБЮ при гибридной лазерно-дуговой сварке плавящимся электродом" (шифр "НК-468П") от 02 апреля 2010 по направлению "Оптика. Лазерная физика и лазерные технологии" в рамках мероприятия 1.3.2 "Проведение научных исследований целевыми аспирантами.", мероприятия 1.3 "Проведение научных исследований молодыми учеными - кандидатами наук и целевыми аспирантами в научно-образовательных центрах" , направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - определение параметров лазерно-дуговой сварки по требуемым механическим свойствам сварного соединения.

Для определения параметров лазерно-дуговой сварки по требуемым механическим свойствам сварного соединения был составлен оптимальный план проведения экспериментов типа  $2^k$ . Математическая модель строилась на базе уравнения регрессии. По результатам экспериментов была построена математическая модель для определения механических свойств сварного соединения по некоторым параметрам сварки – «прямая» задача. На базе «прямой» задачи была построена и решена «обратная» задача. Погрешность вычисления составляет 7%.

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. Аннотированная справка по научным результатам НИР, полученным на I этапе .....	7
2. Аналитический отчет о проведении экспериментальных исследований. ....	9
2.1 Выбор и обоснование оптимального варианта направления исследований .....	9
2.1.1. Перечень экспериментов и исследований .....	9
2.1.2 Экспериментальное оборудование для сварки.....	10
2.1.2.1 Комплекс лазерного оборудования .....	10
2.1.2.2 Комплекс дугового оборудования.....	12
2.1.2.3 Модуль лазерно-дуговой (рабочий инструмент) .....	18
2.1.2.4 Блок подготовки и распределения газов.....	19
2.1.2.5 Система перемещения заготовки относительно рабочего инструмента ..	20
2.1.2.6 Управление ЛДТК .....	20
2.1.3 Оборудование для исследования механических свойств швов.....	21
2.1.3.1 Система шлифподготовки и резки образцов фирмы BUEHLER .....	22
2.1.3.2 Микротвердомер MicroMet 5103 .....	23
2.1.3.3 Универсальный микроскоп .....	23
2.1.3.4 Компактный искровой оптико-эмиссионный спектрометр в комплекте...	24
2.1.3.5 Испытательная машина Zwick Z050.....	24
2.1.3.6 Маятниковый копер РКР-450 .....	24
2.1.4 Вывод .....	25
2.2. План проведения экспериментальных исследований .....	26
2.3. Экспериментальные исследования .....	28
2.3.1 Оборудование и материалы.....	28
2.3.2 Методика проведения испытаний сварного соединения на статическое растяжение .....	29
2.3.3 Результаты эксперимента .....	31
2.3.4 Выводы .....	31
3. Отчет по обобщению и оценке результатов исследований.....	32
3.1 Модель, позволяющая увеличить объем знаний для более глубокого понимания изучаемого предмета исследования новых явлений, механизмов или закономерностей .....	32
3.1.1 Решение «прямой» задачи.....	32
3.1.1.1 Перенос осей координат в центр эксперимента:.....	32
3.1.1.2 Составление ортогонального плана эксперимента:.....	33
3.1.1.3 Составление матрицы нормализованных уравнений для левой части уравнений регрессии: .....	34
3.1.1.4 Проведение 2-й серии экспериментов: .....	36
3.1.1.5 Определение ошибки воспроизводимости по критерию Фишера: .....	36
3.1.1.6 Проверка значимости членов регрессии по теории Фишера:.....	37

3.1.1.7 Итоговое уравнение регрессии: .....	38
3.1.1.8 Погрешность вычисления:.....	38
3.1.1.9 Выводы. ....	39
3.1.2 Решение «обратной» задачи .....	40
3.2 Рекомендации по возможности использования результатов НИР в реальном секторе экономики .....	42
Заключение .....	43
Список литературы .....	44
ПРИЛОЖЕНИЕ А (экспертное заключение, копия статьи, выписка из протокола заседания научно-технического совета о рассмотрении результатов поисковой научно-исследовательской работы). ....	45

## **ВВЕДЕНИЕ**

На 1-м этапе работ был проведён однофакторный эксперимент, с целью определения направления сварки с наиболее стабильным проплавлением и выявления параметров процесса, варьирование которых позволяет получить сварное соединение со сквозным проплавлением.

Результаты однофакторного эксперимента позволили отсеять «лишние» параметры сварки для дальнейшего проведения многофакторного эксперимента.

Многофакторный эксперимент, проведённый в рамках данного этапа, позволил выявить не только линейное влияние на механические свойства шва каждого из факторов, но также влияния парных и тройных взаимодействий. Математическая модель, построенная по результатам многофакторного эксперимента, позволила решить (по требуемому диапазону значений предела прочности) методом перебора решений «прямой» задачи «обратную» задачу с погрешностью до 7%.

# **1. Аннотированная справка по научным результатам НИР, полученным на I этапе**

В рамках предыдущего этапа были проведены исследования и наработана база данных по влиянию отдельных параметров лазерно-дуговой сварки (ЛДС) на механические свойства сварных соединений.

В ходе проведения однофакторного эксперимента были произведены сравнения 2-х процессов лазерно-дуговой сварки: лазерно-дуговая сварка с расположенным впереди лучом лазера и лазерно-дуговая сварка с расположенным впереди дуговым источником и сделаны следующие выводы:

1. в случае, когда лазер расположен впереди дуги, в процессе сварки наблюдается сильное разбрызгивание, связанное с нестабильным горением дуги, при этом получается шов удовлетворительного качества; в случае, когда дуга расположена впереди луча лазера, наблюдалось стабильное горение дуги, образуется шов хорошего качества;
2. исследования показали практически сходные зависимости механических свойств сварных соединений от параметров лазерно-дуговой сварки;
3. повышение мощности лазерного излучения при постоянной мощности дуги ведёт к повышению прочности и твёрдости металла шва и снижению ударной вязкости и относительного удлинения;
4. увеличение расстояния между источниками ведёт к снижению твёрдости и прочности шва и увеличению ударной вязкости и относительного удлинения;
5. повышение величины заглабления луча лазера относительно поверхностей свариваемых пластин также ведёт к снижению твёрдости и прочности и увеличению ударной вязкости и относительного удлинения металла сварного соединения;
6. низкий расход защитной смеси и смесь, состоящая из 70% и 90% Ar, ведут к дефектообразованию (подрезы, поры, трещины) шва, снижению твёрдости, прочности, ударной вязкости и относительного удлинения;
7. качественный шов (при визуальном исследовании) образовывался при защитной смеси, состоящей из 80%Ar и 20%CO<sub>2</sub>: наблюдалось стабильное горение дуги;

8. микрорентгеноспектральный анализ показал равномерное распределение химических элементов по сечению шва при втором способе сварки; при этом наименьшему выгоранию подвергается марганец, наибольшему – никель и кремний, однако, содержание этих элементов достаточно для стабилизации механических свойств шва.

Необходимо заметить, что лазерно-дуговой процесс с дугой, располагающейся впереди лазера, наиболее перспективен для дальнейшего исследования из-за большей стабильности.

В предыдущем этапе был проведён однофакторный эксперимент, с целью выделения наиболее значимых параметров для дальнейшего проведения многофакторного эксперимента. Многофакторный эксперимент позволит выявить не только линейное влияние на механические свойства шва каждого из факторов, но и влияния парных и тройных взаимодействий. Математическая модель, построенная по результатам многофакторного эксперимента, позволит решить «прямую» и «обратную» задачи.



## 2. Аналитический отчет о проведении экспериментальных исследований.

### 2.1 Выбор и обоснование оптимального варианта направления исследований

#### 2.1.1. Перечень экспериментов и исследований

Для проведения многофакторного эксперимента, основываясь на результатах предыдущих опытов необходимо выявить наиболее значимые факторы. Из таблицы 1 (таблица 27 отчёта по этапу №1) видно, что сквозное проплавление образуется при изменении мощности лазерного излучения, расстояния между источниками (от 0 до 4мм), диаметра присадочной проволоки, количественного состава и расхода смеси.

Таблица 1 - Результаты исследований механических свойств сварных соединений

№/f	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Не менее Y1''	Не менее Y2''	Не менее – не более Y3''	Не менее Y4''	Не менее Y5''
1	13,44	<b>13,00</b>	0	4	1,6	80-20	25	620	460	130 - 150	29	22
2	<b>13,44</b>	<b>13,44</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>1,6</b>	<b>80-20</b>	<b>25</b>	640	480	130 - 150	29	21
3	13,44	<b>14,00</b>	0	4	1,6	80-20	25	660	490	150 - 170	28	20
4	13,44	13,44	<b>2</b>	4	1,6	80-20	25	630	470	130 - 150	29	21
5	13,44	13,44	<b>4</b>	4	1,6	80-20	25	610	440	130 - 150	29	22
6	13,44	13,44	<b>6</b>	4	1,6	80-20	25	Несквозное проплавление				
7	13,44	13,44	<b>8</b>	4	1,6	80-20	25	Несквозное проплавление				
8	13,44	13,44	0	<b>0</b>	1,6	80-20	25	Несквозное проплавление				
9	13,44	13,44	0	<b>8</b>	1,6	80-20	25	630	460	130 - 150	29	21
10	13,44	13,44	0	<b>12</b>	1,6	80-20	25	Несквозное проплавление				
11	13,44	13,44	0	4	<b>1,2</b>	80-20	25	620	450	130 - 150	29	21
12	13,44	13,44	0	4	<b>2</b>	80-20	25	670	500	160 - 180	27	19
13	13,44	13,44	0	4	1,6	<b>90-10</b>	25	430	350	140 - 160	19	7
14	13,44	13,44	0	4	1,6	<b>70-30</b>	25	540	440	140 - 160	29	18
15	13,44	13,44	0	4	1,6	80-20	<b>22,5</b>	520	420	150 - 170	25	19
16	13,44	13,44	0	4	1,6	80-20	<b>20</b>	480	390	140 - 160	22	12

При изменении мощности лазерного излучения при постоянной скорости получаются процессы с различной погонной энергией. Если исходить из минимизации затрат энергии процесса, то целесообразно проводить дальнейшее исследование процесса лазерно-дуговой сварки с наименьшим значением погонной энергии. При изменении количества и состава защитной смеси образуются сварные соединения с дефектами, что затрудняет дальнейшее исследование. Таким образом,

из всех вышеперечисленных факторов для многофакторного эксперимента, наиболее подходящими являются диаметр присадочной проволоки и расстояние между источниками. Также на скорость охлаждения ванны расплава (соответственно и на механические свойства шва) большое влияние оказывает скорость сварки. Этот фактор также можно исследовать при сохранении постоянной погонной энергии.

Таким образом, для дальнейшего исследования будем использовать три фактора: скорость сварки, расстояние между источниками и диаметр проволоки.

### **2.1.2 Экспериментальное оборудование для сварки**

Эксперименты по лазерно-дуговой сварке выполняются на лазерно-дуговом технологическом комплексе (ЛДТК).

В состав ЛДТК входят:

1. комплекс лазерного оборудования;
2. комплекс дугового оборудования;
3. модуль лазерно-дуговой (рабочий инструмент);
4. блок подготовки и распределения газов;
5. система перемещения заготовки относительно рабочего инструмента (подвижный стол);
6. система управления.

#### **2.1.2.1 Комплекс лазерного оборудования**

Комплекс лазерного оборудования состоит из волоконного лазера ЛС-15, производитель – НТО “ИРЭ-Полус”, с выходным волоконным кабелем в комплекте, и чиллера Riedel PC250, рисунки 1 и 2.



Рисунок 1 - Волоконный лазер ЛС-15



Рисунок 2 – Чиллер Riedel PC250

Лазерная установка является источником мощного энергетического излучения, предназначенного для расплавления металла в процессе сварки.

Излучение транспортируется посредством выходного волоконного кабеля к оптической сварочной головке модуля лазерно-дугового YW50 фирмы Precitec (рабочий инструмент). Фокусное расстояние – 400 мм. Оптические характеристики волоконного лазера ЛС-15 приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Оптические характеристики

N	Характеристики	Условия измерения	Обозн.	Мин	Тип	Макс	Един
1	Режим работы			Непрерывный, квазинепрерывный			
2	Поляризация			Случайная			
3	Диапазон выходной мощности при стабильном режиме генерации	На выходе оптического коннектора	$P_{\text{вых}}$	1,5		15	кВт
4	Длина волны излучения		$\lambda_c$	1065	1070	1075	нм
5	Ширина линии излучения		$\Delta\lambda$		3	6	нм
6	Время включения/выключения	Максимум выходной мощности			80	100	мксек
7	Частота модуляции выходной мощности	Максимум выходной мощности				2,0	кГц
8	Нестабильность выходной мощности	При фиксированной температуре охлаждающей жидкости в течение 4 часов			$\pm 1.0$	$\pm 2.0$	%

### 2.1.2.2 Комплекс дугового оборудования

Подсистема «Комплекс дугового оборудования» предназначена для обеспечения требуемых металлургических и энергетических характеристик процесса сварки стальных конструкций специального назначения по гибридной (лазер-дуга) технологии. Сварка осуществляется прямолинейными стыковыми швами в нижнем пространственном положении.

В состав подсистемы входят:

1. источник питания сварочной дуги: ВДУ 506-ДК;
2. сварочная горелка;
3. механизм подачи проволоки: ПДГО-511;
4. канал подачи проволоки;
5. механизм правки проволоки;
6. катушка с проволокой и устройство ее крепления;
7. устройство подачи защитного газа;

8. газовые баллоны: с газами Ar и CO<sub>2</sub>;
9. газовые редукторы;
10. газовый смеситель;
11. соединительные провода, кабели и шланги;
12. командное устройство сопряжения с системой управления.

На рисунке 3 показана схема дугового модуля.

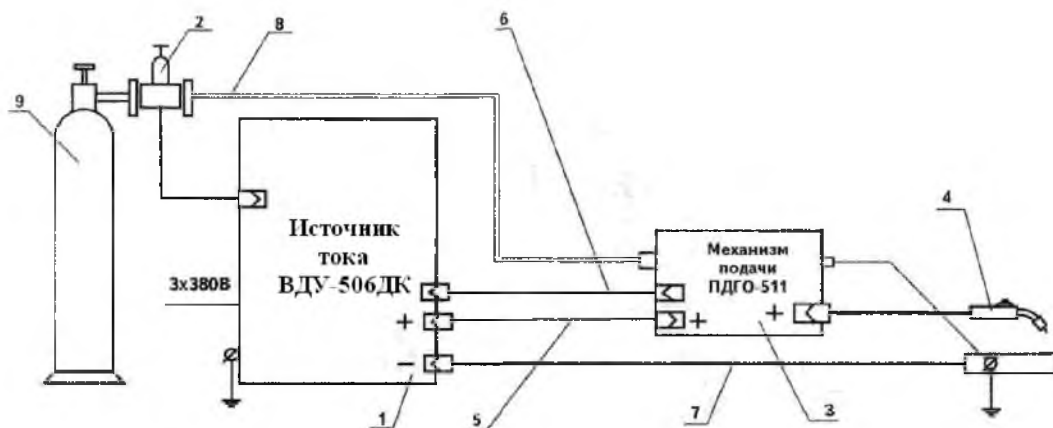


Рисунок 3 - Общая схема дугового модуля

1 – источник питания сварочной дуги; 2 - редуктор газовый; 3 - механизм подачи проволоки; 4 – сварочная горелка; 5 - кабель сварочный «+» (КГ1х70); 6 - кабель управления; 7 - кабель сварочный «-» (КГ1х70); 8 - шланг газовый; 9 - газовый баллон.

Ниже приведены технические характеристики основных составляющих комплекса дугового оборудования.

#### Источник питания сварочной дуги

Экспериментальная установка укомплектована источником питания дуги ВДУ-506ДК (рисунок 4), производства фирмы «ИТС». Технические характеристики источника ВДУ – 506ДК приведены в таблицы 3.



Рисунок 4 - Источник питания дуги ВДУ-1500 DC

Таблица 3 - Технические характеристики ВДУ-1500 DC

Наименование параметра для положения переключателя режимов	Значение
Напряжение питающей сети, В	$3 \times 380 \pm 10\%$
Частота питающей сети, Гц	$50 \pm 1$
Род тока	Постоянный
Номинальный сварочный ток, при ПН=100% и длительности цикла 10 мин., А	1200
Пределы регулирования сварочного тока, А	250 - 1500
Рабочее напряжение на дуге, В	20 - 80
Напряжение холостого хода, В, не более	90
Первичный ток при номинальном сварочном токе, А, не более	60
Потребляемая мощность, кВА, не более	100
Габаритные размеры, мм	950×650×1400
Масса, кг, не более	350

Данный источник питания обеспечивает в режиме MIG-MAG (плавящийся электрод в среде инертного или активного защитного газа) требуемые значения наклона внешней характеристики. В диапазоне токов сварки 300...400 А, при ПН = 100% и напряжении 29...30 В может быть достигнута эффективная тепловая мощность дугового источника 6500...9000 Вт.

#### Механизм подачи проволоки

В комплекс дугового оборудования входит подающий механизм – ПДГО-601, рисунок 5.



Рисунок 5 – Подающий механизм ПДГО-601

ПДГО-601 подающий механизм закрытого типа. Внутри установлен 6 роликовый редукторный привод, кассета для сварочной проволоки, тормозное устройство, плата управления и электромагнитный клапан. На панели механизма имеются резисторы регулировки скорости подачи сварочной проволоки и напряжения, технологических временных интервалов. Технические характеристики подающего устройства приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Технические характеристики ПДГО-601

Напряжение питания переменным током схемы управления и привода, В	~27
Номинальный сварочный ток при ПВ=60% и длительности цикла 10 мин., А	630
Диаметр проволоки, мм	1,2-2,0 сплошная, 1,2-3,2 порошковая
Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	60-820
Регулировка времени, с:	
- предварительная продувка газа	0,2...10
- продувка газа после сварки	0,2...10
- задержка отключения источника (вылет проволоки)	0,1...0,2
- нарастания скорости подачи проволоки от минимального до установленного значения ("мягкий старт")	0,5...4,0
Количество пар подающих роликов	3
Масса, кг, не более	18
Габаритные размеры, мм,	640x240x420

Подающее устройство работает от внешнего блока питания БП-02, рисунок 6.



Рисунок 6 – Блок питания БП-02 подающего устройства ПДГО-601

Блок питания БП-02 предназначен для преобразования сетевого напряжения 380В 50Гц в постоянное напряжение, необходимое для питания подающего механизма сварочного полуавтомата, и индикации параметров сварочного процесса. В таблице 5 представлены технические характеристики блока питания.

Таблица 5 – Технические характеристики БП-02

Напряжение питающей сети, В	2x380
Частота питающей сети, Гц	50
Потребляемая мощность блока с полуавтоматом, не более, Вт	250
Выпрямленное напряжение на выходе блока, В	24
Расстояние между источником и блоком, не более, м	3
Масса, не более, кг	11
Габаритные размеры, не более, мм	320x230x265

Подающее устройство имеет систему охлаждения, осуществляемую посредством автономного блока водяного охлаждения БВА-02, рисунок 7.





Рисунок 7 – Автономный блок водоохлаждения БВА-02

БВА-02 предназначен для обеспечения охлаждения и циркуляции рабочей жидкости, используемой для охлаждения водоохлаждаемых горелок для аргодуговой и полуавтоматической сварки. В качестве охлаждающей жидкости используется дистиллированная вода или специальная жидкость по рекомендации завода-изготовителя горелок. В таблице 6 показаны технические характеристики устройства.

Таблица 6 – Технические характеристики блока водяного охлаждения БВА-02

Напряжение питающей сети, В	1x220
Частота питающей сети, Гц	50
Объем бака для охлаждающей жидкости, л	10
Объем охлаждающей жидкости, прокачиваемой через горелку, не менее л/мин	1,05
Максимальный напор, не менее, м	35
Потребляемая мощность, кВт, не более	0.37
Масса, кг	17.5
Габаритные размеры, длина/ширина/высота, мм	400/358/393

### Сварочная горелка

Горелка предназначена для полуавтоматической дуговой сварки в среде защитных газов. В экспериментах использовалась сварочная горелка с водяным охлаждением. Схема горелки показана на рисунке 8, на рисунке 9 горелка в составе рабочего инструмента.

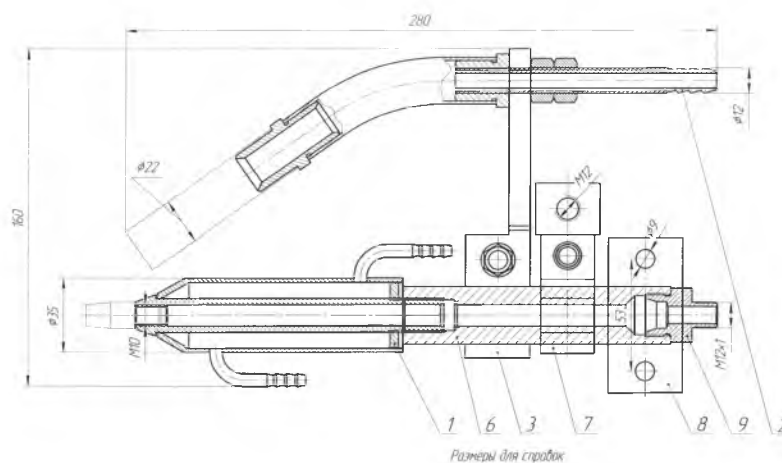


Рисунок 8 - Горелка для автоматической сварки в среде защитных газов:

1 – водяное охлаждение, 2 – мундштук подачи защитного газа, 3 – изолятор, 6 – корпус, 7 – крепление токоподвода, 8 – изолирующее крепление, 9 – вход сварочной проволоки



Рисунок 9 – Горелка в составе рабочего инструмента

### 2.1.2.3 Модуль лазерно-дуговой (рабочий инструмент)

Модуль лазерно-дуговой (рисунок 10) предназначен для работы в составе технологических комплексов для гибридной лазерно-дуговой сварки металлов больших толщин.

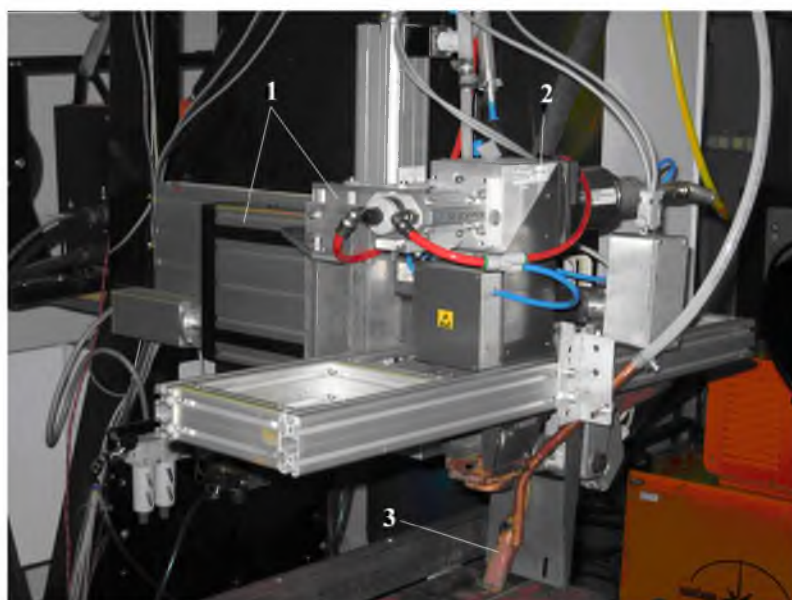


Рисунок 10 – Рабочий инструмент лазерно-дугового модуля:

1 - система перемещения рабочего инструмента относительно заготовки; 2 - лазерная сварочная головка; 3 - дуговая горелка.

Модуль обеспечивает подвод лазерного излучения и дуги в зону сварки и их взаимную ориентацию.

#### 2.1.2.4 Блок подготовки и распределения газов

Блок подготовки и распределения газов обеспечивает очистку и подачу рабочих и защитных газов с требуемыми параметрами в лазерную сварочную головку и дуговую горелку.

Блок (рисунок 11) обеспечивает измерение, выбор, установку, контроль и поддержание необходимых давлений и расходов газов во время сварочного цикла.



Рисунок 11 - Блок подготовки и распределения газов

В состав блока входят:

1. фильтры очистки;
2. регуляторы давления и расхода газов;
3. реле давления;
4. пневмодрессели;
5. пневмоклапаны электромагнитные;
6. показывающие приборы.

#### 2.1.2.5 Система перемещения заготовки относительно рабочего инструмента

В качестве системы перемещения выступает сварочный стол, собранный из отдельных профилей. Стол имеет продольную и поперечную подачу. Направление и скорость подачи задаются с помощью системы управления, рисунок 12.



Рисунок 12 - Система перемещения заготовки относительно рабочего инструмента

#### 2.1.2.6 Управление ЛДТК

ЛДТК управляется с помощью системы управления, рисунок 13.



Рисунок 13 – Стойка управления

Благодаря программному обеспечению, разработанному в Институте лазерных и сварочных технологий, параметры сварки заданные перед процессом, поддерживаются постоянными до его окончания.

В циклограмму внесены корректировки учитывающие:

- время выхода лазера на расчетную мощность;
- инерционность механизма движения изделия.

На рисунках 14 и 15 изображены окна систем, контролирующих процесс сварки и состояние лазерного источника.

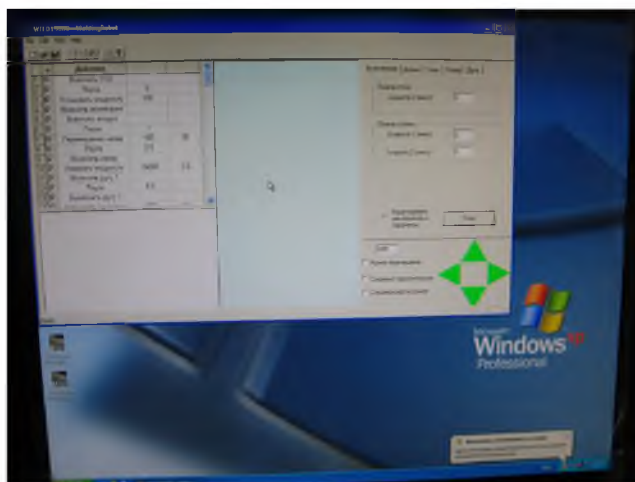


Рисунок 14 – Система контроля за процессом сварки



Рисунок 15 - Интерфейс системы, контролирующей состояние лазерного источника в процессе сварки

### 2.1.3 Оборудование для исследования механических свойств швов

Исследования механических свойств сварных соединений проводятся в лаборатории «Исследование и моделирование структуры и свойств металлических материалов» на базе СПбГПУ, рисунок 16.



Рисунок 16 - Лаборатория «Исследование и моделирование структуры и свойств металлических материалов»

С целью получения достоверных результатов из сваренных пластин со сквозным проплавлением необходимо изготовить шлифы для определения структуры, химического состава и микротвёрдости шва по сечению. Также изготавливаются образцы для испытаний на ударную вязкость шва, предела прочности на растяжение, предела текучести и относительного удлинения. Для проведения комплекса исследований применяется следующее оборудование:

1. система шлифподготовки и резки образцов фирмы BUEHLER;
2. микротвердомер MicroMet 5103;
3. универсальный микроскоп;
4. компактный искровой оптико-эмиссионный спектрометр в комплекте;
5. испытательная машина Zwick Z050;
6. маятниковый копер.

#### 2.1.3.1 Система шлифподготовки и резки образцов фирмы **BUEHLER**

Предназначена для получения микро и макрошлифов для дальнейшего количественного определения структуры, микротвёрдости и химического состава металла шва.

### 2.1.3.2 Микротвердомер MicroMet 5103

Микротвердомер (рисунок 17) применяется для измерения микротвердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса в соответствии с ГОСТ 9450. Диапазон измерений твердости по шкале Виккерса, HV 50 – 1200. Погрешность  $\pm 3$  –  $\pm 60$  HV.



Рисунок 17 – Микротвёрдомер MicroMet 5103

### 2.1.3.3 Универсальный микроскоп

Для исследования микроструктуры металла шва используется световой оптический микроскоп Observer фирмы Carl Zeiss, рисунок 18. В таблице 7 приведены технические характеристики микроскопа.



Рисунок 18 – Световой оптический микроскоп Observer фирмы Carl Zeiss

Таблица 7 – Технические характеристики микроскопа Observer

Увеличение микроскопа	50x - 1000x
Увеличение объективов	5x, 10x, 20x, 50x, 100x
Увеличение окуляров и поле зрения	W-PL 10x/23мм
Револьвер для крепления объективов	6-и позиционный
Револьвер для смены рефлекторов	6-и позиционный быстросъемный
Осветитель штатный	HAL 12В/100Вт
Осветитель (опционально) с внешним БП	ХВО 75Вт (ксенон)
Видео/Фото выход	переднее/верхнее/левое/правое расположение
Габаритные размеры ГхВхШ, мм	831x425x294
Масса, кг	27

#### 2.1.3.4 Компактный искомый оптико-эмиссионный спектрометр в комплекте

Установка предназначена для определения химического состава металла. При сварке металлов больших толщин одним из условий качественного сквозного сварного соединения является равномерное распределение химических элементов. Данные исследования проводятся выборочно.

#### 2.1.3.5 Испытательная машина Zwick Z050

Предназначена для измерений силы при испытании материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Определяет пределы упругости, текучести и прочности, относительное удлинение после разрыва, а также поперечные деформации. Максимальное усилие растяжения — 50 кН, рисунок 19.



Рисунок 19 - Испытательная машина Zwick Z050

#### 2.1.3.6 Маятниковый копер РКР-450

Маятниковый копер РКР-450 фирмы Zwick с максимальной энергией удара 450 Дж предназначен для проведения испытаний на ударную вязкость при температурах от +200°C до – 90°C по международным стандартам Шарпи и Изод, а также испытаний на ударное растяжение и по Бруггеру, рисунок 20.





Рисунок 20 - Маятниковый копёр RKP-450 фирмы Zwick

#### **2.1.4 Вывод**

Количественную зависимость механических свойств металла шва от параметров сварки позволят определить эксперименты. Результаты экспериментов напрямую зависят от исследователя и используемого оборудования. При экспериментах по лазерно-дуговой сварке и исследовании механических свойств сварных соединений используется самое современное оборудование, что позволяет надеяться на качественные эксперименты и получение достоверных и точных результатов, соответствующих мировому уровню.

## 2.2. План проведения экспериментальных исследований

Важную роль в получении достоверных результатов играет план экспериментов.

Число опытов в плане зависит от количества факторов и их уровней. Основной задачей добросовестного исследователя является определение оптимального количества (с позиции себестоимости и качества) и уровней варьирования факторов.

Для решения «прямой» и «обратной» задач строится математическая модель по результатам плана эксперимента типа  $2^k$ . Ниже приведена модель регрессии, позволяющая определить линейное влияние на механические свойства сварного соединения как каждого из факторов в отдельности, так и их двойного и тройного взаимодействия:

$$a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_1X_2 + a_5X_1X_3 + a_6X_2X_3 + a_7X_1X_2X_3 = Y_1 \dots Y_3,$$

где  $a_0 \dots a_7$  – коэффициенты уравнения;

$X_1$  – расстояние между источниками, (диапазон варьирования 0, 2, 4 мм);

$X_2$  – диаметр присадочной проволоки, (диапазон варьирования 1,2; 1,6; 2,0 мм);

$X_3$  – скорость сварки, (диапазон варьирования 30, 35, 40 мм/с);

$Y_1$  – предел прочности на разрыв, МПа;

$Y_2$  – средняя микротвёрдость шва, HV;

$Y_3$  – ударная вязкость, KCV.

Эксперимент состоит из 2-х серий опытов: в крайних точках и в центре эксперимента (таблицы 8 и 9 соответственно).

Таблица 8 – Проведение эксперимента в крайних точках:

№	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	1	+	+	+
2	1	-	+	+
3	1	+	-	+
4	1	-	-	+
5	1	+	+	-
6	1	-	+	-
7	1	+	-	-
8	1	-	-	-

Таблица 9 – Проведение эксперимента в центральной точке.

№	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	+	0	0	0
2	+	0	0	0
3	+	0	0	0
4	+	0	0	0
5	+	0	0	0
6	+	0	0	0

«+» соответствует верхнему крайнему пределу; «-» - нижнему.

В крайних точках эксперимента проводилось по одному опыту. В центре – 6 опытов, так как на эти опыты ложится двойная нагрузка:

1. оценка адекватности модели;
2. определение малозначимых членов регрессии.

Таким образом, для решения уравнения регрессии был выбран план эксперимента с наименьшим количеством опытов - 14.

## 2.3. Экспериментальные исследования

### 2.3.1 Оборудование и материалы

В экспериментах по лазерно-дуговой сварке использовался выше описанный ЛДТК.

В качестве сварочных материалов в рассматриваемом процессе использовались защитные газы и сварочные проволоки.

Для защиты сварочной ванны и металла шва была использована сварочная смесь из аргона и двуокиси углерода. Газы удовлетворяли требованиям:

- аргон чистый, марки А ГОСТ 10157, содержание влаги не более  $0,03\text{г/м}^3$ , содержание кислорода не более  $0,003\%$ , азота не более  $0,01\%$ ;
- двуокись углерода сжиженная, сварочная, I сорт по ГОСТ 8050 с содержанием водяных паров при нормальных условиях ( $760\text{ мм.рт.ст.}$  и  $20^\circ\text{C}$ ) не более  $0,178\text{ г/мм}^3$ .

Расстояние от коаксиальной защитной форсунки газа до листа  $6,0\text{ мм}$ .

Сварочная проволока сплошного сечения удовлетворяет требованиям ГОСТ 2246. Проволока не имела на поверхности следов ржавчины и влаги; хранилась в герметичной упаковке, исключающей попадание влаги.

Сварочные материалы содержали минимальное количество кислорода.

В качестве сварочных материалов применялась проволока Св-08Г2С, диаметром  $1,2\text{ мм}$ ,  $1,6\text{ мм}$  и  $2,0\text{ мм}$ . В таблицах 10 и 11 показан химический состав основного и присадочного материалов.

Таблица 10 – Химический состав стали 09Г2ФБЮ

Массовая доля химических элементов, в пределах или не более %														
C	Si	Mn	P max	S max	Nb	V	Nb	Al	Ti	N max	Cr max	Ni max	Cu max	Ca max
0,09- 0,12	0,15- 0,50	1,55- 1,75	0,02	0,006	1,0 - 1,5	0,08- 0,12	0,02- 0,05	0,02- 0,05	0,010- 0,035	0,01	0,3	0,3	0,3	0,001- 0,020

Таблица 11 – Химический состав присадочной проволоки Св-08Г2С

Массовая доля химических элементов, в пределах или не более %											
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	S	P	Mo	As	Al	N
0,05 -0,11	1,80 -2,10	0,70 -0,95	0,20	0,25	0,20	0,010	0,015	0,15	0,08	-	0,008

Кромки свариваемых пластин были зачищены до металлического блеска для удаления грязи, масла и ржавчины на ширине не менее 10 мм от стыка.

Сборка листов под сварку производилась с применением сборочных приспособлений.

Размеры и расстояния между прихватками: через каждые 200 мм длиной 10...15 мм, но не менее трех. Прихватки выполнялись на тех же режимах и по той же технологии, что и сварка. При сварке основного шва прихватки были полностью переплавлены. Сварка производилась при комнатной температуре.

В таблице 12 приведены режимы сварки.

Таблица 12 – Режимы сварки

Параметры сварки	Значение
Мощность лазерного излучения, кВт	12...15
Мощность дуги, кВт	10,5...14
Скорость сварки, мм/с	30...40
Ток дуги, А	400...550
Напряжение, В	25,5
Диаметр электрода, мм	1,2; 1,6; 2,0
Расстояние между источниками, мм	0, 2, 4
Состав защитной смеси	20%Ar - 80%CO <sub>2</sub>
Расход защитной смеси, л/мин	25
Тип соединения	Стыковой
Положение сварки	Горизонтальное

### 2.3.2 Методика проведения испытаний сварного соединения на статическое растяжение

- При испытании прочности металла шва в стыковом соединении определяют его временное сопротивление.

- Толщина образца, рисунок 21, равняется толщине основного металла.

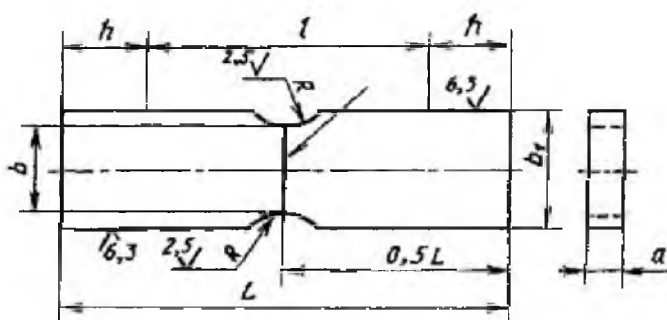


Рисунок 21 – Чертеж заготовки

- Образцы вырезают из контрольных образцов плазменной резкой с припуском 3 мм на механическую обработку.
- Форма и размеры плоского образца соответствуют чертежу на рисунке 21 и таблице 13.

Таблица 13 – Размеры образца

Толщина основного металла, а, мм	Ширина захватной части образца, b <sub>1</sub> , мм	Ширина рабочей части образца b±0,5 мм	Радиус закругления, R, мм	Длина рабочей части образца, l, мм	Общая длина образца L, мм
10 - 25	38	25	20±2	70	190

- Шероховатость поверхности после обработки более толстого элемента должна быть не более 6,3 мкм.
- Утолщение шва должно быть снято механическим способом до уровня основного металла. При удалении утолщения разрешается снимать основной металл по всей поверхности образца на глубину до 15 % от толщины металла
- Временное сопротивление  $\sigma_B$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>), определяют по формуле

$$\sigma_B = k \frac{P}{F}$$

где  $k$  - поправочный коэффициент;

$P$  - максимальное усилие, Н (кгс);

$F$  - площадь поперечного сечения образца в наименьшем сечении до испытания, мм<sup>2</sup>.

Испытания сварного соединения на статическое растяжение проводились согласно ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств» и ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

Испытания сварного соединения на ударный изгиб, определение твёрдости сварного соединения также проводились согласно ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств».

### 2.3.3 Результаты эксперимента

С целью получения качественного сварного соединения была выполнена разделка с притуплением 6 мм, углом  $5^{\circ}$ . Пластины сваривались без зазора. Результаты лазерно-дуговой сварки сведены в таблицу 14 и 15.

Таблица 14 – Результаты эксперимента в крайних точках

№/f	X0	X1	X2	X3	Не менее Y1	Не менее Y2	Не менее Y3
1	1	+	+	+	620	145	27
2	1	-	+	+	630	142	21
3	1	+	-	+	660	158	15
4	1	-	-	+	630	140	22
5	1	+	+	-	620	137	25
6	1	-	+	-	600	121	46
7	1	+	-	-	610	127	35
8	1	-	-	-	620	140	29

Таблица 15 – Опыты в центре эксперимента

№/f	X0	X1	X2	X3	Не менее Y1	Не менее Y2	Не менее Y3
1	1	0	0	0	620	142	29
2	1	0	0	0	625	144	24
3	1	0	0	0	620	135	25
4	1	0	0	0	630	133	22
5	1	0	0	0	610	137	30
6	1	0	0	0	610	135	28

### 2.3.4 Выводы

В данной главе описаны методика механических испытаний и результаты испытаний, позволяющие решить «прямую» и «обратную» задачи.

### 3. Отчет по обобщению и оценке результатов исследований

#### 3.1 Модель, позволяющая увеличить объем знаний для более глубокого понимания изучаемого предмета исследования новых явлений, механизмов или закономерностей

##### 3.1.1 Решение «прямой» задачи

Целью «прямой» задачи является нахождение механических свойств сварного соединения по известным параметрам сварки. Программа для расчёта «прямой» задачи составлена в системе компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования Mathcad 14. Задача была решена для предела прочности, ударной вязкости и среднего значения микротвёрдости шва. Решение задачи проводится по методике, описанной в [1-6]. В качестве примера решения «прямой» задачи ниже приведена методика расчёта для определения предела прочности. Аналогичным образом были решены «прямые» задачи по нахождению среднего значения микротвёрдости и ударной вязкости.

##### 3.1.1.1 Перенос осей координат в центр эксперимента:

$$i := 1..2,$$

$$x1_i :=$$

0
4

$$j := 1..2,$$

$$x2_j :=$$

1.2
2.0

$$k := 1..2$$

$$x3_k :=$$

30
40

$x1_i$  – расстояние между источниками, мм;

$x2_j$  – диаметр проволоки, мм;

$x3_k$  – скорость сварки, мм/с.

$$\Delta x1 := x1_2 - x1_1$$

$$\Delta x1 = 4$$

$$\Delta x2 := x2_2 - x2_1$$

$$\Delta x2 = 0.8$$

$$\Delta x3 := x3_2 - x3_1$$

$$\Delta x3 = 10$$

$$d1_i := \frac{x1_i - 0.5(x1_2 + x1_1)}{0.5\Delta x1}$$

$$d2_j := \frac{x2_j - 0.5(x2_2 + x2_1)}{0.5\Delta x2}$$

$$d3_k := \frac{x3_k - 0.5(x3_2 + x3_1)}{0.5\Delta x3}$$

(1)



$$d1_i =$$

-1
1

$$d2_j =$$

-1
1

$$d3_k =$$

-1
1

### 3.1.1.2 Составление ортогонального плана эксперимента:

$$N_u := 8$$

$$u := 1..N$$

$$x0_u :=$$

1
1
1
1
1
1
1
1

$$x1_u :=$$

1
-1
1
-1
1
-1
1
-1

$$x2_u :=$$

1
1
-1
-1
1
1
-1
-1

$$x3_u :=$$

1
1
1
1
-1
-1
-1
-1

$$y_u :=$$

632
637
644
630
593
582
587
585

$$x4_u := x1_u \cdot x2_u$$

$$x4_u =$$

1
-1
-1
1
1
-1
-1
1

$$x5_u := x1_u \cdot x3_u$$

$$x5_u =$$

1
-1
1
-1
-1
1
-1
1

$$x6_u := x2_u \cdot x3_u$$

$$x6_u =$$

1
1
-1
-1
-1
-1
1
1

$$x7_u := x1_u \cdot x2_u \cdot x3_u$$

$$x7_u =$$

1
-1
-1
1
-1
1
1
-1

### 3.1.1.3 Составление матрицы нормализованных уравнений для левой части уравнений регрессии:

$$X := \begin{pmatrix} \sum_{u=1}^N (x_{0u} \cdot x_{0u}) & \sum_{u=1}^N (x_{0u} \cdot x_{1u}) & \sum_{u=1}^N (x_{0u} \cdot x_{2u}) & \sum_{u=1}^N (x_{0u} \cdot x_{3u}) & \sum_{u=1}^N (x_{0u} \cdot x_{4u}) & \sum_{u=1}^N (x_{0u} \cdot x_{5u}) & \sum_{u=1}^N (x_{0u} \cdot x_{6u}) & \sum_{u=1}^N (x_{0u} \cdot x_{7u}) \\ \sum_{u=1}^N (x_{1u} \cdot x_{0u}) & \sum_{u=1}^N (x_{1u} \cdot x_{1u}) & \sum_{u=1}^N (x_{1u} \cdot x_{2u}) & \sum_{u=1}^N (x_{1u} \cdot x_{3u}) & \sum_{u=1}^N (x_{1u} \cdot x_{4u}) & \sum_{u=1}^N (x_{1u} \cdot x_{5u}) & \sum_{u=1}^N (x_{1u} \cdot x_{6u}) & \sum_{u=1}^N (x_{1u} \cdot x_{7u}) \\ \sum_{u=1}^N (x_{2u} \cdot x_{0u}) & \sum_{u=1}^N (x_{2u} \cdot x_{1u}) & \sum_{u=1}^N (x_{2u} \cdot x_{2u}) & \sum_{u=1}^N (x_{2u} \cdot x_{3u}) & \sum_{u=1}^N (x_{2u} \cdot x_{4u}) & \sum_{u=1}^N (x_{2u} \cdot x_{5u}) & \sum_{u=1}^N (x_{2u} \cdot x_{6u}) & \sum_{u=1}^N (x_{2u} \cdot x_{7u}) \\ \sum_{u=1}^N (x_{3u} \cdot x_{0u}) & \sum_{u=1}^N (x_{3u} \cdot x_{1u}) & \sum_{u=1}^N (x_{3u} \cdot x_{2u}) & \sum_{u=1}^N (x_{3u} \cdot x_{3u}) & \sum_{u=1}^N (x_{3u} \cdot x_{4u}) & \sum_{u=1}^N (x_{3u} \cdot x_{5u}) & \sum_{u=1}^N (x_{3u} \cdot x_{6u}) & \sum_{u=1}^N (x_{3u} \cdot x_{7u}) \\ \sum_{u=1}^N (x_{4u} \cdot x_{0u}) & \sum_{u=1}^N (x_{4u} \cdot x_{1u}) & \sum_{u=1}^N (x_{4u} \cdot x_{2u}) & \sum_{u=1}^N (x_{4u} \cdot x_{3u}) & \sum_{u=1}^N (x_{4u} \cdot x_{4u}) & \sum_{u=1}^N (x_{4u} \cdot x_{5u}) & \sum_{u=1}^N (x_{4u} \cdot x_{6u}) & \sum_{u=1}^N (x_{4u} \cdot x_{7u}) \\ \sum_{u=1}^N (x_{5u} \cdot x_{0u}) & \sum_{u=1}^N (x_{5u} \cdot x_{1u}) & \sum_{u=1}^N (x_{5u} \cdot x_{2u}) & \sum_{u=1}^N (x_{5u} \cdot x_{3u}) & \sum_{u=1}^N (x_{5u} \cdot x_{4u}) & \sum_{u=1}^N (x_{5u} \cdot x_{5u}) & \sum_{u=1}^N (x_{5u} \cdot x_{6u}) & \sum_{u=1}^N (x_{5u} \cdot x_{7u}) \\ \sum_{u=1}^N (x_{6u} \cdot x_{0u}) & \sum_{u=1}^N (x_{6u} \cdot x_{1u}) & \sum_{u=1}^N (x_{6u} \cdot x_{2u}) & \sum_{u=1}^N (x_{6u} \cdot x_{3u}) & \sum_{u=1}^N (x_{6u} \cdot x_{4u}) & \sum_{u=1}^N (x_{6u} \cdot x_{5u}) & \sum_{u=1}^N (x_{6u} \cdot x_{6u}) & \sum_{u=1}^N (x_{6u} \cdot x_{7u}) \\ \sum_{u=1}^N (x_{7u} \cdot x_{0u}) & \sum_{u=1}^N (x_{7u} \cdot x_{1u}) & \sum_{u=1}^N (x_{7u} \cdot x_{2u}) & \sum_{u=1}^N (x_{7u} \cdot x_{3u}) & \sum_{u=1}^N (x_{7u} \cdot x_{4u}) & \sum_{u=1}^N (x_{7u} \cdot x_{5u}) & \sum_{u=1}^N (x_{7u} \cdot x_{6u}) & \sum_{u=1}^N (x_{7u} \cdot x_{7u}) \end{pmatrix}$$

Результат расчёта матрицы нормализованных уравнений для левой части уравнений регрессии:

$$X = \begin{pmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{pmatrix}$$

Обратная матрица нормализованных уравнений для левой части уравнений регрессии:

$$X^{-1} = \begin{pmatrix} 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 \end{pmatrix}$$

Матрица нормализованных уравнений для правой части уравнений регрессии:

$$Y := \begin{pmatrix} \sum_{u=1}^N (x_{0u} \cdot y_u) \\ \sum_{u=1}^N (x_{1u} \cdot y_u) \\ \sum_{u=1}^N (x_{2u} \cdot y_u) \\ \sum_{u=1}^N (x_{3u} \cdot y_u) \\ \sum_{u=1}^N (x_{4u} \cdot y_u) \\ \sum_{u=1}^N (x_{5u} \cdot y_u) \\ \sum_{u=1}^N (x_{6u} \cdot y_u) \\ \sum_{u=1}^N (x_{7u} \cdot y_u) \end{pmatrix}$$

Результат расчёта матрицы нормализованных уравнений для правой части уравнений регрессии:

$$Y = \begin{pmatrix} 4.89 \times 10^3 \\ 22 \\ -2 \\ 196 \\ -10 \\ -4 \\ -8 \\ -28 \end{pmatrix}$$

$$A := X^{-1} \cdot Y$$

(2)

$$A = \begin{pmatrix} 611.25 \\ 2.75 \\ -0.25 \\ 24.5 \\ -1.25 \\ -0.5 \\ -1 \\ -3.5 \end{pmatrix}$$

Уравнение регрессии:

$N := 8$

$u := 1..N$

$x0_u :=$

1
1
1
1
1
1
1
1

$x1_u :=$

4
0
4
0
4
0
4
0

$x2_u :=$

2.0
2.0
1.2
1.2
2.0
2.0
1.2
1.2

$x3_u :=$

40
40
40
40
30
30
30
30

$$611.25 + 2.75 \cdot \frac{x1_u - 2}{2} - 0.25 \cdot \frac{x2_u - 1.6}{0.4} + 24.5 \cdot \frac{x3_u - 35}{5} - 1.25 \cdot \frac{x1_u - 2}{2} \cdot \frac{x2_u - 1.6}{0.4} - 0.5 \cdot \frac{x1_u - 2}{2} \cdot \frac{x3_u - 35}{5} - 1.0 \cdot \frac{x2_u - 1.6}{0.4} \cdot \frac{x3_u - 35}{5} - 3.5 \cdot \frac{x1_u - 2}{2} \cdot \frac{x2_u - 1.6}{0.4} \cdot \frac{x3_u - 35}{5}$$

632
637
644
630
593
582
587
585

3.1.1.4 Проведение 2-й серии экспериментов:

$M := 6$

$k := 1..M$

$P_k :=$

607
606
610
607
601
611

3.1.1.5 Определение ошибки воспроизводимости по критерию Фишера:

Сумма результатов:

$$\sum_{k=1}^6 P_k = 4 \times 10^3 \quad (3)$$

Среднее значение:

$$P_{\text{нб}} := \frac{\sum_{k=1}^6 P_k}{M} \quad (4)$$

$P_{\text{н0}} = 607$

Доверительный интервал:

$$SS := \sum_{k=1}^M (P_k)^2 - \frac{1}{M} \left( \sum_{k=1}^M P_k \right)^2 \quad (5)$$

$SS = 62$

$tp := 2.57$

$$\Delta S := tp \cdot \left[ \frac{SS}{(M-1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$\Delta S = 22.17$

Уравнение адекватно, т.к.  $a_0$  попадает в допуск  $\Delta S$  ( $P_{\text{ср}} + \Delta S = 629.17$ ;  $a_0 = 611.25$ )

### 3.1.1.6 Проверка значимости членов регрессии по теории Фишера:

$$611.25 + 2.75 \cdot \frac{x_u^1 - 2}{2} - 0.25 \cdot \frac{x_u^2 - 1.6}{0.4} + 24.5 \cdot \frac{x_u^3 - 35}{5} - 1.25 \cdot \frac{x_u^1 - 2}{2} \cdot \frac{x_u^2 - 1.6}{0.4} - 0.5 \cdot \frac{x_u^1 - 2}{2} \cdot \frac{x_u^3 - 35}{5} - 1.0 \cdot \frac{x_u^2 - 1.6}{0.4} \cdot \frac{x_u^3 - 35}{5} - 3.5 \cdot \frac{x_u^1 - 2}{2} \cdot \frac{x_u^2 - 1.6}{0.4} \cdot \frac{x_u^3 - 35}{5}$$

$$Fa_1 := \frac{8 \cdot \frac{2.75^2}{1}}{\frac{SS}{(M-1)}} \quad Fa_2 := \frac{8 \cdot \frac{(-0.25)^2}{1}}{\frac{SS}{(M-1)}} \quad Fa_4 := \frac{8 \cdot \frac{(-1.25)^2}{1}}{\frac{SS}{(M-1)}} \quad Fa_5 := \frac{8 \cdot \frac{(-0.5)^2}{1}}{\frac{SS}{(M-1)}} \quad Fa_6 := \frac{8 \cdot \frac{(-1.0)^2}{1}}{\frac{SS}{(M-1)}} \quad Fa_7 := \frac{8 \cdot \frac{(-3.5)^2}{1}}{\frac{SS}{(M-1)}}$$

$Fa_1 = 4.88$

$Fa_2 = 0.04$

$Fa_4 = 1.01$

$Fa_5 = 0.16$

$Fa_6 = 0.65$

$Fa_7 = 7.9$

$F_0 := 6.6$

$Fa_1, Fa_2, Fa_4, Fa_5, Fa_6$  - малозначимые члены регрессии, которыми можно пренебречь.

Подсчитаем общий вклад малозначимых членов в уравнение ( $F_{T(0,95,5,5)} = 5.1$ ):

$a_1 := 611.25 \quad a_2 := 24.5 \quad a_3 := -3.5$

$$SS_{\text{и0}} := \sum_{u=1}^8 (y_u)^2 - 8 \cdot \sum_{r=1}^3 (a_r)^2 \quad (8)$$

$SS_{\text{и0}} = 83.5$

$$F_{\text{и0}} := \frac{\frac{SS_{\text{и0}}}{5}}{\frac{SS}{5}} \quad (9)$$

$F_{\text{и0}} = 1.3$

$F_{ot} < F_t$ , поэтому общий вклад малозначимых членов незначим и данные члены регрессии можно отбросить из уравнения.

### 3.1.1.7 Итоговое уравнение регрессии:

$$N := 8$$

$$u := 1..N$$

$$x0_u :=$$

$$x1_u :=$$

$$x2_u :=$$

$$x3_u :=$$

1
1
1
1
1
1
1
1

4
0
4
0
4
0
4
0

1.2
1.2
2.0
2.0
1.2
1.2
2.0
2.0

40
40
40
40
30
30
30
30

$$611.25 + 24.5 \cdot \frac{x3_u - 35}{5} - 3.5 \cdot \frac{x1_u - 2}{2} \cdot \frac{x2_u - 1.6}{0.4} \cdot \frac{x3_u - 35}{5}$$

639
632
632
639
583
590
590
583

(10)

### 3.1.1.8 Погрешность вычисления:

$$\sigma_u := 611.25 + 24.5 \cdot \frac{x3_u - 35}{5} - 3.5 \cdot \frac{x1_u - 2}{2} \cdot \frac{x2_u - 1.6}{0.4} \cdot \frac{x3_u - 35}{5}$$

$$\sigma_u =$$

639
632
632
639
583
590
590
583

$$y_u :=$$

632
637
644
630
593
582
587
585

$$\Delta_u := \frac{(y_u - \sigma_u) \cdot 100}{y_u}$$

$$\Delta\sigma_u := \begin{cases} \Delta_u \cdot (-1) & \text{if } \Delta_u < 0 \\ \Delta_u & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta\sigma_u =$$

1.15
0.75
1.82
1.47
1.64
1.42
0.55
0.3

(11)

Средняя погрешность вычисления:  $\Delta\sigma_{\text{уср}} = 1,13\%$ .

Аналогичным методом решены задачи по нахождению среднего значения микротвёрдости и ударной вязкости сварного шва (12, 13) с погрешностью вычисления около 1%:

$$HV(x3) = 365,625 + 7,375 \cdot \frac{\delta_3 - 35}{5} \quad (12)$$

$$KCV(\delta_1, \delta_2, \delta_3) = 71,625 + 0,875 \cdot \frac{\delta_1 - 2}{2} - 1,125 \cdot \frac{\delta_2 - 1,6}{0,4} - 9,125 \cdot \frac{\delta_3 - 35}{5} + \\ + 0,875 \cdot \frac{\delta_1 - 2}{2} \cdot \frac{\delta_2 - 1,6}{0,4} \cdot \frac{\delta_3 - 35}{5} \quad (13)$$

Как видно из уравнений регрессии наибольший вклад в изменение механических свойств при лазерно-дуговой сварке оказывает скорость процесса. Сравнение результатов расчёта математической модели с реальными значениями механических свойств показывают их отклонение около 7%.

### 3.1.1.9 Выводы.

1. Согласно источникам [1-6] разработаны уравнения регрессии для нахождения предела прочности, ударной вязкости и средней микротвёрдости шва по параметрам лазерно-дуговой сварки.
2. Средняя погрешность значений уравнений составляет около 1% (без учёта погрешности измерения), а суммарная около 7%.
3. Существенный недостаток «прямой» задачи – определение среднего значения микротвёрдости всего шва, а не по измеряемым линиям (данный недостаток легко исправить, заменив уравнение средней микротвёрдости 3-мя уравнениями для средних значений микротвёрдости по измеряемым линиям).

### 3.1.2 Решение «обратной» задачи

«Обратная» задача была решена методом перебора решений прямой задачи (11-13) по заданному диапазону предела прочности от  $\sigma_1$  до  $\sigma_2$ . Задаваемые значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  должны лежать в диапазоне от 582 МПа до 644 МПа (5).

$$\sigma_1 := 607 \quad \sigma_2 := 608 \quad (14)$$

$$\sigma(x_1, x_2, x_3) = 611,25 + 24,5 \cdot \frac{\delta_3 - 35}{5} - 3,5 \cdot \frac{\delta_1 - 2}{2} \cdot \frac{\delta_2 - 1,6}{0,4} \cdot \frac{\delta_3 - 35}{5}$$

$$HV(x_3) = 365,625 + 7,375 \cdot \frac{\delta_3 - 35}{5}$$

$$KCV(\delta_1, \delta_2, \delta_3) = 71,625 + 0,875 \cdot \frac{\delta_1 - 2}{2} - 1,125 \cdot \frac{\delta_2 - 1,6}{0,4} - 9,125 \cdot \frac{\delta_3 - 35}{5} +$$

$$+ 0,875 \cdot \frac{\delta_1 - 2}{2} \cdot \frac{\delta_2 - 1,6}{0,4} \cdot \frac{\delta_3 - 35}{5}$$

```

T :=
for k ∈ 0..10
  for j ∈ 0..2
    for i ∈ 0..4
      if  $\sigma(x_1, x_2, x_3) \geq \sigma_1 \wedge \sigma(x_1, x_2, x_3) \leq \sigma_2$ 
        M<n> ←
          (
            x1i
            x2j
            x3k
             $\sigma(x_1, x_2, x_3)$ 
            HV(x1i, x2j, x3k)
            KCV(x1i, x2j, x3k)
          )
        n ← n + 1
      continue otherwise
M

```

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 4 \\ 1.2 & 2 \\ 34 & 34 \\ 607.1 & 607.1 \\ 364.1 & 364.1 \\ 73.5 & 73 \end{pmatrix}$$

Программа выдаёт все варианты параметров лазерно-дуговой сварки, при которых возможно получить предел прочности, лежащий в задаваемом диапазоне, и далее по известным параметрам процесса сварки определяет значение ударной



вязкости и среднее значение микротвёрдости. Результаты расчёта сводятся в матрицу  $T$ .

Выводы.

1. В системе Mathcad разработана программа, позволяющая решить «обратную» задачу, по требуемому диапазону предела прочности.
2. Погрешность вычисления «обратной» задачи соответствует погрешности вычисления «прямой» задачи.
3. Недостатки «обратной» задачи сходны с недостатками прямой задачи.

## **3.2 Рекомендации по возможности использования результатов НИР в реальном секторе экономики**

Проведённый многофакторный эксперимент позволил составить и решить уравнения регрессии с целью нахождения механических свойств сварного соединения по известным параметрам лазерно-дуговой сварки (расстоянию между источниками, диаметру присадочной проволоки и скорости сварки).

В результате составления системы уравнений было выяснено не только линейное влияние на механические свойства шва каждого из факторов, но также влияния парных и тройных взаимодействий.

На базе данных уравнений методом перебора также была решена «обратная» задача, позволяющая определить вышеперечисленные параметры лазерно-дугового процесса по требуемому диапазону значений предела прочности.

Погрешность вычисления «прямой» и «обратной» задач составляет около 7%.

Разработанная модель позволяет определять параметры лазерно-дуговой сварки без проведения экспериментальных работ, что существенно сокращает время, затрачиваемое на разработку технологии сварки металлов больших толщин. Наиболее вероятное применение модели при сварке труб магистралей нефте-, газопроводов, т.к. именно в этой отрасли используется сталь 09Г2ФБЮ.

Конечно, модель имеет узкую направленность, но, тем не менее, в работе показан метод решения задач подобного рода. Данный метод можно применять для решения подобных задач, исследуя влияние на свойства сварного шва и других параметров сварки: при разных способах сварки и сварке различных металлов, как по химическому составу, так и по толщинам.

## **Заключение**

Проведение однофакторного эксперимента на 1-м этапе работ позволило выявить направление сварки с наиболее стабильным проплавлением, а также параметры процесса, при варьировании которых получается сварное соединение со сквозным проплавлением.

Многофакторный эксперимент, проведённый в рамках данного этапа, позволил выявить не только линейное влияние на механические свойства шва каждого из факторов, но также влияния парных и тройных взаимодействий. Математическая модель, построенная по результатам многофакторного эксперимента, позволила решить (по требуемому диапазону значений предела прочности) методом перебора решений прямой задачи «обратную» задачу с погрешностью до 7%.

## Список литературы

1. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М. Машиностроение, 1981. – 184 с., ил.
2. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях, Изд. «Техника», Киев 1975. – 168 с.
3. Лунёв В.А. Математическое моделирование и планирование эксперимента, Учеб. Пособие, СПб: Изд-во Политехн. Ун-та, 2006. – 164 с.
4. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов, К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шеффер. Изд. «Мир», М, 1977. – 552 с.
5. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. Пер. С англ. – М.:Мир, 1981.–520 с., ил.
6. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа, М.: Наука, 1980 – 228 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

(экспертное заключение, копия статьи, выписка из протокола заседания научно-технического совета о рассмотрении результатов поисковой научно-исследовательской работы).