

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Рецензент

Заведующий кафедрой

должность, место работы

МА. Иванов

2020 г.

подпись

И.О. Фамилия

2020 г.

ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ СПЛАВА HASTELLOY сп П СТАЛИ

12X18НЮТ

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
(МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ)  
ЮУрГУ-15.04.01.2020.180 ГВ ВКР**

Руководитель ВКР

Автор ВКР магистрант  
группы П-246 А.В.  
Баданин

старший  
преподаватель

Должность

А.М. Уланов

Подпись

И.О., Фамилия 2020 г.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролёр  
старший преподаватель

Ю.В. Безганс

Челябинск, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ	
1.1 Обзор литературы.....	8
1.2 Характеристика материалов.....	10
1.3 Выбор конструкции сварного соединения.....	12
1.4 Выбор сварочных материалов.....	16
2 РАСЧЁТ РЕЖИМОВ СВАРКИ	
2.1 Выбор методики расчёта режимов TIG сварки.....	20
2.2 Пример расчёта режимов сварки листов 1–1 мм.....	29
2.3 Пример расчёта режимов сварки листов 6–8 мм.....	30
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ TIG СВАРКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SYSWELD	
3.1 Задание условий моделирования.....	33
3.2 Результаты моделирования TIG сварки.....	37
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS	
4.1 Определение механических свойств металла шва.....	41
4.2 Результаты моделирования статического растяжения.....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	55
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	61

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в энергетическом оборудовании широко распространены сварные соединения из разнородных сталей и сплавов. Сварка разнородных материалов находит применение, когда возникает потребность в экономии дорогостоящих материалов. Из-за технологических особенностей таких изделий, получение сварных соединений становится затруднительными, что приводит к необходимости тщательного подбора сварочных материалов, выбора режимов сварки и анализа конструктивных элементов разделки кромок свариваемых деталей. Актуальность работы заключается в том, что в условиях увеличения объёмов импортозамещения и выпуска нового оборудования возникает потребность в освоении технологии сварки стыковых соединений схожих с типами С2 и С17 по ГОСТ 14771–76 [1] из разнородных материалов.

Целью исследования является освоение технологии сварки разнородных материалов из сплава Hastelloy С22 и стали 12Х18Н10Т с помощью сварки неплавящимся электродом в инертных газах (TIG – Tungsten Inert Gas).

Задачами исследования являются моделирование процесса сварки в программном комплексе SYSWELD и моделирование статического растяжения сварных соединений средствами программного комплекса ANSYS с описанием рекомендаций по выбору сварочного материала на основе полученных данных.

Научная новизна заключается в описании выбора методики TIG сварки для сварных соединений из разнородных материалов. Описан способ примерного определения химического состава сварочного шва и определения его механических свойств путём подбора аналогов по химическому составу. Произведено сравнение механических свойств сварных соединений, сваренных тремя различными сварочными материалами, путём моделирования статического растяжения в программном комплексе ANSYS.

Практической ценностью является выбор методики расчёта режимов TIG для разнородных материалов и методика выбора сварочной проволоки с целью

									Лист
									6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2020.180.00 ПЗ				

обеспечения лучших результатов при испытании сваренных образцов на статическое растяжение.

В результате выполнения работы было реализовано следующие. В работе выбрана методика расчёта режимов TIG сварки. Для сварки листов толщиной 1–8 мм произведены расчёты сварочного тока, напряжения дуги, скорости сварки, погонной энергии, размеры швов, выбор диаметра присадочной проволоки, скорость её подачи, расчёт скорости охлаждения. Произведён анализ химического состава основных материалов, трёх типов сварочных проволок и сварных швов, полученных с помощью данных проволок. Произведён анализ структуры металла шва по диаграмме Шеффлера. Графическим способом, по соотношению площадей основных и сварочных материалов, а также по справочнику подобраны материалы наиболее близко соответствующие материалам в сварном шве по химическому составу. Используя механические свойства материалов аналогов, произведено моделирование испытания на статическое растяжение сварных соединений для различных толщин листов и типов соединений.

Структура и объём выпускной квалификационной работы. Пояснительная записка состоит из введения, четырёх разделов, заключения и списка литературы. Пояснительная записка изложена на 75 страницах, содержит 22 таблицы и 32 рисунка. Список литературы содержит 42 наименования.

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

# 1 ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1 Обзор литературы

Сварка разнородных материалов возникает при необходимости экономии дорогостоящих материалов, для снижения себестоимости конечной продукции и замены таких материалов там, где это позволяют условия эксплуатации [2]. Например, при сварке устройства из коррозионностойкого сплава с конструктивными стальными элементами [3]. Сварка жаропрочных никелевых сплавов со сталями находит применение в теплоэнергетике, как показывает исследование, использование разнородной сварки с целью повышения коэффициента полезного действия (КПД) и снижения стоимости установок будет только увеличиваться [4]. Исследование [5] описывает разнородную сварку никелевого сплава с нержавеющей сталью для нефтехимической и атомной промышленности. В работе [6] ведётся совершенствование технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) разнородных сталей с целью снижения структурной и механической неоднородности сварных соединений.

В следующих работах рассмотрены особенности сварных соединений с никелевыми сплавами. В исследовании [7] уделено внимание влиянию технологии ротационной сварки трением жаропрочного никелевого сплава на содержание упрочняющих фаз и прочностные характеристики сварных соединений. В исследовании [8] произведена сварка жаропрочного никелевого сплава с помощью линейной сварки трением, оценены металлографические данные, измерения твёрдости и испытания на статическое растяжение. В статье [9] рассмотрены работы по изучению образования трещин в сварных соединениях жаропрочных никелевых сплавах, выявлены общие способы снижения образования трещин. Исследована сварка никелевых сплавов малых толщин с помощью импульсного лазерного излучения [10], отмечено повышение прочности данных соединений. Произведён выбор режимов сварки жаропрочного никелевого сплава в азотированном состоянии [11]. В работе [12] изучено влияние

									Лист
									8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2020.180.00 ПЗ				

геометрии сварочной ванны на ориентацию преимущественного роста кристаллов жаропрочных никелевых сплавов. Изучен вопрос создания технологии сварки кольцевых деталей, изготавливаемых из трудносвариваемых жаропрочных дисперсионно–твердеющих никелевых сплавов [13]. Рассмотрена методика расчёта влияния многопроходной сварки на энергию когезии границ зёрен многослойных наплавов на никелевой основе [14]. Исследованы температурные поля и напряжений, определён состав и свойства сварных соединений жаропрочных никелевых сплавов с применением ЭЛС [15]. В исследовании [16] проанализировано возникновение трещин в изделиях из жаропрочного никелевого сплава при сварке с использованием высококонцентрированных источников энергии.

Непрерывно ведутся исследования различных свойств сварных соединений с использованием никелевых сплавов, поэтому рассматриваемая задача по сварке никелевого сплава Hastelloy C22 (Хастеллой С22) с нержавеющей сталью 12Х18Н10Т является актуальной. С целью освоения новой продукции в условиях текущего уровня производственных возможностей важно освоить технологию ТIG сварки данных разнородных материалов.

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

## 1.2 Характеристика материалов

В данной работе требуется оценить свариваемость сплава Hastelloy C22 и стали 12X18H10T. Рассмотрим химический состав и основные физические свойства данных материалов. Сплав Hastelloy C22 имеет ещё другое обозначение Nicrofer 5621 hMoW – СПЛАВ 22. Hastelloy — торговая марка фирмы «Cabot Corporation» (США). Nicrofer — торговая марка фирмы «Krupp VDM» (Германия).

Рассмотрим свойства сплава 22. Химический состав сплава 22 представлен в таблице 1.1 [17].

Таблица 1.1 – Химический состав сплава 22. Массовая доля элементов, %

C	Cr	Fe	Mo	Co	W	V	Si	Ni
≤0,01	20,0– 22,5	2,0–6,0	12,5– 14,5	≤2,5	2,5–3,5	≤0,35	≤0,08	Осн.

Некоторые механические и физические свойства сплава 22 при 20 °С:

- $\sigma_B > 690 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\sigma_{0,2} > 310 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\delta_5 > 45\%$ ;
- Плотность  $8,7 \text{ г/см}^3$ ;
- Модуль упругости  $20,6 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$ .

Сплав 22 обладает повышенной устойчивостью в окислительных средах. Из него изготавливают оборудование для сильно окислительных сред с горячими серной и фосфорной кислотами, для окислительных растворов минеральных кислот и сложных смесей кислот и химикатов. Сплав 22 обладает хорошей свариваемостью [17].

С целью снижения стоимости пробных экспериментов по оценке свариваемости допускается замена сплава Hastelloy C22 на отечественный аналог ХН63МБ [17], химический состав которого представлен в таблице 1.2.

									Лист
									10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

15.04.01.2020.180.00 ПЗ

Таблица 1.2 – Химический состав сплава ХН63МБ. Массовая доля элементов, %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe	S	P
≤0,02	≤0,1	≤1,0	20	Осн.	16,0	≤0,5	≤0,012	≤0,015

Некоторые механические и физические свойства сплава ХН63МБ при 20 °С:

- $\sigma_B > 755 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\sigma_T > 353 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\delta_5 > 30\%$  ;
- Плотность 8,9 г/см<sup>3</sup>;
- Модуль упругости  $20,0 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$ .

Сплав ХН63МБ предназначен для эксплуатации в особо агрессивных средах с содержанием хлоридов, фторидов, органических кислот, минеральных кислот и химикатов при температурах свыше 100 °С. Сплав ХН63МБ сваривается ТIG сваркой и ручной дуговой сваркой (РДС). Сварку необходимо производить валиками ограниченного сечения при минимальной погонной энергии с перерывами между наложением очередных валиков. Сварные соединения стойки против межкристаллитной коррозии, не склонны к горячим и холодным трещинам [17].

Рассмотрим свойства стали 12Х18Н10Т. Химический состав стали 12Х18Н10Т представлен в таблице 1.3 [17].

Таблица 1.3 – Химический состав стали 12Х18Н10Т. Массовая доля элементов, %

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Ti	Fe
≤0,12	≤0,08	≤2,0	17,0– 19,0	9,0– 11,0	≤0,02	≤0,035	5*С–0,8	Осн.

Некоторые механические и физические свойства стали 12Х18Н10Т при 20 °С:

- $\sigma_B > 520 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\sigma_{0,2} > 200 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\delta_5 > 40\%$  ;
- Плотность 7,9 г/см<sup>3</sup>;



- Модуль упругости  $18,0 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$ .

Сталь 12Х18Н10Т применяется в сварных конструкциях, которые работают в контакте с окислительными средами, некоторыми органическими кислотами средней концентрации, органическими растворителями и в атмосферных условиях. Используется для ёмкостного, теплообменного оборудования, для изготовления конструкций в криогенной технике. Обладает жаростойкостью при 600–800 °С. Сталь 12Х18Н10Т обладает хорошей свариваемостью всеми видами автоматической и ручной сварки [17].

### 1.3 Выбор конструкции сварного соединения

В соответствии с конструктивными особенностями вновь разрабатываемого оборудования, конструкция которого не может быть представлена в силу некоторой коммерческой новизны, выберем тип сварного соединения С2 и С17 по ГОСТ 14771–76 [1]. Диапазон толщин листов от 0,5 мм до 4,0 мм по С2 для способа сварки ИН – в инертных газах, неплавящимся электродом без присадочного металла (рисунок 1.1, таблица 1.4). Диапазон толщин листов от 4,0 мм до 8,0 мм по С17 для способа сварки ИНп – в инертных газах, неплавящимся электродом с присадочной проволокой (рис. 1.2, табл. 1.5).

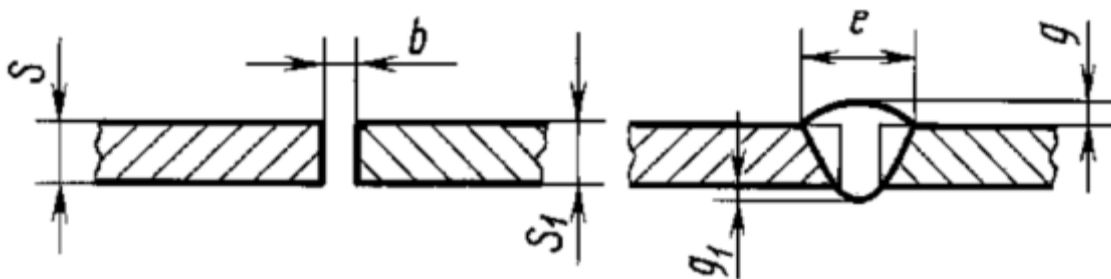


Рисунок 1.1 – Конструктивные элементы по ГОСТ 14771–76–С2

Таблица 1.4 – Размеры конструктивных элементов по ГОСТ 14771–76–С2

Способ сварки	$s = s_1$	$b$		$e$ , не более	$g$		$g_1$	
		Номин.	Пред. откл.		Номин.	Пред. откл.	Номин.	Пред. откл.
ИН	0,5–0,9	0	-0,1	6,0	0	+0,1	0	+0,1
	1,0 1,4		+0,2	7,0		$\pm 0,3$		+0,5
	1,5–1,9		+0,3	8,0		$\pm 0,5$		+1,0
	2,0–2,8			9,0		$\pm 1,0$		
	3,0–4,0							

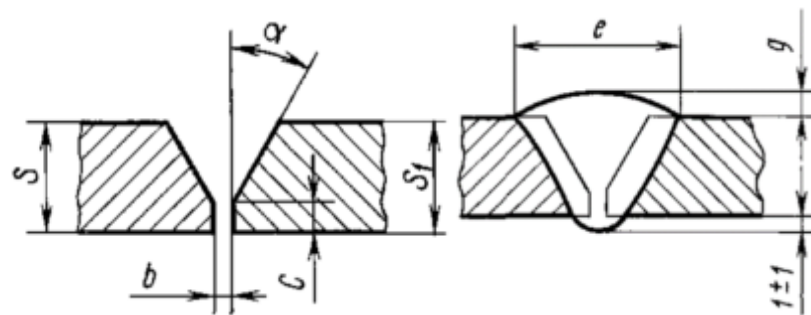


Рисунок 1.2 – Конструктивные элементы по ГОСТ 14771–76–С17

Таблица 1.5 – Размеры конструктивных элементов по ГОСТ 14771–76–С17

Способ сварки	$s = s_1$	$b$		$c$		$e$		$g$		$\alpha$ , град. (пред. откл. +2°)
		Номин.	Пред. откл.	Номин.	Пред. откл.	Номин.	Пред. откл.	Номин.	Пред. откл.	
ИНП, ИП	3,0 4,0	1,0	$\pm 1,0$	1,0	$\pm 1,0$	6	$\pm 2$	1	$\pm 1$	30
	4,5–5,5					7				
	6,0					8				
	7,0					10				
	8,0					12				20

Аналогом сплава Hastelloy C22 (Хастеллой С-22) как уже было отмечено является сплав ХН63МБ [17]. Основные механические свойства сплава ХН63МБ составляют: не менее  $\sigma_{0,2}=353$  МПа,  $\sigma_B=755$  МПа. Основные механические свойства стали 12Х18Н10Т составляют: не менее  $\sigma_{0,2}=200$  МПа,  $\sigma_B=520$  МПа. Прочность свариваемых материалов сильно отличается, поэтому для обеспечения равной прочности при растяжении необходимо увеличить толщину свариваемых листов для менее прочных материалов. Коэффициент увеличения толщины определим из условия равнопрочности при растяжении [18]:

$$P = [\sigma_1]_p F_1 = [\sigma_2]_p F_2, \quad (1)$$

где  $[\sigma_1]_p$  и  $[\sigma_2]_p$  – допускаемое напряжение при растяжении для разных материалов,  $F = l*s$  – площадь поперечного сечения листа длиной  $l$  и толщиной  $s$ . Примем  $[\sigma_1]_p = 200$  МПа,  $[\sigma_2]_p = 353$  МПа, тогда:

$$F_1 = \frac{[\sigma_2]_p F_2}{[\sigma_1]_p} = 1,77 \cdot F_2 \quad (2)$$

Согласно соотношению (2) для обеспечения равнопрочности толщина листа из стали 12Х18Н10Т должна быть в 1,77 раз больше чем толщина листа из сплава ХН63МБ. По ГОСТ 14771–76 п. 7 при сварке листов разной толщины необходимо делать скос до толщины тонкой детали (рисунок 1.3). Требование по скосу до толщины тонкой детали под углом 15 градусов не обеспечивает выполнение соотношения (2), так как возле сварного шва площадь сечения толстой детали будет гораздо меньше соотношения (2).

По п. 7 ГОСТ 14771–76 сварка встык деталей неодинаковой толщины допускается с разницей по толщине, не превышающей значений, указанных в таблице 1.6, мм. Сварка данных разнотолщинных деталей должна производиться так же, как деталей одинаковой толщины. Разделка кромок и размеры сварного шва выбираются по детали с большей толщиной.

									Лист
									14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

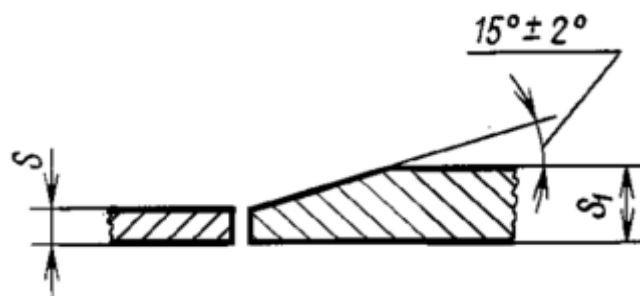


Рисунок 1.3 – Скос при сварке листов разной толщины

Таблица 1.6 – Разница толщин свариваемых деталей по п.7 ГОСТ 14771–76

Толщина тонкой детали	Разность толщин деталей
2–3	1
4–30	2
32–40	4
Св. 40	6

Плавный переход от одной детали к другой осуществляют наклонным расположением поверхности шва (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Плавный переход при сварке листов разной толщины

Выберем для исследования толщины и типы сварных соединений согласно таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Толщина свариваемых листов

ХН63МБ толщина листа s, мм	12Х18Н10Т толщина листа s1, мм	Обозначение сварного соединения, способ сварки по ГОСТ 14771–76
1	1	С2, ИН
2	3	С2, ИН
3	4	С2, ИН
4	6	С17, ИНп
5	7	С17, ИНп
6	8	С17, ИНп

Использование соотношения толщин свариваемых листов по таблице 1.7 позволит в лучшей степени использовать прочностные свойства свариваемых материалов с учётом требований по ГОСТ 14771–76.

#### 1.4 Выбор сварочных материалов

По данным справочника [17] отечественным аналогом сплава Hastelloy С22 является ХН63МБ. Обозначим основной материал ХН63МБ индексом «А», основной материал 12Х18Н10Т обозначим индексом «Б». Сварочные материалы (проволока) обозначим индексом «В». Сварочные проволоки подобраны исходя из данных следующих справочников:

- 1) СТП 26.260.486–2005 Изменение №1 Каталог аналогов импортных и отечественных основных и сварочных материалов, применяемых при изготовлении сосудов, аппаратов и трубопроводов, подведомственных Ростехнадзору [19].
- 2) СТО 00220368–008–2006 Изготовление деталей и узлов из коррозионностойких сплавов на железоникелевой и никелевой основе, разнородных соединений и двухслойных сталей с плакирующим слоем из

сплавов марок 06ХН28МДТ, ХН65МВ и Н70МФВ–ВИ. Типовой технологический процесс [20].

- 3) ОСТ 26–01–858–94 Сосуды и аппараты сварные из никеля и коррозионностойких сплавов на основе никеля. Общие технические требования [21].
- 4) ESAB. Руководство по сварке разнородных металлов [22].

Исходя из условия доступности, выберем аналоги импортных сварочных материалов. Данные взяты из источника: «Каталог продукции ESAB. Сварочные материалы ESAB 2020, 2–е издание» [23]. Рекомендуемые отечественные сварочные материалы и их импортные аналоги представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Основные и сварочные материалы

Основной материал А	Сварочные материалы В1, В2, В3	Основной материал Б
12Х18Н10Т ГОСТ 5632–2014	1. ОК Tigrod 308LSi (Аналог 03Х18Н11) 2. ОК Tigrod NiCr–3 (Аналог ХН60ВТ) 3. ОК Tigrod 385 (Аналог 06ХН28МДТ) ESAB, Швеция	ХН63МБ ГОСТ 5632–2014 (Аналог Hastelloy C22)

Для определения структуры металла шва в зависимости от его химического состава отметим их на диаграмме Шеффлера [2, 22, 24].

Эквивалент никеля рассчитаем по формуле:

$$\text{Экв. Ni\%} = \text{Ni\%} + 30\text{C\%} + 30\text{N\%} + \text{Co\%} + 0,5\text{Mn\%}. \quad (3)$$

Эквивалент хрома рассчитаем по формуле:

$$\text{Экв. Cr\%} = \text{Cr\%} + \text{Mo\%} + 2\text{Ti\%} + 2\text{Al\%} + \text{Nb\%} + \text{W\%} + 0,5\text{Ta\%} + 1,5\text{Si\%} \quad (4)$$

На рисунке 1.5 представлена диаграмма Шеффлера с основными и сварочными материалами, где А – основной материал 12Х18Н10Т; Б – основной материал ХН63МБ; В1 – сварочный материал ОК Tigrod 308LSi (аналог 03Х18Н11); В2 – сварочный материал ОК Tigrod NiCr-3 (аналог ХН60ВТ); В3 – сварочный материал ОК Tigrod 385 (аналог 06ХН28МДТ); А+Б – химический состав сварочного шва без присадочной проволоки; А+Б+В1/В2/В3 – химический состав сварочного шва с присадочной проволокой с учётом внесения присадочной проволокой около 70% своих химических элементов в химический состав сварочного шва от основных материалов [22].

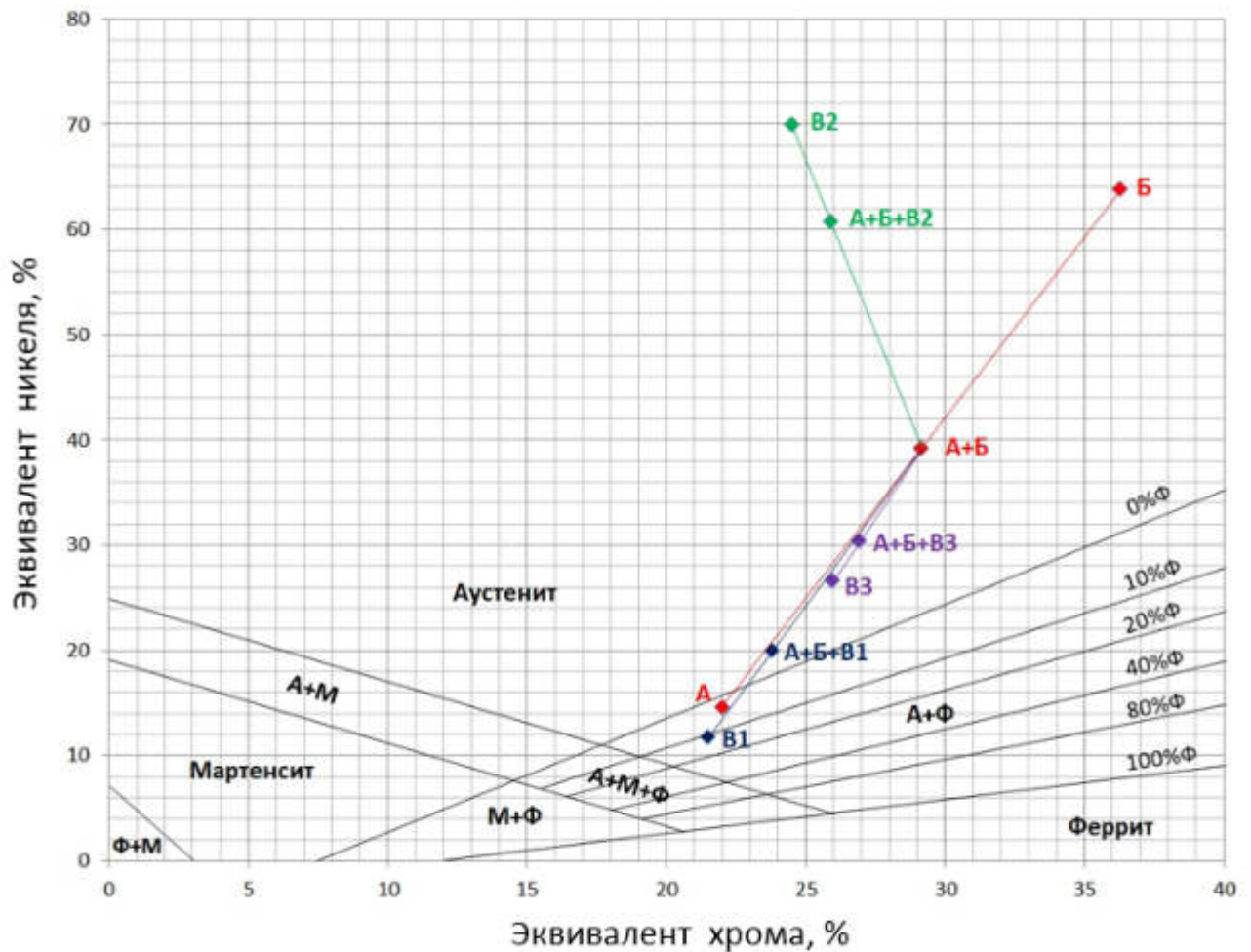


Рисунок 1.5 – Диаграмма Шеффлера

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Из диаграммы Шеффлера видно, что металл сварного шва при использовании любой из перечисленных проволок должен получиться аустенитным (точки А+Б+В1, А+Б+В2, А+Б+В3).

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19



## 2 РАСЧЁТ РЕЖИМОВ СВАРКИ

### 2.1 Выбор методики расчёта режимов TIG сварки.

В соответствии с текущим уровнем производственных возможностей предприятия, для которого осуществляется освоение технологии сварки сплава Hastelloy C22 и стали 12X18H10T, в качестве способа сварки выберем сварку TIG. Расчёт режимов сварки произведём для постоянного тока прямой полярности, электрод подключен к клемме «Минус». За основу взята методика расчёта размеров швов для РДС [25, 26].

Расчёт режимов сварки произведём в соответствии со следующей последовательностью.

1) Примем предварительный ток сварки  $I_{св}$  (А) в зависимости от толщины свариваемых деталей по таблице 2.1 [26, 27, 28, 29]. Величина сварочного тока может быть изменена после предварительного расчёта.

2) Определим напряжение сварочной дуги  $U_d$  (В) по ГОСТ Р МЭК 60974–1–2012 Оборудование для дуговой сварки [30]. Для сварки вольфрамовым электродом в инертном газе:

$$U_d = 10 + 0,04 I_{св}. \quad (5)$$

3) Зададим среднюю скорость сварки  $v_{св}$  (см/с) из диапазона 0,1...0,5 см/с, которая будет удобна для осуществления ручной сварки. Величина средней скорости сварки может быть изменена после предварительного расчёта.

4) Примем эффективный КПД процесса нагрева при сварке в защитном газе аргоном вольфрамовым электродом  $\eta_{и} = 0,7$ , который может изменяться в диапазоне 0,45–0,75 [31, 32].

									Лист
									20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2020.180.00 ПЗ				

Таблица 2.1 – Примерные режимы TIG сварки

Толщина металла, мм	Тип соединения	Диаметр электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Расход аргона, л/мин
0,5	Стыковое с отбортовкой	1	–	25–35	4
0,8	Стыковое без разделки кромок	1,0–1,6	–	35–45	4
1,0		1,6	–	40–50	4
1,5		1,6–2,0	–	45–65	4–5
2,0		2,0	–	70–85	5–6
3,0		2,–3,0	–	100–130	6–7
3,0	Стыковое с V-образной разделкой кромок	2,0–3,0	1,6	(60-70), 80-90*	6–7
4,0		3,0	1,6–2,0	(65-80), 90-100*	6–7
5,0		3,0–4,0	1,6–2,0	(75-85), 90-120*	7–8

\* — В скобках указана сила тока без присадки, без скобок — сила тока для сварки с присадкой.

5) Определим величину погонной энергии  $q_{п}$  (кал/см) по формуле:

$$q_{п} = \frac{0,24 I_{св} U_{д} \eta_{и}}{v_{св}} \quad (6)$$

б) Определим удельную объёмную теплоёмкость  $c_{у}$  (кал/(см<sup>3</sup>·град)) для каждого материала по табличным данным [16, 33]. Теплоёмкость –  $c$  (Дж/(кг·град)), плотность –  $\gamma$  (кг/м<sup>3</sup>). Удельная объёмная теплоёмкость определяется по формуле:

$$c_{у} = 0,24 \cdot c \cdot \gamma \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

Некоторые теплофизические свойства свариваемых материалов представлены в таблице 2.2. В расчётах использованы средние значения теплофизических свойств для свариваемых материалов [16, 33, 34].

Таблица 2.2 – Теплофизические свойства

	Хромоникелевые аустенитные стали (X18H9B)	Высоколегиро- ванные стали (X20H35)	Среднее значение
Теплоёмкость $c$ , Дж/(кг·град)	575	590	583
Плотность $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	7,8*10 <sup>3</sup>	7,95*10 <sup>3</sup>	7,88*10 <sup>3</sup>
Удельная объёмная теплоёмкость $c\gamma$ , кал/(см <sup>3</sup> ·град)	1,08	1,13	1,10
Температура плавления $T_{пл}$ , °С	1450	1400	1425
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , кал/(см·с·град)	0,06	0,06	0,06

7) Произведём расчёт размеров шва при сварке листов встык без зазора, за один проход и без присадочной проволоки, для листов с толщиной 1–4 мм. Формула для расчёта ширины шва выводится из формулы для определения максимальной температуры в процессе распространения тепла быстродвижущегося линейного источника [35]. Расчёт произведём по упрощённой формуле, без учёта интенсивности теплоотдачи. Ширина шва  $e$  (см) определяется по формуле:

$$e = K_1 \frac{0,484q_{п}}{c\gamma \cdot s \cdot T_{пл}}, \quad (8)$$

где  $K_1 = 0,5–0,7$  – коэффициент, учитывающий действительные условия ввода теплоты [26], примем  $K_1 = 0,6$ ;  $s$  – толщина листа (см) при сварке листов разной толщины принимается толщина большего листа;  $T_{пл}$  – температура плавления свариваемого металла, °С.

Площадь провара (см<sup>2</sup>) определим по формуле:

$$F_{\text{пр}} = s \cdot e. \quad (9)$$

8) Произведём расчёт размеров шва при сварке листов встык с V-образной разделкой кромок для листов 4–8 мм. При определении глубины проплавления используется расчётная схема нагрева мощным точечным быстродвижущимся источником [26]. Глубина проплавления  $r_{\text{пл}}$  (см) определяется по формуле:

$$r_{\text{пл}} = K_1 \sqrt{\frac{2q_{\text{п}}}{\pi \cdot e \cdot c \cdot \gamma \cdot T_{\text{пл}}}}, \quad (10)$$

где  $K_1 = 0,5–0,7$  – коэффициент, учитывающий действительные условия ввода теплоты [26], примем  $K_1 = 0,6$ ;  $\pi = 3,14$ ,  $e = 2,72$  – математические константы.

Коэффициент формы провара для TIG сварки постоянным током прямой полярности близок к полуокружности с радиусом  $r_{\text{пл}}$ . Соответственно примем форму провара  $\psi_{\text{пр}} = 2$ .

Ширина зоны расплавления тогда составит  $e = 2r_{\text{пл}}$  (см).

Площадь плавления  $F_{\text{пл}}$  (см<sup>2</sup>), которая ограничена изотермой плавления, определим по формуле:

$$F_{\text{пл}} = \frac{\pi r_{\text{пл}}^2}{2}. \quad (11)$$

9) Зададим диаметр присадочной проволоки  $d_{\text{п}}$  (см) согласно таблице 2.1. Величина может быть изменена после предварительного расчёта.

Зададим среднюю скорость подачи присадочной проволоки  $v_{\text{пп}}$  (см/с) из диапазона 0,1...0,8 см/с, которая будет удобна для осуществления ручной сварки. Величина средней скорости подачи присадочной проволоки может быть изменена после предварительного расчёта.

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

Примем коэффициент потерь металла присадочной проволоки на угар равным  $\psi_{\text{п}} = 1\%$  ( $\psi_{\text{п}} = 0,01$ ).

Определим площадь наплавки  $F_{\text{н}}$  (см<sup>2</sup>). Поперечное сечение наплавленного металла должно быть не более 40–50 мм<sup>2</sup> за один проход [26] и не превышать величину площади плавления  $F_{\text{пр}}$ . Площадь  $F_{\text{н}}$  наплавки определяется по формуле [25]:

$$F_{\text{н}} = \frac{v_{\text{пп}}(1-\psi_{\text{п}})\pi d_{\text{п}}^2}{4v_{\text{св}}} \quad (12)$$

Площадь наплавки должна быть такой, чтобы проплавление основного металла было не менее чем 1–1,5 мм (определяется геометрически по площади наплавленного валика и расплавленного основного металла). Для удовлетворения этого требования необходимо придерживаться следующего соотношения:

$$F_{\text{н}} = 0,5F_{\text{пл}} \quad (13)$$

Это достигается за счёт корректирования скорости подачи присадочной проволоки, подбора соответствующего диаметра присадочной проволоки и скорости сварки.

10) Определим площадь провара  $F_{\text{пр}}$  (см<sup>2</sup>) с учётом наплавленного металла:

$$F_{\text{пр}} = F_{\text{пл}} - F_{\text{н}} \quad (14)$$

11) Определение количества проходов. Зададим необходимую площадь заполнения  $F_{\text{зап}}$  (мм<sup>2</sup>), которая определяется с помощью инструментов инженерных графических редакторов, таких как КОМПАС, SolidWorks (рисунок 2.1).

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

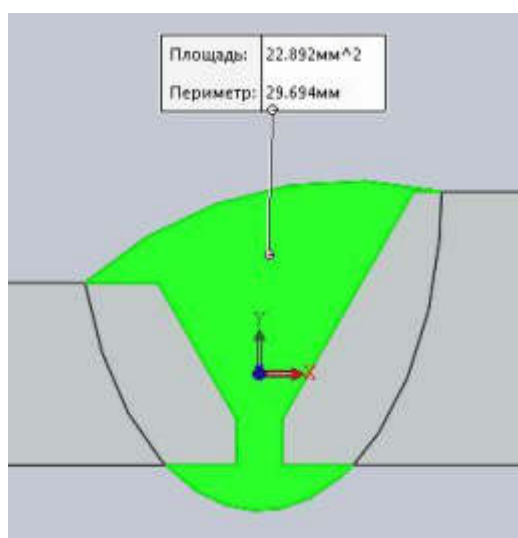


Рисунок 2.1 – Площадь заполнения сварочным материалом

Значения площади заполнения  $F_{\text{зап}}$  для сварки рассматриваемых листов представлены в табл. 2.3. Обозначения элементов разделки кромок по рисунку 1.2.

Таблица 2.3 – Конструктивные элементы разделки кромок С17 по ГОСТ 14771–76

Листы s–s1, мм	Зазор b, мм	Притупл. с, мм	Угол разд. $\alpha$ , град	Ширина шва е, мм	Усиление g, мм	Площадь заполн. $F_{\text{зап}}$ , мм <sup>2</sup>
4–6	1	1	30	8	1	22,9
5–7	1	1	30	10	1	30,9
6–8	1	1	20	12	1	32,1

Количество проходов определим по формуле:

$$n = \frac{F_{\text{об}}}{F_{\text{н}}} + n_{\text{бп}}, \quad (15)$$

где  $n_{\text{бп}}$  – количество проходов без присадочной проволоки.

12) Определение скорости охлаждения. Определим скорость охлаждения металла по формулам из литературы [25, 31, 35]. Так как рассматривается процесс

сварки листов, то не учитываем формулу определения скорости охлаждения при наплавке валика на массивное тело. За начальную температуру охлаждения принята температура минимальной устойчивости аустенита  $T_m=727$  °С.

Скорость охлаждения при односторонней сварке листов встык со сквозным проплавлением определяют по формуле:

$$\omega_{\text{охл}} = 2 \pi \lambda c \gamma \frac{(T_m - T_o)^3}{(q_n / \delta)^2}, \quad (16)$$

где  $\omega_{\text{охл}}$  — мгновенная скорость охлаждения при  $T_m$ , °С/с;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, кал/см·с·°С (0,00239 кал/(см·с·град) = 1 Вт/(м·град)) значение из табл. 6;  $c\gamma$  — объёмная теплоёмкость, кал/см<sup>3</sup>·°С; примем  $T_o=20$  °С — начальная температура изделия;  $q_n$  — погонная энергия, кал/см;  $\delta$  — толщина листа, см.

Скорость охлаждения при наплавке валика на лист толщиной  $\delta$ :

$$\omega_{\text{охл}} = \varpi \frac{2 \pi \lambda (T_m - T_o)^2}{q_n}, \quad (17)$$

где  $\varpi$  — безразмерный критерий процесса.

Критерий  $\varpi$  определяется через другой безразмерный критерий  $1/\theta$ :

$$1/\theta = \frac{2q_n}{\pi \delta^2 c \gamma (T_m - T_o)}. \quad (18)$$

Сначала рассчитывается критерий  $1/\theta$ , затем по таблице 2.4 [25] находят значение критерия  $\varpi$  при выполнении следующих условий.

Если  $1/\theta < 0,4$ , то значение  $\varpi = 1$ . Если  $1/\theta > 2,4$  то значение критерия  $\varpi$  определяется по формуле:

$$\varpi = \frac{2}{\pi \cdot 1/\theta} \quad (19)$$

Таблица 2.4 – Значения безразмерного критерия  $\varpi$  в зависимости от безразмерного критерия  $1/\theta$

$1/\theta$	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3	2,4
$\varpi$	1,0	0,97	0,88	0,79	0,65	0,53	0,44	0,37	0,33	0,3	0,28	0,27

При выборе режимов сварки аустенитных сталей следует снижать значение погонной энергии [36, 37] с целью повышения стойкости сварных соединений против образования межкристаллитной коррозии из-за выделения карбидов хрома по границам зёрен и снижения концентрации хрома в пограничных областях. На рисунке 2.2 представлена диаграмма изотермического превращения аустенита для аустенитной стали склонной к выделению карбидов [38].

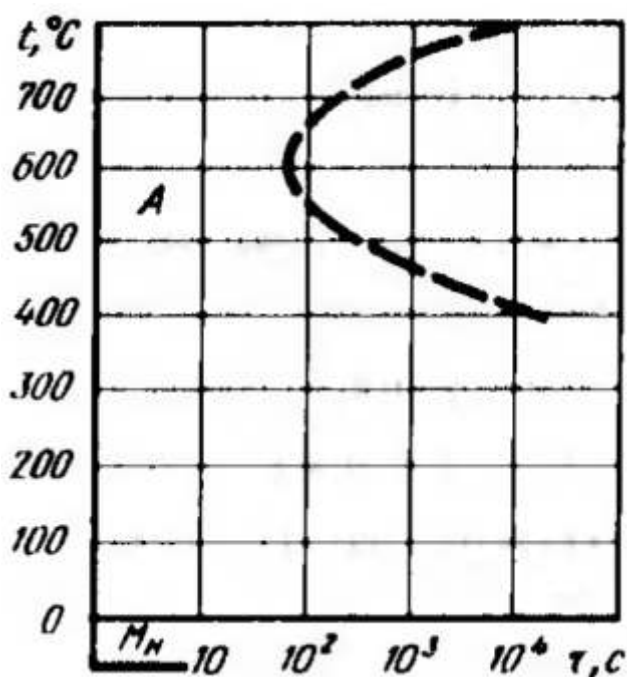


Рисунок 2.2 – Диаграмма изотермического превращения аустенита



На рисунке 2.2 пунктирной линией обозначена линия начала образования карбидов;  $A$  – область аустенита;  $t$  – температура нагрева стали, °C;  $\tau$  – время выдержки при заданной температуре нагрева, с;  $M_n$  – температура начала мартенситного превращения. Для стали 12X18H10T мартенситное превращение начинается при температуре ниже  $-120$  °C [37]. Для снижения образования карбидов хрома ограничим минимальную скорость охлаждения на уровне не менее  $5-10$  °C/с. Это обеспечивается применением принудительного охлаждения либо снижением погонной энергии. С другой стороны минимум погонной энергии ограничивается минимальными размерами шва с учётом технологических допусков.

Стойкость сварного шва к образованию горячих трещин обеспечивается выбором качественных сталей с минимальным содержанием вредных примесей серы и фосфора, выбором качественных сварочных материалов с минимальным содержанием вредных примесей серы, фосфора и ликвирующих примесей свинца, олова, висмута. Легированием сварного шва элементами, которые способствуют измельчению столбчатых кристаллов сварного шва. Сварку осуществляют неплавящимся электродом с коротким вылетом электрода с достаточным расходом защитного газа для исключения попадания и подсоса газов кислорода и водорода [34, 37, 39].

Результаты расчётов режимов сварки для толщин листов согласно таблице 1.7 представлены в таблице 2.5. При определении числа проходов для сварки листов с разделкой кромок учитывалось, что листы выставлялись с зазором 1 мм и первый проход осуществлялся с присадочной проволокой.

В ходе выполнения расчётов было удовлетворено требование по минимальной скорости охлаждения не менее  $5-10$  °C/с и обеспечена достаточная ширина сварного шва, исходя из требований по ГОСТ 14771–76.

Таблица 2.5 – Результат расчёта режимов TIG сварки

s-s1, мм	Тип св. соед.	$I_{св}$ , А	$U_{д}$ , В	$v_{св}$ , см/с	$q_{п}$ , Дж/см	$e$ , мм	$r_{пл}$ , мм	$d_{п}$ , мм	$v_{пп}$ , см/с	Кол. пр. $n$	$\omega_{охл}$ , °C/с
1–1	С2, ИН	40	11,6	0,3	1083	4,8	–	–	–	1	21,7
2–3	С2, ИН	80	13,2	0,2	3696	5,5	–	–	–	1	16,8
3–4	С2, ИН	110	14,4	0,2	5544	6,2	–	–	–	1	13,3
4–6	С17, ИНп	130	15,2	0,2	6916	8	3,0	2,0	0,5	3	19,2
5–7	С17, ИНп	140	15,6	0,2	7644	10	3,1	3,0	0,22	4	21,4
6–8	С17, ИНп	150	16,0	0,2	8400	12	3,3	3,0	0,23	4	23,1

## 2.2 Пример расчёта режимов сварки листов 1–1 мм

Рассмотрим расчёт режимов сварки листов 1–1 мм. Согласно таблице 1.7 тип сварного соединения С2 без разделки кромок, сварка за один проход. Расчёты выполнены в программе Mathcad 15.

1) По таблице 2.1 для сварки листов толщиной 1 мм примем сварочный ток

$$I_{св} = 40 \text{ А.}$$

2) Определим напряжение сварочной дуги по формуле (5):

$$U_{д} = 10 + 0,04 * 40 = 11,6 \text{ В.}$$

3) Зададим значение средней скорости сварки  $v_{св} = 0,3 \text{ см/с}$ .

4) Примем значение КПД процесса нагрева  $\eta_{и} = 0,7$ .

5) Определим величину погонной энергии по формуле (6), в калориях:

$$q_{п} = (0,24 * 40 * 11,6 * 0,7) / 0,3 = 259,84 \text{ кал/см,}$$

$$\text{в джоулях } q_{п} = 259,84 / 0,24 = 1083 \text{ Дж/см.}$$

6) Задаём средние значения теплофизических свойств свариваемых материалов по таблице 2.2:

$$c\gamma_1 = 0,24*575*7,8*10^3*10^{-6} = 1,08 \text{ кал}/(\text{см}^3 \cdot \text{град}),$$

$$c\gamma_2 = 0,24*590*7,95*10^3*10^{-6} = 1,13 \text{ кал}/(\text{см}^3 \cdot \text{град}),$$

$$c\gamma = (c\gamma_1 + c\gamma_2)/2 = (1,08+1,13)/2 = 1,105 \text{ кал}/(\text{см}^3 \cdot \text{град}),$$

$$T_{\text{пл}} = (T_{\text{пл1}}+T_{\text{пл2}})/2 = (1450+1400)/2 = 1425 \text{ }^\circ\text{C}$$

7) Так как сварка осуществляется за один проход, то определяем ширину шва по схеме нагрева мощным линейным быстродвижущимся источником по формуле (8):

$$e = 0,6*(0,484*259,84)/(1,10*0,1*1425) = 0,48 \text{ см} = 4,8 \text{ мм}$$

8) Определяем мгновенную скорость охлаждения при однопроводной сварке листов встык со сквозным проплавлением по формуле (16):

$$\omega_{\text{охл}} = 2*3,14*0,06*1,1*(727-20)^3 / (259,84/0,1)^2 = 21,7 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}.$$

### 2.3 Пример расчёта режимов сварки листов 6–8 мм

Рассмотрим расчёт режимов сварки листов 6–8 мм. Согласно таблице 1.7 тип сварного соединения С17 с разделкой кромок, сварка за несколько проходов. Расчёты выполнены в программе Mathcad 15.

1) По таблице 2.1 для сварки листов толщиной 6–8 мм примем сварочный ток  $I_{\text{св}} = 150 \text{ А}$ .

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

2) Определим напряжение сварочной дуги по формуле (5):

$$U_d = 10 + 0,04 * 150 = 16 \text{ В.}$$

3) Зададим значение средней скорости сварки  $v_{св} = 0,2$  см/с.

4) Примем значение КПД процесса нагрева  $\eta_n = 0,7$ .

5) Определим величину погонной энергии по формуле (6), в калориях:

$$q_n = (0,24 * 150 * 16 * 0,7) / 0,2 = 2016 \text{ кал/см,}$$

$$\text{в джоулях } q_n = 2016 / 0,24 = 8400 \text{ Дж/см.}$$

6) Задаём средние значения теплофизических свойств свариваемых материалов по таблице 2.2:

$$c\gamma = (c\gamma_1 + c\gamma_2) / 2 = (1,08 + 1,13) / 2 = 1,105 \text{ кал/(см}^3 \cdot \text{град),}$$

$$T_{пл} = (T_{пл1} + T_{пл2}) / 2 = (1450 + 1400) / 2 = 1425 \text{ }^\circ\text{C}$$

7) Глубина проплавления  $r_{пл}$  (см) определяется по расчётной схеме нагрева мощным точечным быстродвижущимся источником по формуле (10):

$$r_{пл} = 0,6 * ((2 * 2016) / (3,14 * 2,72 * 1,105 * 1425))^{0,5} = 0,33 \text{ см} = 3,3 \text{ мм,}$$

Площадь плавления определим по формуле (11):

$$F_{пл} = 3,14 * 0,33^2 / 2 = 0,17 \text{ см}^2 = 17 \text{ мм}^2.$$

8) Задаём диаметр присадочной проволоки  $d_n = 0,3$  см. Задаём среднюю скорость подачи присадочной проволоки  $v_{пн} = 0,23$  см/с.

Определим площадь сечения наплавки  $F_n$  (см<sup>2</sup>) по формуле (12):

$$F_n = 0,23 * (1 - 0,01) * 3,14 * 0,3^2 / (4 * 0,2) = 0,08 \text{ см}^2 = 8 \text{ мм}^2.$$

Определим площадь провара  $F_{пр}$  (см<sup>2</sup>) по формуле (14):

$$F_{пр} = 17-8 = 0,09 \text{ см}^2 = 9 \text{ мм}^2.$$

Площадь наплавки примерно в два раза меньше общей площади плавления, что удовлетворяет требованию соотношения (13).

9) Зададим необходимую площадь заполнения сварочным материалом для сварки листов 6–8 мм по таблице 2.3.  $F_{зап} = 32,1 \text{ мм}^2$ . Примем, что первый проход выполняется с присадочной проволокой, тогда количество проходов, определяемое по формуле (15) составит:

$$n = 32,1/8 = 4,01.$$

Примем количество проходов равное четырём.

10) Определим мгновенную скорость охлаждения при  $T_m = 727 \text{ °C}$  по формуле для определения скорости охлаждения при наплавке валика на лист толщиной  $\delta$ . Примем  $\delta = 0,8 \text{ см}$ .

Определим значение безразмерного критерия по формуле (18):

$$1/\theta = 2*2016/(3,14*0,8^2 * 1,105*(727-20)) = 2,57,$$

$1/\theta > 2,4$  поэтому определим значение безразмерного критерия по формуле (19):

$$\varpi = 2/(3,14*2,57) = 0,247$$

Определим скорость охлаждения по формуле (17):

$$\omega_{охл} = 0,247*2*3,14* 0,06*(727-20)^2 /2016 = 23,1 \text{ °C/с}.$$

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ TIG СВАРКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SYSWELD

#### 3.1 Задание условий моделирования

Целью моделирования является определение размеров сварочной ванны при сварке листов 1 мм и способе сварки TIG (дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа) путём моделирования в программном комплексе ESI SYSWELD. В расчётах использованы следующие значения погонной энергии без изменения скорости сварки:  $q_{п} = 500, 750, 1000, 1250, 1500$  Дж/см. Скорость сварки выбрана равной 0,3 см/с, что соответствует скорости сварки в аналитическом расчёте режимов сварки листов толщиной 1 мм с уровнем погонной энергии  $q_{п} = 1000$  Дж/см (таблица 2.5).

Выбор материалов в программном комплексе ESI SYSWELD ограничен, поэтому выберем наиболее подходящие материалы для моделирования по химическому составу. В качестве стали 12X18H10T примем сталь 316L. В качестве сплава Hastelloy C22 примем никелевый сплав INCONEL718. Химический состав сплава INCONEL718 согласно данным встроенного приложения Material Database представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав сплава INCONEL718. Массовая доля элементов, %

C	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Al	S	P	B	Fe
0,02- 0,08	17,0- 21,0	50,0- 55,0	2,8- 3,3	4,8- 5,5	0,7- 1,15	0,3- 0,7	$\leq 0,010$	$\leq 0,015$	0,002- 0,006	Осн.

Некоторые механические и физические свойства INCONEL718 при 20 °С:

- $\sigma_T = 700 \text{ Н/мм}^2$ ;
- Плотность  $8,1 \text{ г/см}^3$ ;
- Модуль упругости  $21,0 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$ .

Химический состав стали 316L согласно данным встроенного приложения Material Database представлен в таблице 3.2.

Некоторые механические и физические свойства 316L при 20 °С:

- $\sigma_T = 170 \text{ Н/мм}^2$ ;
- Плотность  $7,7 \text{ г/см}^3$ ;
- Модуль упругости  $20,0 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$ .

Таблица 3.2 – Химический состав стали 316L. Массовая доля элементов, %

C	<0,03
Si	<0,75
Mn	<2,0
Mo	2,5
Ni	10,0–14,0
S	<0,03
P	<0,045
Cr	16,0–18,0
Mo	2,0–3,0

Для моделирования процесса сварки была создана модель стыковой сварки листов без разделки кромок, состоящая из двух листов  $1 \times 30 \times 10 \text{ мм}$  (рисунок 3.1). Сварка будет производиться вдоль оси X от начала координат. По направлению оси Y и от начала координат расположен материал 316L. В противоположную сторону от оси Y и от начала координат расположен материал INCONEL718.

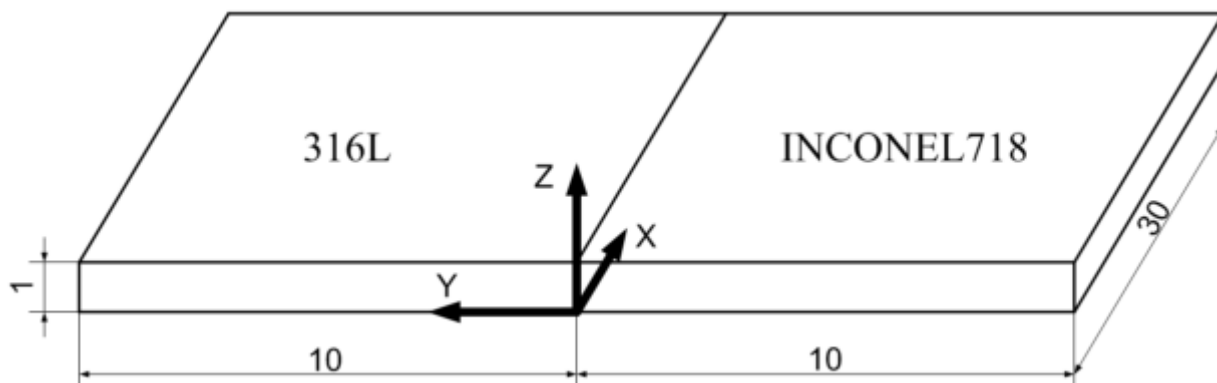


Рисунок 3.1 – Модель стыковой сварки

Для моделирования заданы коллекторы основных материалов, коллектор зоны термического влияния. Коллектором поверхности охлаждения является вся поверхность сборки, охлаждение на воздухе. Коллектором закрепления являются боковые кромки сборки (рисунок 3.2), закрепление жёсткое.

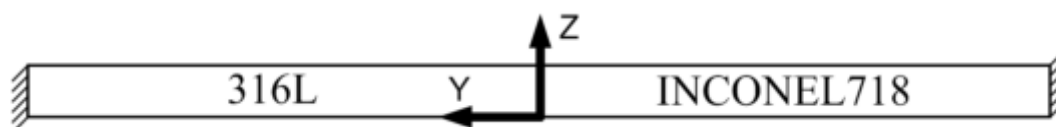


Рисунок 3.2 – Закрепление модели

Траектория сварки проходит по линии сопряжения двух материалов (рисунок 3.3).

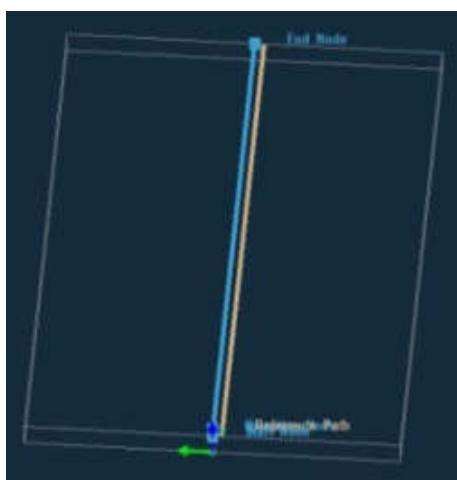


Рисунок 3.3 – Траектория сварки

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



В режимах сварки указан способ сварки ТIG. Значения погонной энергии и размеры модели источника тепла изменялись согласно таблице 3.3. Значение скорости сварки оставалось неизменным и составляло 0,3 см/с. Источником тепла для сварки является модель Голдака, представленная на рисунке 3.4.

Таблица 3.3 – Значения погонной энергии и размеры модели источника тепла

Номер опыта	1	2	3	4	5
Погонная энергия $q_{п}$ Energy/Unit length, Дж/см	500	750	1000	1250	1500
Длина модели источника тепла Length, мм	2,5	2,75	3	3,25	3,5
Ширина модели источника тепла Width, мм	1,5	1,75	2	2,25	2,5
Глубина модели источника тепла Penetration, мм	1,5	1,75	2	2,25	2,5

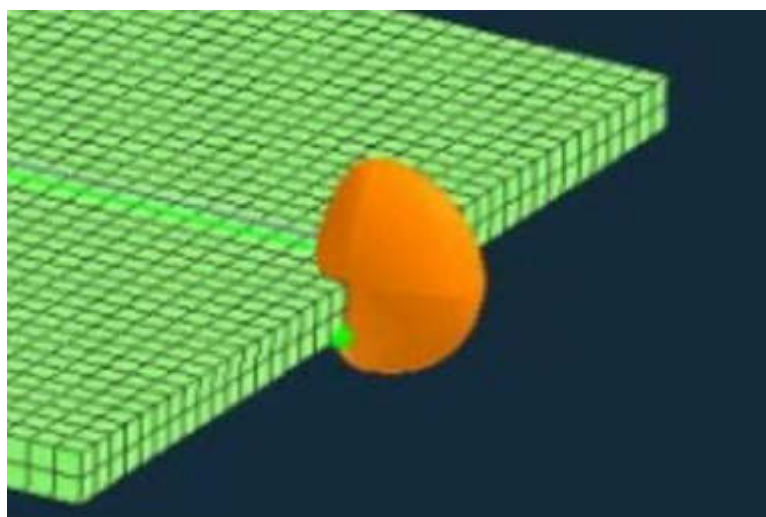


Рисунок 3.4 – Модель источника тепла

### 3.2 Результаты моделирования TIG сварки

Результат решения температурной задачи с погонной энергией  $q_{II}=1000$  Дж/см представлен на рисунке 3.5.

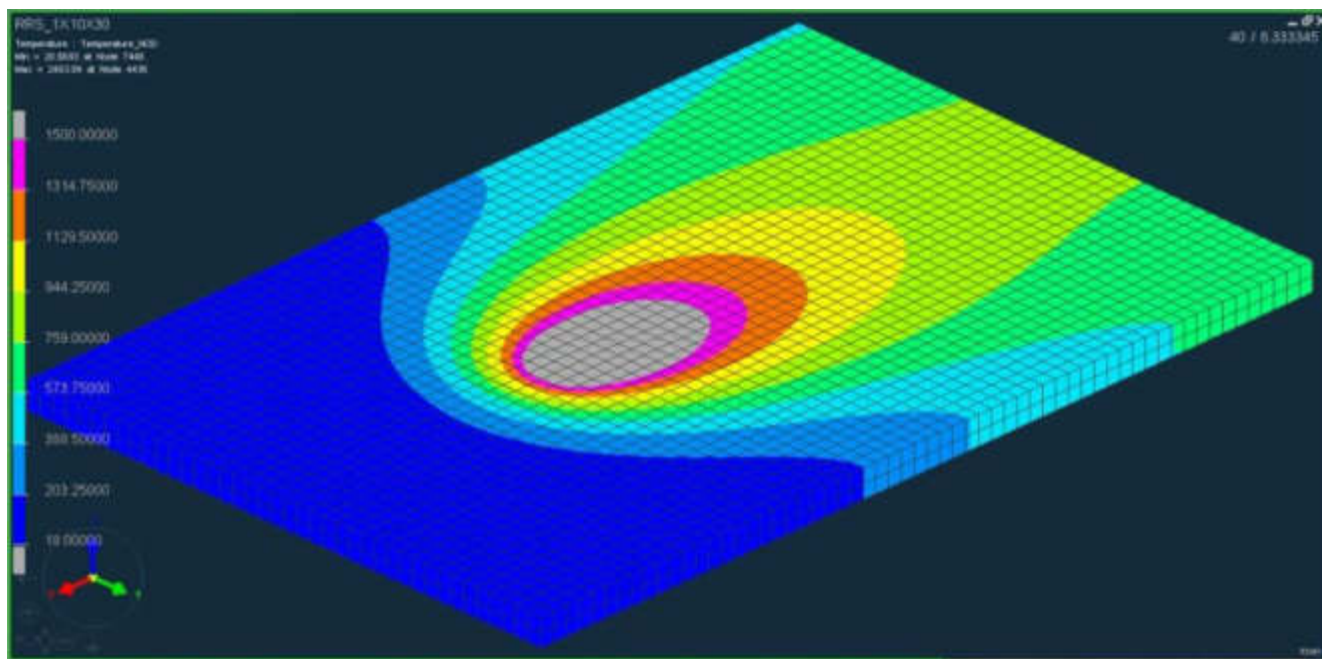


Рисунок 3.5 – Результат решения температурной задачи

Здесь серым цветом обозначена область превышающая  $1500^{\circ}\text{C}$ , которая Примем в качестве зоны сварочной ванны область с температурой выше  $1500^{\circ}\text{C}$ . Расположим результат моделирования на виде сверху и с помощью специального инструмента измерим ширину и длину сварочной ванны (рисунках 3.6, 3.7).

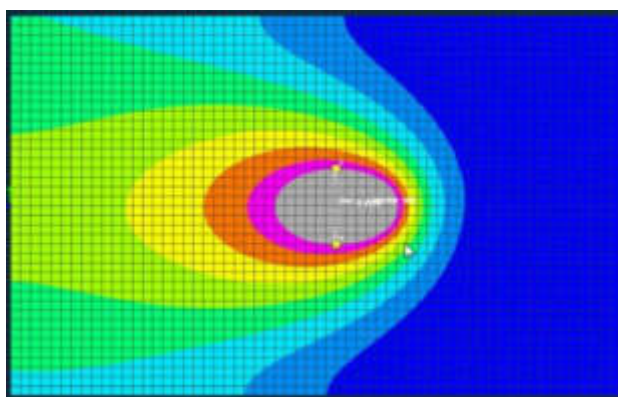


Рисунок 3.6 – Измерение ширины сварочной ванны

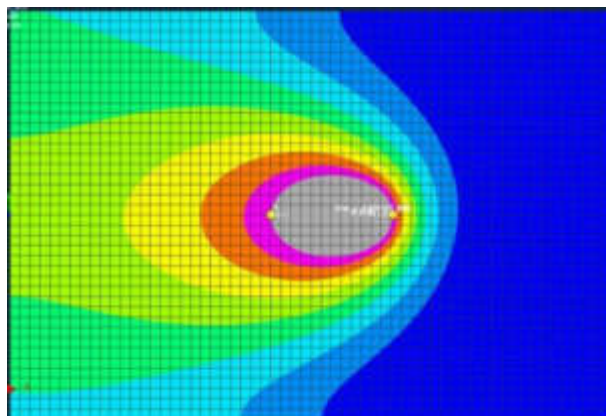


Рисунок 3.7 – Измерение длины сварочной ванны

Размеры сварочной ванны и максимальной температуры при различных значениях погонной энергии представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты измерения размеров сварочной ванны

Номер опыта	1	2	3	4	5
Погонная энергия $q_{п}$ , Дж/см	500	750	1000	1250	1500
Ширина сварочной ванны сверху $e_{в}$ , мм	0,9	2,8	4,0	5,0	5,8
Ширина сварочной ванны снизу $e_{н}$ , мм	0,6	2,8	4,0	5,0	5,8
Длина сварочной ванны сверху $l_{в}$ , мм	1,5	4,2	6,1	7,7	9,0
Максимальная температура сварочной ванны $T_{max}$ , °C	1602	2097	2493	2800	3050

Графики размеров длины сварочной ванны ( $l_{в}$ ) и ширины сварочной ванны ( $e_{в}$ ) на верхней стороне пластины при разных значениях погонной энергии представлены на рисунке 3.8.

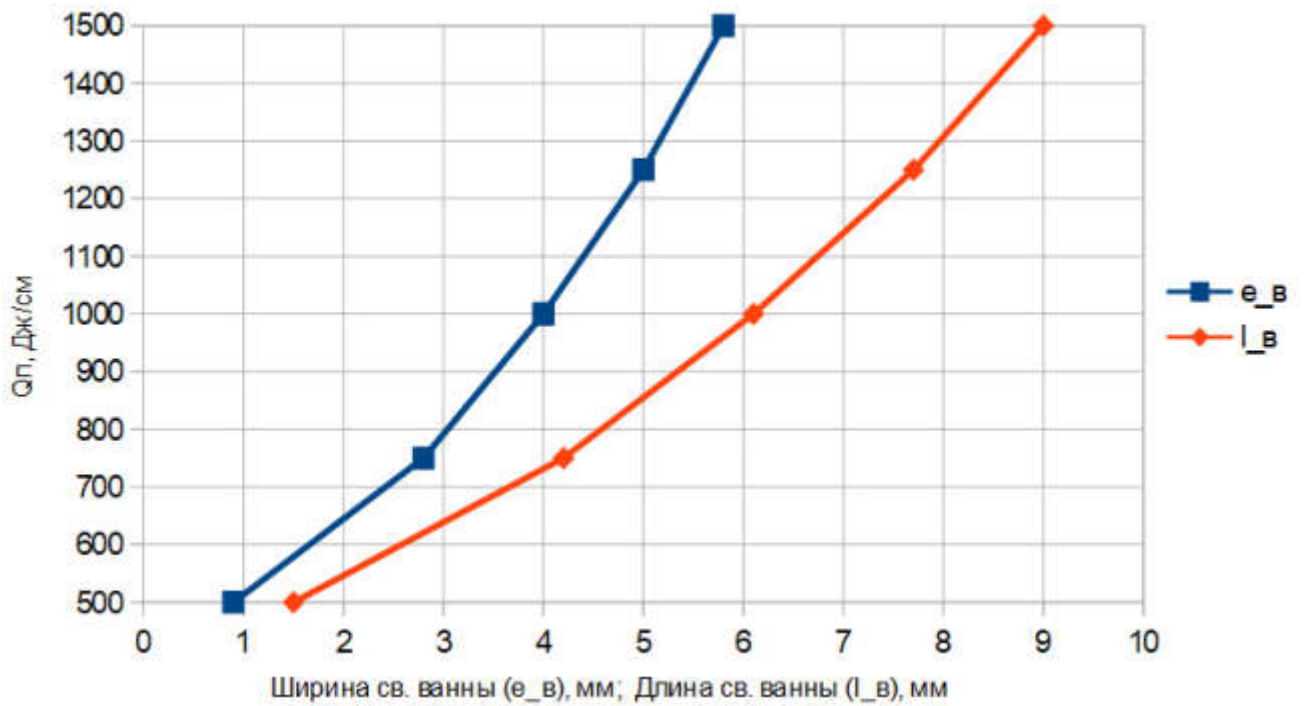


Рисунок 3.8 – Размеры сварочной ванны при разных значениях погонной энергии

Результат решения механической задачи с погонной энергией  $q_{п}=1000$  Дж/см представлен на рисунке 3.9.

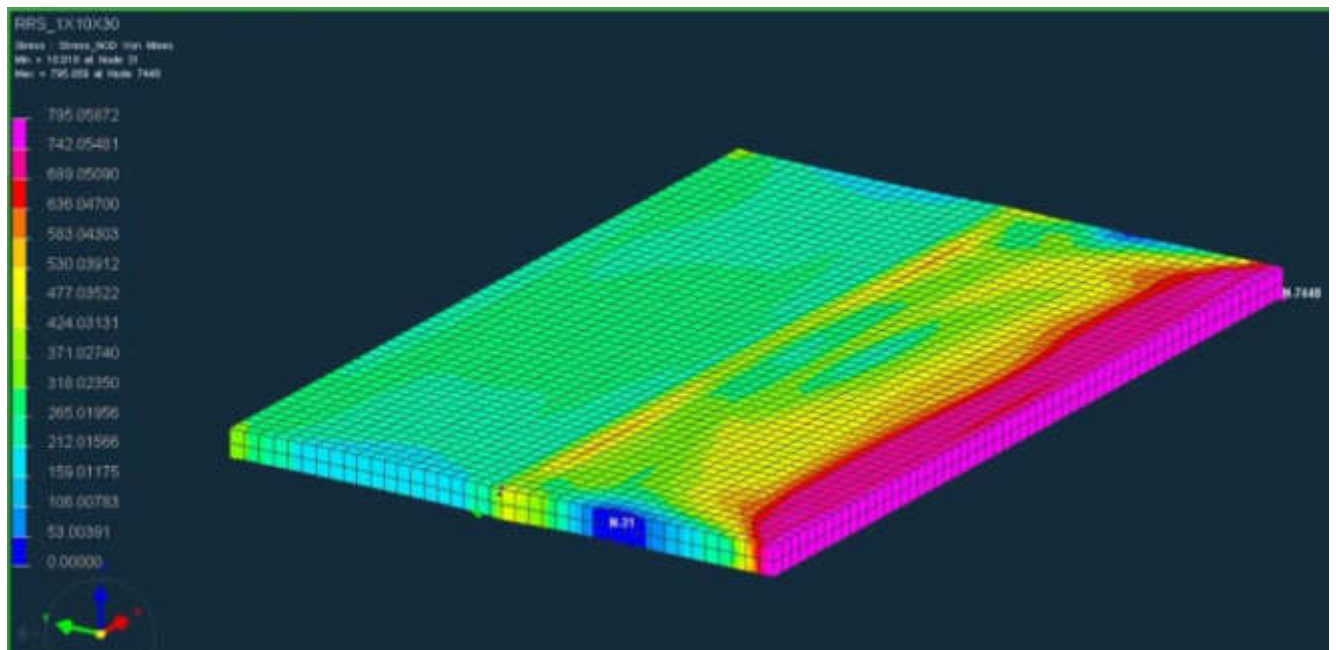


Рисунок 3.9 – Напряжения по Мизесу

Максимальные напряжения по Мизесу составляют 795 МПа (розовый цвет) и расположены в месте закрепления более высокопрочного материала INCONEL718.

Деформации по Мизесу представлены на рисунке 3.10. Максимальные деформации составляют 0,15 и расположены на линии сплавления со стороны менее прочного материала 316L.

По результатам моделирования (таблица 3.4 и рисунок 3.8) можно прийти к выводу, что для обеспечения сварного соединения достаточно использовать режим сварки с  $q_{п} = 500$  Дж/см. Но с практической точки зрения необходимо иметь некоторый запас по ширине сварочной ванны и погонной энергии, чтобы компенсировать технологические неточности режимов сварки. Поэтому оптимальным режимом сварки является режим с погонной энергией не  $q_{п} = 750$  Дж/см.

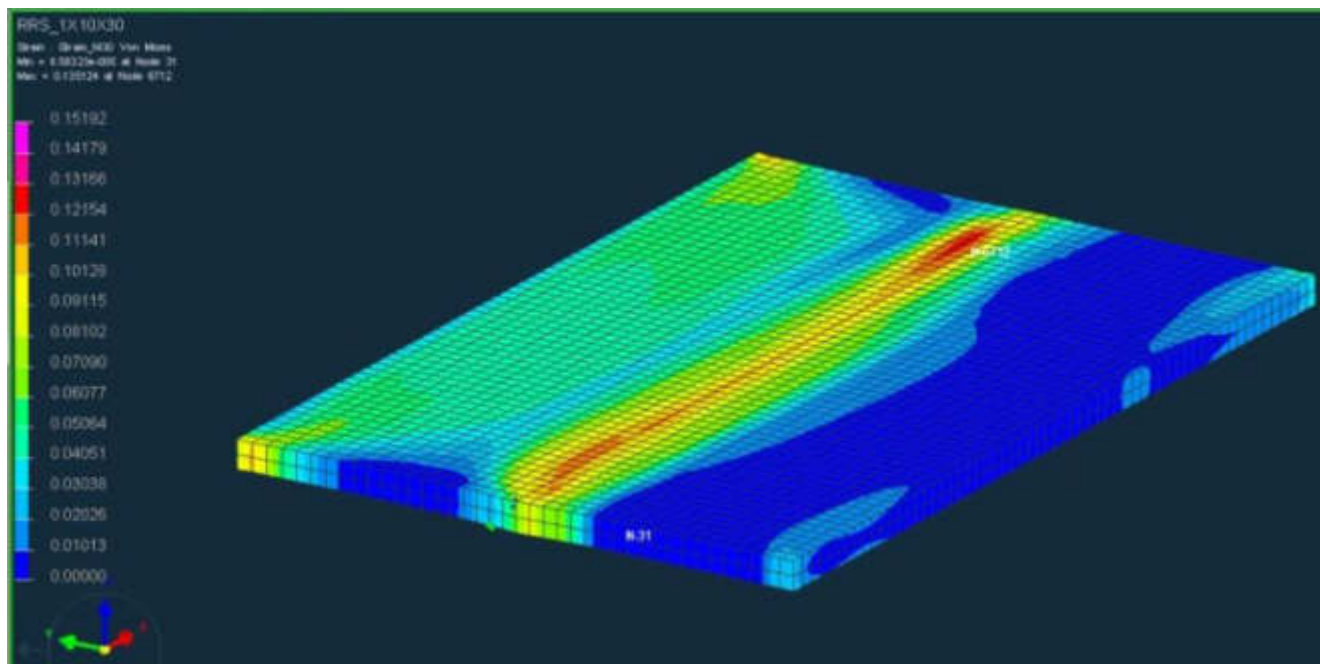


Рис. 3.10 – Деформации по Мизесу

Результат моделирования по опыту №3 даёт ширину шва  $e_b = 4,0$  мм при  $q_{п} = 1000$  Дж/см, что достаточно хорошо соответствует аналитическому расчёту режимов сварки листов 1-1 мм, при котором ширина шва  $e = 4,8$  мм и  $q_{п} = 1083$  Дж/см (таблица 2.5).

## 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

### 4.1 Определение механических свойств металла шва

Целью исследования является выбор сварочной проволоки из трёх вариантов согласно таблице 1.8, при использовании которой получается наиболее прочное сварное соединение. В соответствии с ГОСТ 6996–66 [40] одним из основных способов определения качества продукции и показателей свариваемости металлов является испытание сварного соединения на статическое растяжение. С целью экономии материальных средств и сокращения времени, требуемое на проведение предварительных испытаний, реальные испытания сварных соединений на статическое растяжение заменены моделированием в программном комплексе ANSYS Workbench [41].

Для проведения моделирования необходимо определить механические свойства металла сварного шва. Определим химический состав сварного шва, по справочным данным подберём наиболее подходящую марку материала и используем механические свойства данных материалов для задания механических свойств исследуемых сварных соединений.

Расчёт химического состава сварного шва произведём графическим способом. Площади сечения основных металлов  $F_A$ ,  $F_B$  и сварочных материалов  $F_B$ , участвующих в процессе сварки представлены на рисунках 4.1, 4.2, 4.3.

Расчёт содержания каждого химического элемента произведём по формуле:

$$X_{шв} = X_A \cdot (F_A / (F_A + F_B + F_B)) + X_B \cdot (F_B / (F_A + F_B + F_B)) + X_B \cdot (F_B / (F_A + F_B + F_B)), \quad (20)$$

где  $X_{шв}$ ,  $X_A$ ,  $X_B$ ,  $X_B$  – массовая доля химического элемента (%) соответственно в металле шва, в основном металле А, Б и в сварочном материале В.

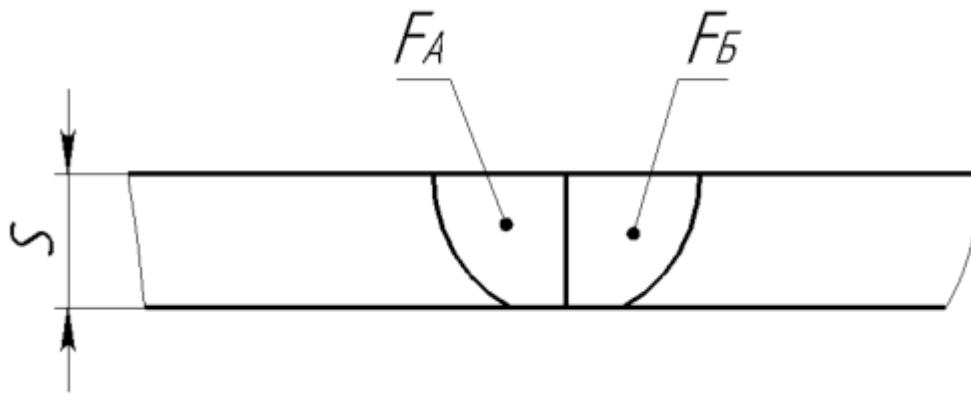


Рисунок 4.1 – Сварка листов 1–1 мм

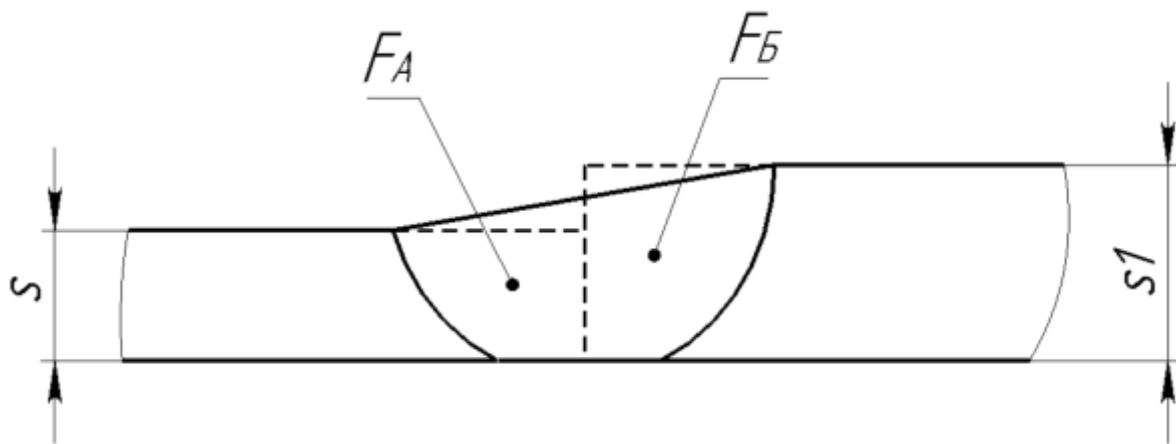


Рисунок 4.2 – Сварка листов 2–3, 3–4 мм

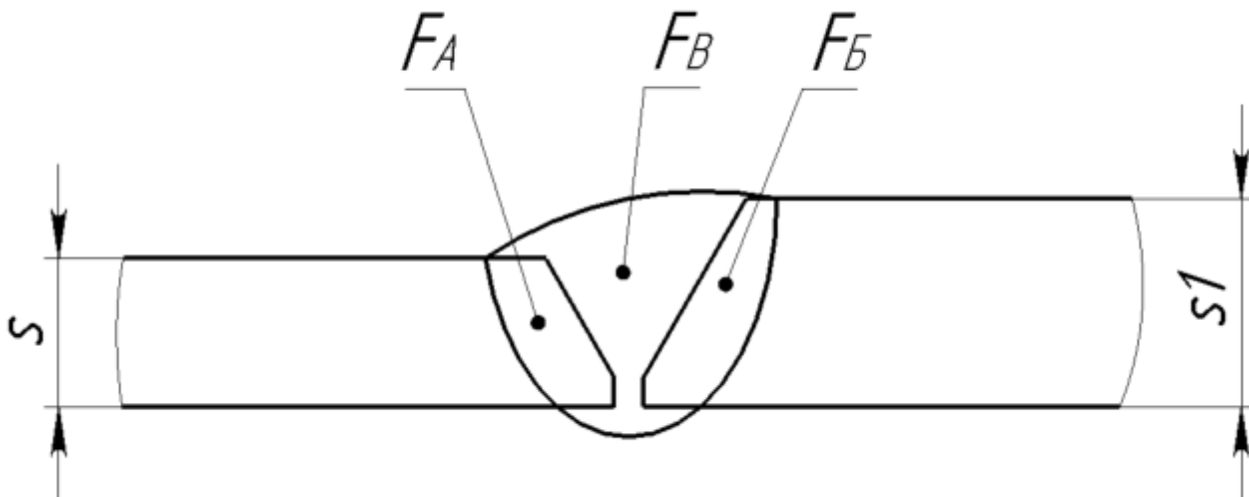


Рисунок 4.3 – Сварка листов 4–6, 5–7, 6–8 мм

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2020.180.00 ПЗ

В таблице 4.1 представлен химический состав (%) и механические свойства (при 20 °С) материалов ХН63МБ и 12Х18Н10Т [16, 42].

Таблица 4.1 – Химический состав свариваемых материалов, %

	ХН63МБ Материал А	12Х18Н10Т Материал Б
Углерод (–/С)	Не более 0,020	Не более 0,12
Кремний (С/Si)	Не более 0,10	Не более 0,80
Марганец (Г/Mn)	Не более 0,50	Не более 2,00
Хром (Х/Cr)	19,00–21,00	17,00–19,00
Никель (Н/Ni)	63 (Осн.)	9,00–11,00
Титан (Т/Ti)	0,01–0,16	0,6–0,80
Алюминий (Ю/Al)	Не более 0,25	–
Вольфрам (В/W)	–	–
Молибден (М/Mo)	15,00–16,50	–
Ниобий (Б/Nb)	0,02–0,10	–
Ванадий (Ф/V)	–	–
Железо (–/Fe)	Не более 0,50	68 (Осн.)
Сера (–/S) не более	0,020	0,02
Фосфор (П/P) не более	0,025	0,04
Прочие	Магний (Mg) не более 0,05	–
$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> не менее	353	200 ( $\sigma_{0,2}$ )
$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> не менее	755	520
E, Н/мм <sup>2</sup>	20·10 <sup>4</sup>	18·10 <sup>4</sup>



В таблице 4.2 представлен химический состав (%) и механические свойства (при 20 °С) сварочных материалов ОК Tigrod 308LSi, ОК Tigrod NiCr-3, ОК Tigrod 385 [23].

Таблица 4.2 – Химический состав сварочных материалов, %

	ОК Tigrod 308LSi Материал В1	ОК Tigrod NiCr-3 Материал В2	ОК Tigrod 385 Материал В3
Углерод (–/С)	Не более 0,03	Не более 0,05	Не более 0,025
Кремний (С/Si)	0,65–1,00	Не более 0,25	Не более 0,50
Марганец (Г/Mn)	1,40–2,10	2,50–3,50	1,40–2,20
Хром (Х/Cr)	19,5–21,0	18,0–22,0	19,5–21,5
Никель (Н/Ni)	9,0–11,0	67,0 (Осн.)	24,0–26,0
Титан (Т/Ti)	–	Не более 0,70	–
Алюминий (Ю/Al)	–	–	–
Вольфрам (В/W)	–	–	–
Молибден (М/Mo)	–	–	4,20–5,20
Ниобий (Б/Nb)	–	2,3–3,0	–
Ванадий (Ф/V)	–	–	–
Железо (–/Fe)	67 (Осн.)	Не более 1,50	46 (Осн.)
Сера (–/S) не более	0,020	0,010	0,020
Фосфор (П/P) не более	0,030	0,010	0,020
Прочие	–	Кобальт (Co) не более 0,05; Медь (Cu) 1,20–2,20	Медь (Cu) 1,20–2,20
$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> не менее	480	420	340
$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> не менее	625	650	540
E, Н/мм <sup>2</sup>	–	–	–

Химический состав металла шва (%) согласно рисункам 4.1, 4.2 представлен в таблице 4.3. Подбор наиболее близких аналогов материалов производился по справочнику [17]. Также в таблице 4.3 представлены механические свойства материалов аналогов.

Таблица 4.3 – Результат расчёта химического состава (%) металла шва

	Металл шва по Рис. 4.1	Металл шва по Рис. 4.2
Углерод (-/C)	0,07	0,08
Кремний (C/Si)	0,45	0,54
Марганец (Г/Mn)	1,25	1,45
Хром (X/Cr)	19,00	18,74
Никель (H/Ni)	36,30 (Осн.)	29,46
Титан (Т/Ti)	0,42	0,49
Алюминий (Ю/Al)	0,13	0,09
Вольфрам (В/W)	0,00	0,00
Молибден (М/Mo)	7,88	5,83
Ниобий (Б/Nb)	0,03	0,02
Ванадий (Ф/V)	0,00	0,00
Железо (-/Fe)	34,41	43,23 (Осн.)
Сера (-/S) не более	0,02	0,02
Фосфор (П/P) не более	0,03	0,03
Прочие	Магний (Mg) 0,03	Магний (Mg) 0,02
<i>Соответствует:</i>	ХН40МДБ	06ХН28МДТ
$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> не менее	275	220
$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> не менее	635	550
E, Н/мм <sup>2</sup>	21,2·10 <sup>4</sup>	19,1·10 <sup>4</sup>

Химический состав металла шва (%) согласно рисунку 4.3 представлен в таблице 4.4. Подбор наиболее близких аналогов материалов производился по справочнику [17]. Также в таблице 4.4 представлены механические свойства материалов аналогов.

Таблица 4.4 – Результат расчёта химического состава (%) металла шва

	Металл шва по рис. 4.3		
	OK Tigrod 308LSi Материал В1	OK Tigrod NiCr-3 Материал В2	OK Tigrod 385 Материал В3
Углерод (-/C)	0,05	0,06	0,05
Кремний (C/Si)	0,65	0,35	0,48
Марганец (Г/Mn)	1,51	2,16	1,54
Хром (X/Cr)	19,65	19,52	19,78
Никель (H/Ni)	22,62	53,86 (Осн.)	30,42
Титан (Т/Ti)	0,20	0,56	0,20
Алюминий (Ю/Al)	0,06	0,06	0,06
Вольфрам (В/W)	0	0,00	0,00
Молибден (М/Mo)	3,78	3,78	6,22
Ниобий (Б/Nb)	0,01	1,39	0,01
Ванадий (Ф/V)	0	0,00	0,00
Железо (-/Fe)	51,41 (Осн.)	17,30	40,30 (Осн.)
Сера (-/S) не более	0,02	0,01	0,02
Фосфор (П/P) не более	0,03	0,02	0,03
Прочие	Магний (Mg) 0,01	Магний (Mg) 0,01 Кобальт (Co) 0,03 Медь (Cu) 0,88	Магний (Mg) 0,01
Соответствует:	03Х21Н21М4ГБ	ХН55МБЮ	06ХН28МДТ
$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> не менее	294	550	220
$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> не менее	607	950	550
E, Н/мм <sup>2</sup>	18·10 <sup>4</sup>	20,6·10 <sup>4</sup>	19,1·10 <sup>4</sup>

## 4.2 Результаты моделирования статического растяжения

Свойства материалов при моделировании задавались двумя параметрами: предел текучести (Yield Strength)  $\sigma_T$  или  $\sigma_{0,2}$ , МПа; модуль упругости (Young's Modulus)  $E$ ,  $10^{11}$  Па. Остальные параметры приняты как у конструкционной стали (Structural steel). Схема моделирования статического растяжения представлена на рисунке 4.4. Нагрузка за 1 секунду равномерно нарастает от 0 до 300 МПа. Решение останавливается в момент времени, когда не остаётся элементов с упругой деформацией и начинается чисто пластическая деформация. Данный момент времени от 0 до 1 секунды, при котором произошло разрушение модели, пропорционален нагрузке от 0 до 300 МПа. Таким способом определяется напряжение разрушения модели.

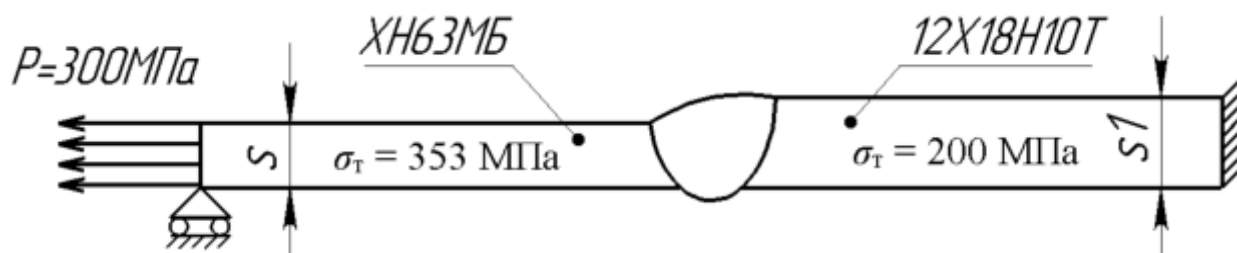


Рисунок 4.4 – Схема моделирования статического растяжения.

Механические свойства материалов описываются диаграммой растяжения представленной на рисунке 4.5, например, для стали 12Х18Н10Т.

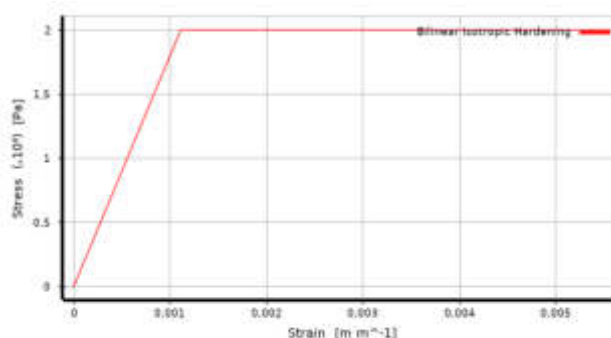


Рисунок 4.5 – Диаграмма растяжения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Результаты моделирования растяжения сварного соединения согласно рисунку 4.1 представлены на рисунках 4.6, 4.7.

Материалы: ХН63МБ –  $s=2$  мм (слева); 12Х18Н10Т –  $s=2$  мм (справа).

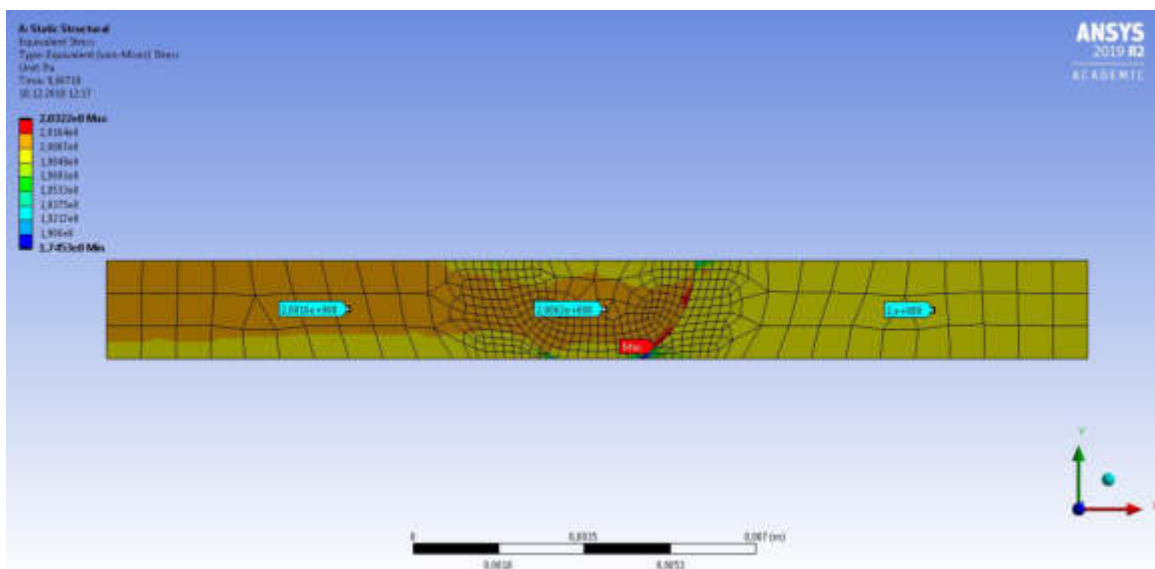


Рисунок 4.6 – Эквивалентные напряжения по Мизесу,  $Max = 203$  МПа  $Min = 174,5$  МПа

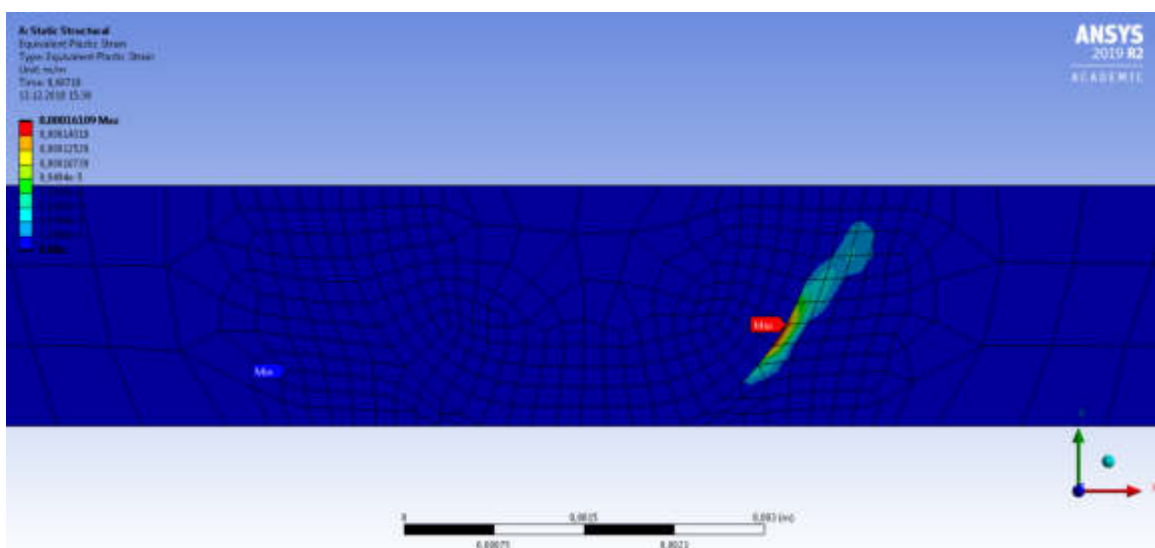


Рисунок 4.7 – Эквивалентные пластические деформации,  $Max = 0,00016$

Разрушение образца произошло при напряжении 200,2 МПа. Разрушение произошло по границе шва со стороны материала 12Х18Н10Т.

Результаты моделирования растяжения сварного соединения согласно рисунку 4.2 представлены на рисунках 4.8, 4.9.

Материалы: ХН63МБ –  $s=2$  мм; 12Х18Н10Т –  $s=3$  мм.

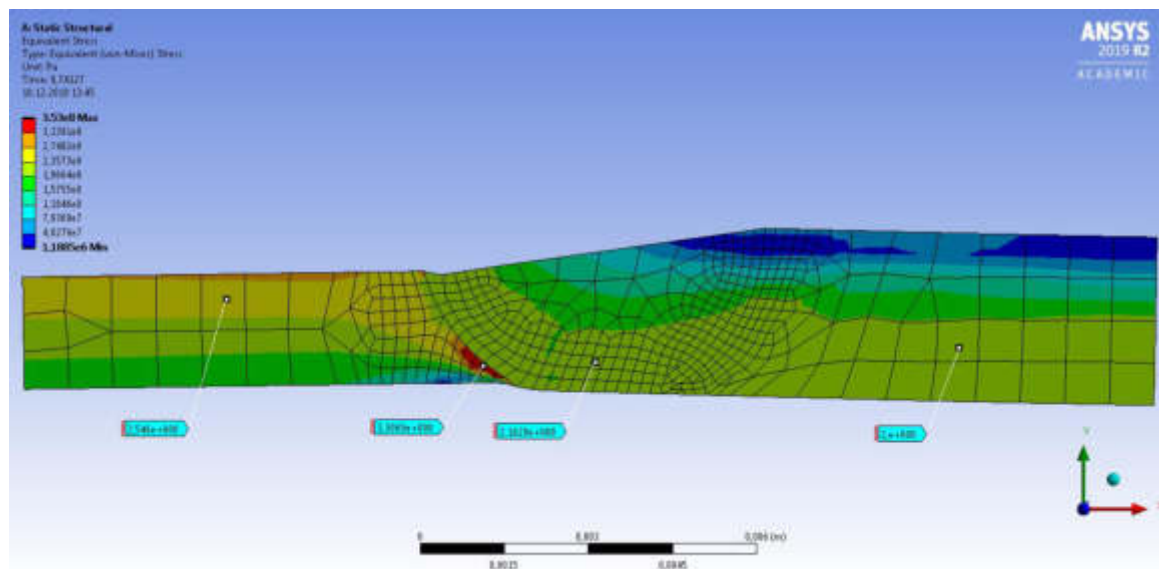


Рисунок 4.8 – Эквивалентные напряжения по Мизесу,  $Max = 353$  МПа  $Min = 118,9$  МПа

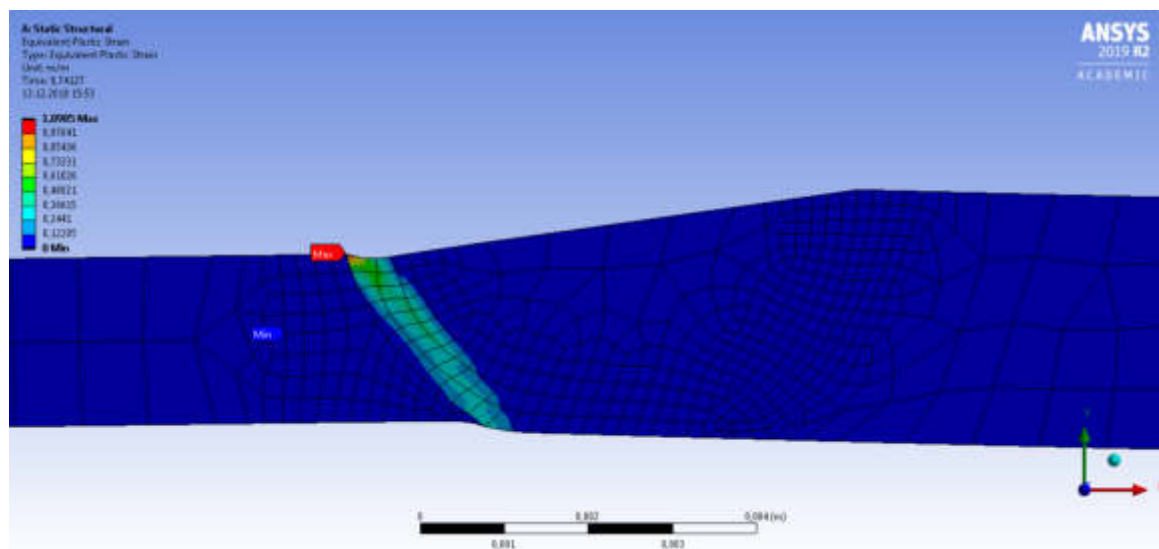


Рисунок 4.9 – Эквивалентные пластические деформации,  $Max = 1,099$

Разрушение образца произошло при напряжении 222,4 МПа. Разрушение произошло по сварному шву в его самой тонкой части.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2020.180.00 ПЗ

Лист

49

Результаты моделирования растяжения сварного соединения согласно рисунку 4.3 представлены на рисунках 4.10, 4.11. Материалы: ХН63МБ –  $s=5$  мм; 12Х18Н10Т –  $s=7$  мм. Присадочная проволока: ОК Tigrod 308LSi.

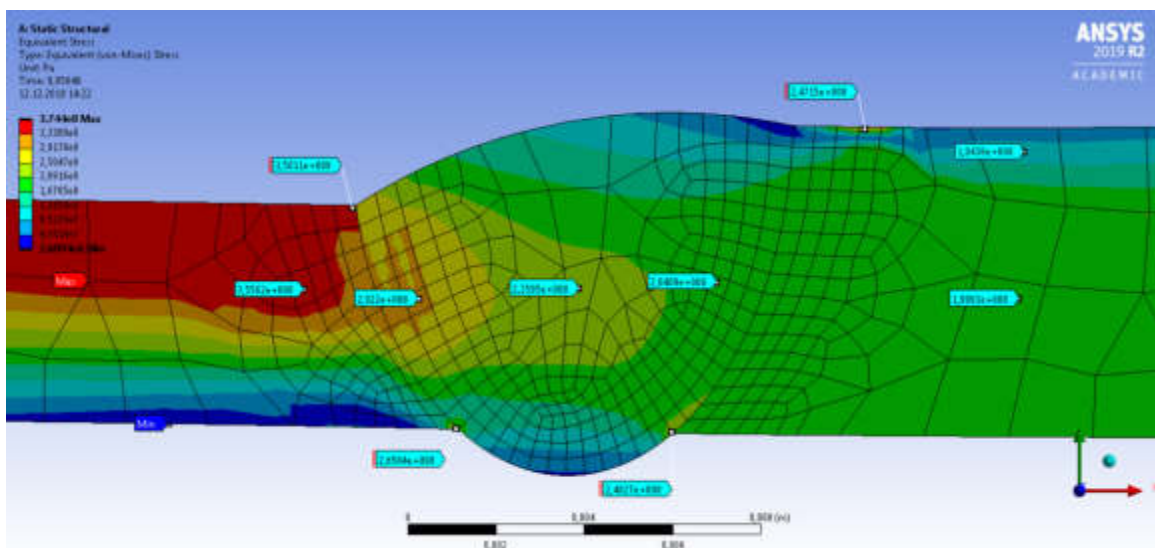


Рисунок 4.10 – Эквивалентные напряжения по Мизесу,  $Max = 374,4$  МПа  $Min = 2,6$  МПа

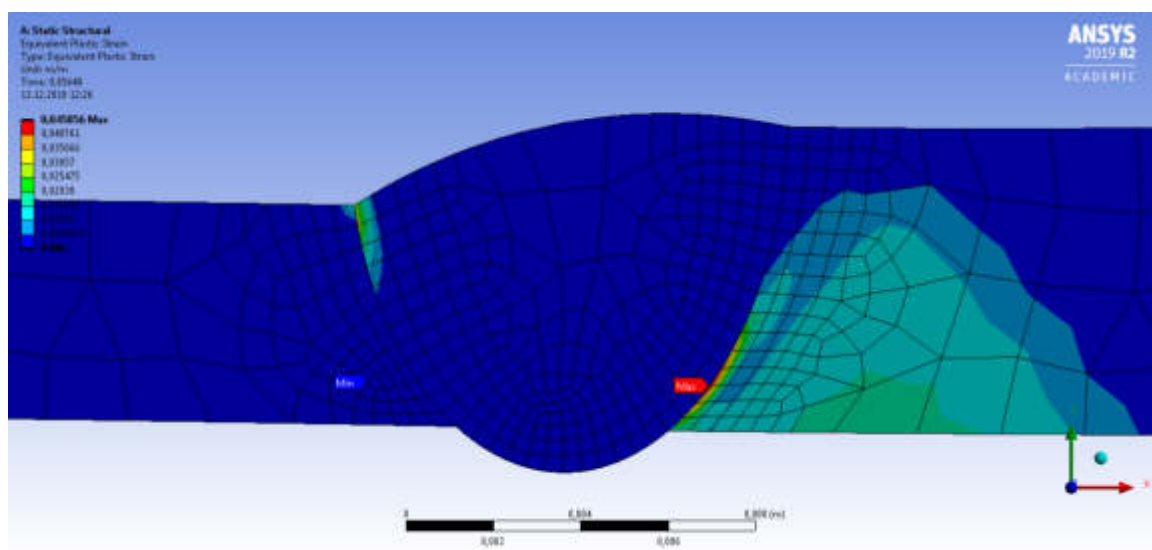


Рисунок 4.11 – Эквивалентные пластические деформации,  $Max = 0,046$

Разрушение образца произошло при напряжении 256,9 МПа. Разрушение произошло по границе шва со стороны материала 12Х18Н10Т, по основному материалу 12Х18Н10Т и частично по сварному шву в его самой тонкой части.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2020.180.00 ПЗ

Лист

50

Результаты моделирования растяжения сварного соединения согласно рисунку 4.3 представлены на рисунках 4.12, 4.13. Материалы: ХН63МБ –  $s=5$  мм; 12Х18Н10Т –  $s=7$  мм. Присадочная проволока: ОК Tigrod NiCr-3.

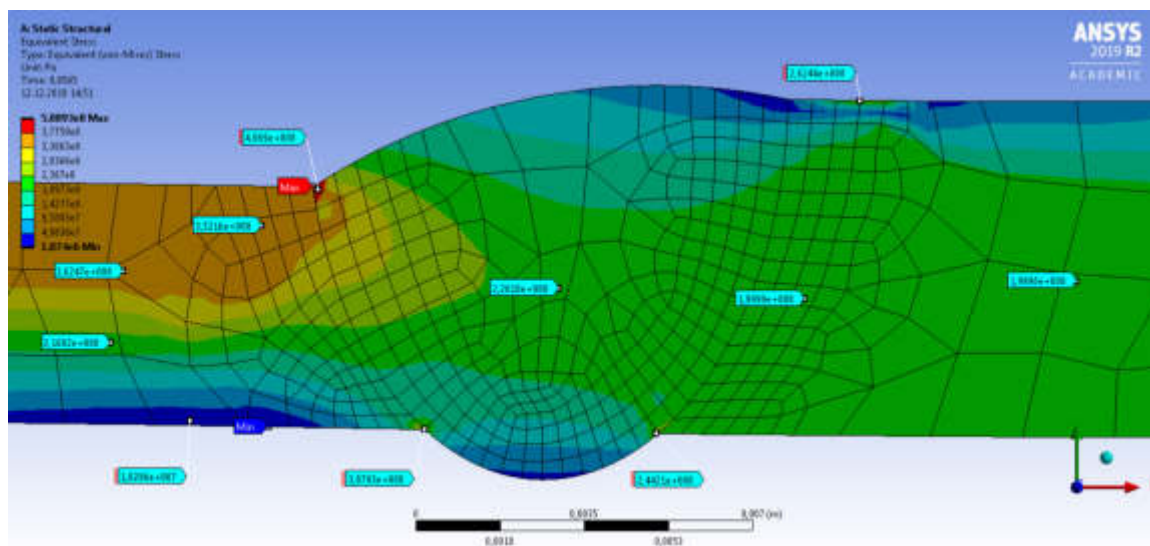


Рисунок 4.12 – Эквивалентные напряжения по Мизесу,  $Max = 588,9$  МПа  $Min = 1,9$  МПа

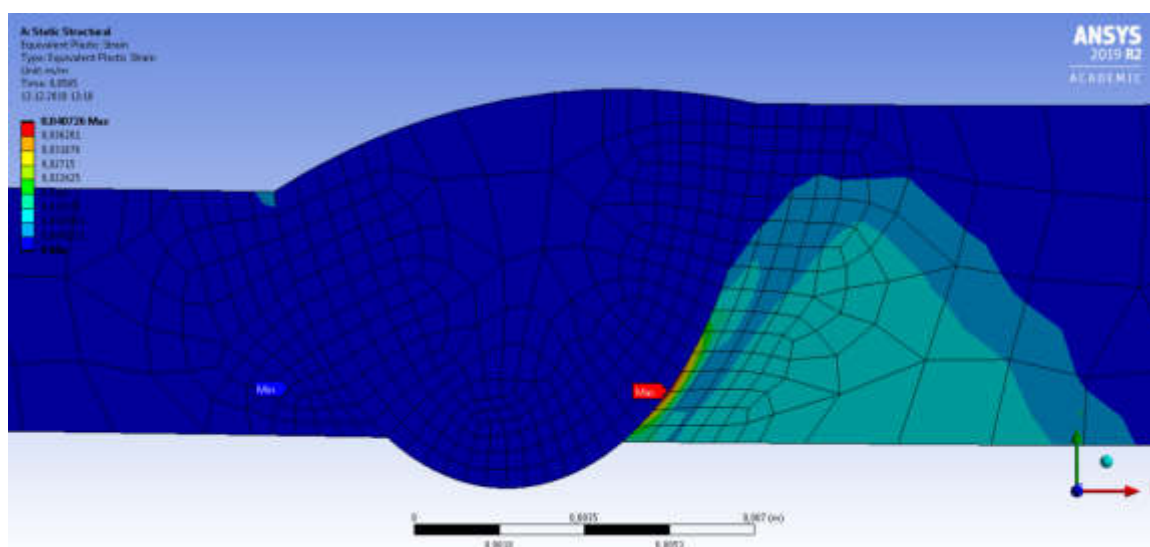


Рисунок 4.13 – Эквивалентные пластические деформации,  $Max = 0,041$

Разрушение образца произошло при напряжении 257,0 МПа. Разрушение произошло по границе шва со стороны материала 12Х18Н10Т и по основному материалу 12Х18Н10Т.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2020.180.00 ПЗ

Лист

51



Результаты моделирования растяжения сварного соединения согласно рисунку 4.3 представлены на рисунках 4.14, 4.15. Материалы: ХН63МБ –  $s=5$  мм; 12Х18Н10Т –  $s=7$  мм. Присадочная проволока: ОК Tigrod 385.

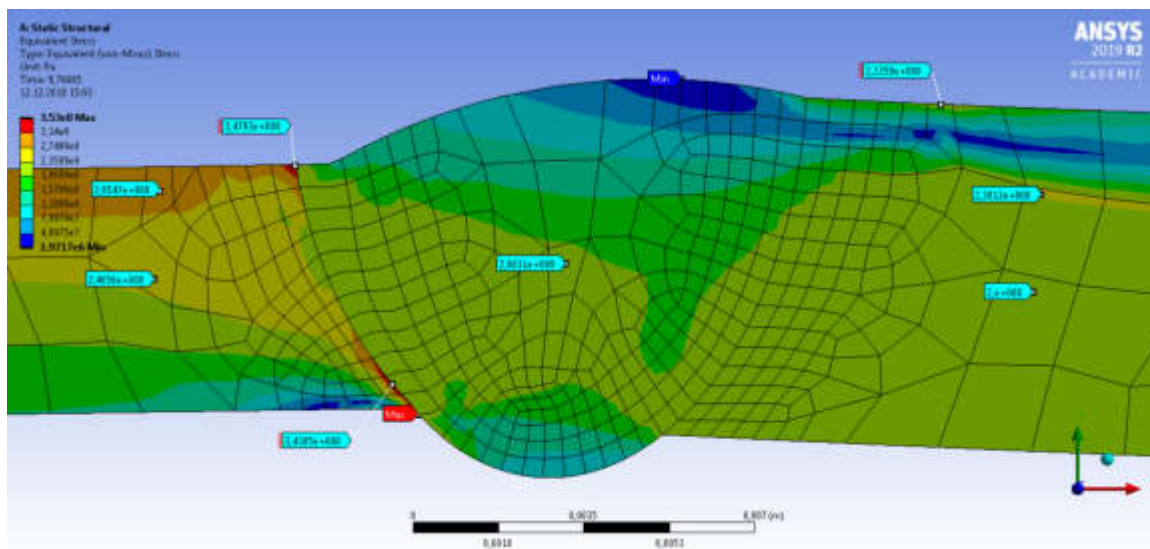


Рисунок 4.14 – Эквивалентные напряжения по Мизесу,  $Max = 353$  МПа  $Min = 2,0$  МПа

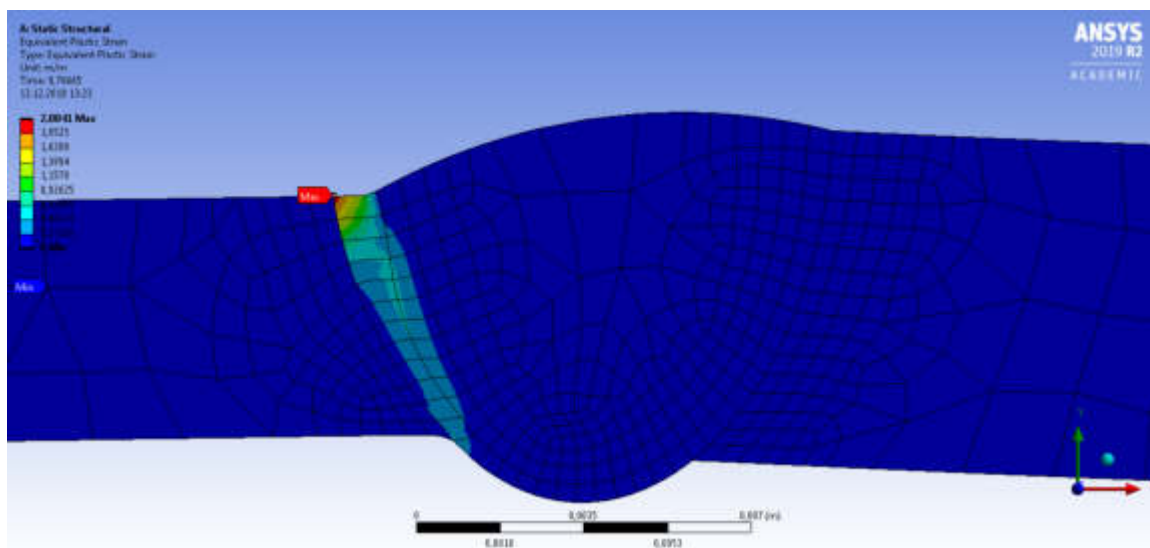


Рисунок 4.15 – Эквивалентные пластические деформации,  $Max = 2,084$

Разрушение образца произошло при напряжении 230,0 МПа. Разрушение произошло по сварному шву в его самой тонкой части.

Результаты моделирования статического растяжения сварных соединений представлены в таблице 4.5. Для материала ХН63МБ принято  $\sigma_T = 353$  МПа, для материала 12Х18Н10Т принято  $\sigma_T = 200$  МПа. Согласно схеме моделирования статического растяжения (рисунок 4.4) в материалах с разной толщиной создаётся разное напряжение, при котором происходит разрушение модели. По соотношению (1) определены напряжения, которые создаются в листах с большей толщиной. Для данных листов, выполненных из материала 12Х18Н10Т, в таблице 4.5 представлены соответствующие напряжения при разрушении модели. При моделировании листов одинаковой толщины напряжения разрушения равны.

Таблица 4.5 – Напряжения разрушения модели

Толщина листов s-s1, мм	Сварочная проволока	Напряжение при разрушении в листе ХН63МБ, МПа	Напряжение при разрушении в листе 12Х18Н10Т, МПа
2-2	без сварочной проволоки	200,2	200,2
2-3	без сварочной проволоки	222,4	148,3
5-7	OK Tigrod 308LSi (аналог 03Х18Н11)	256,9	183,5
5-7	OK Tigrod NiCr-3 (аналог ХН60ВТ)	257,0	183,6
5-7	OK Tigrod 385 (аналог 06ХН28МДТ)	230,0	164,3

При сварке листов ХН63МБ и 12Х18Н10Т одинаковой толщины прочность сварного соединения ограничивается свойствами менее прочного материала 12Х18Н10Т ( $\sigma_T = 200$  МПа). Увеличение толщины менее прочного материала согласно п. 7 ГОСТ 14771-76 позволяет лучшим образом использовать свойства свариваемых материалов. Применение сварочных проволок OK Tigrod 308LSi и

OK Tigrod NiCr-3 даёт одинаковый результат при моделировании статического растяжения. Значительно худший вариант при моделировании статического растяжения даёт применение сварочной проволоки OK Tigrod 385 и её применение можно считать нецелесообразным. Применение проволоки OK Tigrod 308LSi позволит существенно снизить затраты на сварочные материалы, так как стоимость проволоки из нержавеющей стали примерно в три раза меньше стоимости проволоки из никелевого сплава.

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учётом производственной необходимости целью работы являлось освоение технологии сварки разнородных материалов из сплава Hastelloy C22 и стали 12X18H10T с помощью способа сварки TIG. В работе произведён обзор источников литературы по исследуемой тематике. Представлена характеристика свариваемых материалов, выбрана конструкция сварных соединений, которая соответствует особенностям вновь разрабатываемого оборудования. По справочным данным произведён выбор трёх типов сварочных материалов и по диаграмме Шеффлера проанализирована структура металла шва. Рассмотрен выбор методики расчёта режимов TIG сварки и произведён расчёт режимов сварки для листов толщиной от 1 до 8 мм. В работе осуществлено моделирование TIG сварки в программном комплексе SYSWELD, результат моделирования сварки листов толщиной 1 мм достаточно хорошо соответствуют результату аналитического расчёта. Определён химический состав металла шва с помощью соотношения площадей расплавленных металлов. По химическому составу металла шва подобраны аналогичные материалы и по справочным данным этих материалов определены механические свойства металла шва. С использованием полученных механических свойств металла шва произведено моделирование статического растяжения сварных соединений в программном комплексе ANSYS. По результатам моделирования произведён выбор наиболее подходящего сварочного материала из трёх вариантов. Рекомендовано использовать в качестве сварочного материала проволоку ОК Tigrod 308LSi.

										Лист
										55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2020.180.00 ПЗ					

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 14771–76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: Изд–во стандартов, 1991. – 49 с.
2. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад Б. Е. Патона М., «Машиностроение», 1974. 768 с.
3. Закс И. А. Сварка разнородных сталей. Л., «Машиностроение». 1973 г. 208 с.
4. Wiednig, C. Dissimilar electron beam welding of nickel base alloy 625 and 9% Cr steel / C. Wiednig, C. Lochbichler, N. Enzinger, C. Beal, C. Sommitsch // Procedia Engineering. – 2014. – V. 86. – P. 184 – 194.
5. Debidutta, Mishra. Mechanical characterization of MONEL 400 and 316 stainless steel weldments / Debidutta Mishra, M.K. Vignesh , B. Ganesh Raj, Pruthvi Srungavarapu, K. Devendranath Ramkumar, N. Arivazhagan, S. Narayanan // Procedia Engineering. – 2014. – V. 75. – P. 24 – 28.
6. Гончаров, А.Л. Снижение степени структурной и механической неоднородности сварных соединений разнородных сталей на основе совершенствования технологии ЭЛС.: автореферат дис. ... канд. техн. наук / А.Л. Гончаров. – М., 2005. – 20 с.
7. Лукин, В.И. Исследование влияния технологии ротационной сварки трением деформируемого жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 на структуру и прочностные характеристики сварных соединений / В.И. Лукин, В.Г. Ковальчук, М.Л. Саморуков, Ю.М. Гриднев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2011. – № S2. – С. 114–121.
8. Бычков, В.М. Исследование свариваемости жаропрочного никелевого сплава ЭП742 методом линейной сварки трением / В.М. Бычков, А.С. Селиванов, А.Ю. Медведев , А.В. Супов, Б.О. Большаков, Р.Р. Гринь, Ф.Ф. Мусин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16. № 7 (52). – С. 112–116.

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

9. Киреев, Р.Ю. Причины образования дефектов сварных соединений при сварке и термообработке никелевых сплавов типа ВЖЛ–14 / Р.Ю. Киреев, В.П. Чумарный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9. № 2. – С. 72–74.
10. Мурзин, С.П. Повышение прочности сварных соединений при сварке сплавов на никелевой основе импульсным лазерным излучением / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.М. Никифоров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. – 2011. – № 3–3 (27). – С. 338–342.
11. Лукин, В.И. Сварка жаропрочного никелевого сплава ВЖ171, упрочняемого внутренним азотированием / В.И. Лукин, В.Г. Ковальчук, Е.В. Голев, И.С. Мазалов, Е.А. Ходакова, Ю.М. Гриднев // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2014. – № 5. – С. 11.
12. Ющенко, К.А. Влияние геометрии сварочной ванны на структуру металла швов монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов / К.А. Ющенко, И.С. Гах, Б.А. Задерий, А.В. Звягинцева, О.П. Карасевская // Автоматическая сварка. – 2013. – № 5 (721). – С. 46–51.
13. Еремин, Е.Н. Применение сварки для изготовления кольцевых заготовок из жаропрочных никелевых сплавов / Е.Н. Еремин, Ю.О. Филиппов, С.А. Бородихин, Р.И. Ильясов, А.С. Губина // Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2015. – Т. 15. № 1. – С. 57–60.
14. Беляев, Г.Б. Влияние многопроходной сварки плавлением на энергию границ зерен никелевых сплавов / Г.Б. Беляев, И.Р. Волосатов, Н.Ю. Каховский // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – Т. 5. № 7 (25). – С. 27–30.
15. Паршуков, Л.И. Электронно-лучевая сварка и локальная термообработка сварных швов из жаропрочных сплавов / Л.И. Паршуков, Ф.З. Гильмутдинов // Труды ВИАМ. – 2017. – № 5 (53). – С. 3.

16. Кривоносова, Е.А. Снижение дефектности жаропрочных никелевых сплавов в технологиях наплавки / Е.А. Кривоносова, Ю.Д. Щицын, С.Н. Акулова, А.В. Мышкина, С.Д. Неулыбин, Д.С. Белинин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20. № 2. – С. 12–19.
17. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: Справ. изд. / А. П. Шлямнев. и др. – М.: “Интернет Инжиниринг”. 2000. – 232 с.
18. Николаев Г.А., Куркин С.А, Винокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: Учеб. Пособие. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с., ил.
19. СТП 26.260.486–2005. Изменение №1. Каталог аналогов импортных и отечественных основных и сварочных материалов, применяемых при изготовлении сосудов, аппаратов и трубопроводов, подводственных Ростехнадзору // ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры». – 2007. – 32 с.
20. СТО 00220368–008–2006. Изготовление деталей и узлов из коррозионностойких сплавов на железоникелевой и никелевой основе, разнородных соединений и двухслойных сталей с плакирующим слоем из сплавов марок 06ХН28МДТ, ХН65МВ и Н70МФВ–ВИ. Типовой технологический процесс // ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры». – 2006. – 54 с.
21. ОСТ 26–01–858–94. Сосуды и аппараты сварные из никеля и коррозионностойких сплавов на основе никеля. Общие технические требования // АО «НИИХИММАШ». – 1994. – 95 с.
22. ESAB. Руководство по сварке разнородных металлов. – <https://www.uniprofit.ru/spravka/catalogi/m.pdf> . – 25 с.
23. ESAB. Каталог продукции. Сварочные материалы ESAB. 2020. 2–е издание. – <https://assets.esab.com/asset-bank/action/viewAsset?id=15333&index=90&total=142&view=viewSearchItem> . – 282 с.

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

24. Куликов, В.П. Технология сварки плавлением и термической резки : учебник / В.П. Куликов. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА–М, 2016. – 463 с. : ил.
25. Зайцев, Н.Л. Теоретические основы сварки плавлением: учебное пособие /Н.Л. Зайцев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 78 с.
26. Акулов А.И., Бельчук Г.А. и Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов вузов. М., «Машиностроение», 1977. 432 с. с ил.
27. Петров В.Н. Сварка и резка нержавеющей сталей. Л., «Судостроение», 1969. Стр. 288.
28. Справочник сварщика-строителя / Бондарь В. Х., Шкуратовский Г. Д. – 3–е изд., перераб. и доп. – Киев : Будівельник, 1982. – 240 с.
29. Юхин Н. А. Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в защитных газах (TIG/WIG). – М.: Изд–во «СОУЭЛО», 2007. – 49 с.
30. ГОСТ Р МЭК 60974–1–2012. Оборудование для дуговой сварки. Часть 1. Источники сварочного тока. – М.: Стандартиформ, 2014. – 85 с.
31. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов (с основами физической химии). Учебник для вузов. Изд. 2–е, перераб. М., «Высш. школа», 1977.
32. Сварка и свариваемые материалы: В 3–х т. Т. 1. Свариваемость материалов. Справ. изд./Под ред. Э. Л. Макарова – М.: Metallurgia, 1991, с. 528.
33. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2–е издание, дополненное и переработанное, Казанцев Е.И. М., «Металлургия», 1975. 386 с.
34. Лившиц Л.С., Хакимов А.Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. – 2–е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.: ил.
35. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: «МАШГИЗ», 1951. 296 с.



36. Зайцев Н.Л. Технологические основы сварки плавлением: учебное пособие /Н.Л. Зайцев, А.М. Осипов — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 89 с.
37. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4–х т. /Ред–кол.: Г.А. Николаев (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1978 – – т. 2 /Под ред. А. И. Акулова. 1978. 462 с., ил.
38. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: Справочник термиста. Попова Л.Е., Попов А.А. 3–е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1991.
39. Липпольд Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей : [пер. с англ.] / Д. Липпольд, Д. Котеки; под ред. Н. А. Соснина, А. М. Левченко. – Спб.: Изд–во Политехн. ун–та, 2011. – 467 с.
40. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – М.: Изд–во стандартов, 1991. – 67 с.
41. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.: ил.
42. ГОСТ 5632–2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. – М.: Стандартинформ, 2015. – 48 с.

					15.04.01.2020.180.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»  
Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

## ***ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ СПЛАВА HASTELLOU C22 И СТАЛИ 12X18H10T***

ПРЕЗЕНТАЦИЯ  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
(МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ)

Автор ВКР:

магистрант группы П-246 Баданин А.В.

Руководитель ВКР:

старший преподаватель каф. ОиТСП Уланов А.М.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

## 1 Цель и задачи работы

Актуальность работы заключается в том, что в условиях увеличения объёмов импортозамещения и выпуска нового оборудования возникает потребность в освоении технологии сварки стыковых соединений типа С2 и С17 по ГОСТ 14771 из сплава Hastelloy С22 и стали 12Х18Н10Т. При внедрении новой продукции в условиях текущего уровня производственных возможностей важно исследовать и сформировать рекомендации по технологии сварки неплавящимся электродом в инертных газах (TIG – Tungsten Inert Gas) для данных разнородных материалов.

Целью работы является исследование свариваемости и технологии TIG сварки разнородных материалов из сплава Hastelloy С22 и стали 12Х18Н10Т.

Задачами работы являются:

- 1) Анализ свариваемых материалов, выбор конструктивных элементов сварного соединения, выбор сварочных материалов, анализ структуры металла шва по диаграмме Шеффлера.
- 2) Предварительный расчёт режимов сварки и моделирование процесса сварки в программном комплексе SYSWELD для проверки аналитического расчёта.
- 3) Моделирование статического растяжения сварных соединений в программном комплексе ANSYS с целью выбора наиболее подходящего сварочного материала.

## 2 Характеристика материалов

Химический состав и свойства сплава Hastelloy C22 представлены в таблице 1. Hastelloy – торговая марка фирмы «Cobot Corporation» (США). Из сплава изготавливают оборудование для сильно окислительных сред. Сплав обладает хорошей свариваемостью.

Таблица 1 – Свойства сплава Hastelloy C22 (массовая доля элементов, %)

C	Cr	Fe	Mo	Co	W	V	Si	Ni
≤0,01	20,0–22,5	2,0–6,0	12,5–14,5	≤2,5	2,5–3,5	≤0,35	≤0,08	Осн.
$\sigma_B > 690 \text{ Н/мм}^2$		$\sigma_{0,2} > 310 \text{ Н/мм}^2$		$\delta_5 > 45\%$				
Плотность 8,7 г/см <sup>3</sup>								
Модуль упругости $20,6 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$								

Отечественным аналогом Hastelloy C22 является сплав ХН63МБ (таблица 2).

Таблица 2 – Свойства сплава ХН63МБ (массовая доля элементов, %)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe	S	P
≤0,02	≤0,1	≤1,0	20	Осн.	16,0	≤0,5	≤0,012	≤0,015
$\sigma_B > 755 \text{ Н/мм}^2$		$\sigma_T > 353 \text{ Н/мм}^2$		$\delta_5 > 30\%$				
Плотность 8,9 г/см <sup>3</sup>								
Модуль упругости $20,0 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$								

Сплав ХН63МБ сваривается всеми видами ручной сварки, сварные соединения стойки против межкристаллитной коррозии, не склонны к горячим и холодным трещинам.

Химический состав и свойства стали 12Х18Н10Т представлены в таблице 3. Применяется в сварных конструкциях, контактирующих с окислительными средами средней концентрации. Данная сталь обладает хорошей свариваемостью.

Таблица 3 – Свойства стали 12Х18Н10Т (массовая доля элементов, %)

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Ti	Fe
≤0,12	≤0,08	≤2,0	17,0–19,0	9,0–11,0	≤0,02	≤0,035	5*С–0,8	Осн.
$\sigma_B > 520 \text{ Н/мм}^2$				$\sigma_{0,2} > 200 \text{ Н/мм}^2$		$\delta_5 > 40\%$		
Плотность 7,9 г/см <sup>3</sup> Модуль упругости 18,0·10 <sup>4</sup> Н/мм <sup>2</sup>								

### 3 Конструкция сварного соединения

С целью лучшего использования прочностных свойств свариваемых материалов применим сварку из листов разной толщины согласно таблице 4.

Таблица 4 – Толщина свариваемых листов

ХН63МБ толщина листа s, мм	12Х18Н10Т толщина листа s1, мм	Обозначение сварного соединения, способ сварки по ГОСТ 14771–76
1	1	С2, ИН
2	3	С2, ИН
3	4	С2, ИН
4	6	С17, ИНп
5	7	С17, ИНп
6	8	С17, ИНп

Плавный переход от одной детали к другой осуществляется наклонным расположением поверхности шва согласно ГОСТ 14771–76 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Плавный переход при сварке листов разной толщины

#### 4 Выбор сварочных материалов

По справочным данным выбраны три типа сварочных материала (таблица 5).

Таблица 5 – Основные и сварочные материалы

Основной материал <b>A</b>	Сварочные материалы <b>B1, B2, B3</b>	Основной материал <b>B</b>
<b>12X18H10T</b> ГОСТ 5632–2014	1. <b>OK Tigrrod 308LSi</b> (Аналог 03X18H11) 2. <b>OK Tigrrod NiCr–3</b> (Аналог XH60BT) 3. <b>OK Tigrrod 385</b> (Аналог 06XH28MДТ) ESAB, Швеция	<b>XH63MB</b> ГОСТ 5632–2014 (Аналог Hastelloy C22)

По диаграмме Шеффлера определена структура металла шва, сваренного с использованием выбранных сварочных материалов. Согласно диаграмме структура металла шва во всех трёх случаях является аустенитной (рисунок 2).

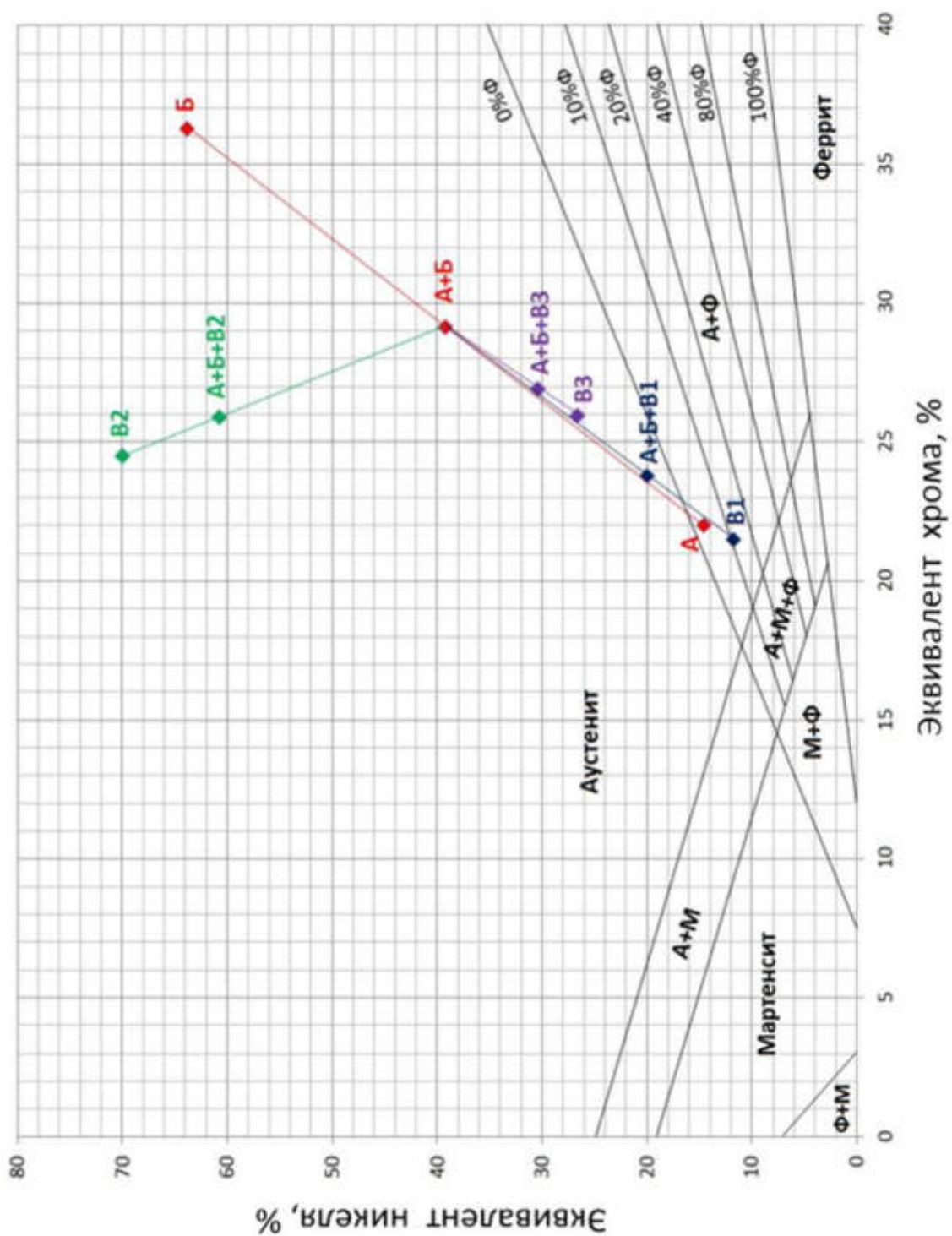


Рисунок 2 – Структура металла шва по диаграмме Шеффлера



## **5 Алгоритм расчёта режимов TIG сварки**

- 1) В соответствии с толщиной свариваемых деталей по справочным данным зададим значение тока сварки.
- 2) Определим значение напряжения сварочной дуги.
- 3) Зададим значение средней скорости сварки.
- 4) Определим величину погонной энергии.
- 5) Определим ширину шва при сварке листов встык за один проход, либо определим глубину провара при многопроходной сварке листов.
- 6) Для многопроходной сварки зададим диаметр сварочной проволоки и среднюю скорость её подачи.
- 7) Для многопроходной сварки определим площадь сечения наплавленного металла и количество проходов для заданных размеров шва.
- 8) Определим скорость охлаждения металла шва для однопроходной сварки либо для многопроходной сварки по соответствующим формулам.
- 9) При необходимости корректируем значения заданных параметров.

Результат расчёта режимов ТIG сварки рассматриваемых материалов представлен в таблице 6. При расчётах в качестве тепловых свойств выбрано среднее значение свойств свариваемых материалов.

Таблица 6 – Результат расчёта режимов ТIG сварки

S-I, мм	Тип св. соед.	$I_{св}$ , А	$U_{д}$ , В	$v_{св}$ , см/с	$q_{п}$ , Дж/см	$e$ , мм	$r_{пл}$ , мм	$d_{п}$ , мм	$v_{ш}$ , см/с	Кол. пр. п	$\omega_{охл}$ , °С/с
1-1	C2, ИН	40	11,6	0,3	1083	4,8	-	-	-	1	21,7
2-3	C2, ИН	80	13,2	0,2	3696	5,5	-	-	-	1	16,8
3-4	C2, ИН	110	14,4	0,2	5544	6,2	-	-	-	1	13,3
4-6	C17, ИНп	130	15,2	0,2	6916	8	3,0	2,0	0,5	3	19,2
5-7	C17, ИНп	140	15,6	0,2	7644	10	3,1	3,0	0,22	4	21,4
6-8	C17, ИНп	150	16,0	0,2	8400	12	3,3	3,0	0,23	4	23,1

С целью повышения стойкости сварных соединений к образованию межкристаллитной коррозии учтено требование по минимальной скорости охлаждения металла шва на уровне не менее 5–10 °С/с.

## 6 Моделирование TIG сварки в программном комплексе SYSWELD

Целью моделирования являлось моделирование TIG сварки листов толщиной 1 мм из разнородных материалов, определение размеров сварочной ванны при изменении погонной энергии в соответствии со значениями  $q_{п} = 500, 750, 1000, 1250, 1500$  Дж/см, скорость сварки оставалась неизменной 0,3 см/с. Модель сварки и схема закрепления представлены на рисунке 3. При моделировании принято, что сборка охлаждается на воздухе. Направление сварки совпадает с осью X. В качестве материалов выбраны материалы аналоги.

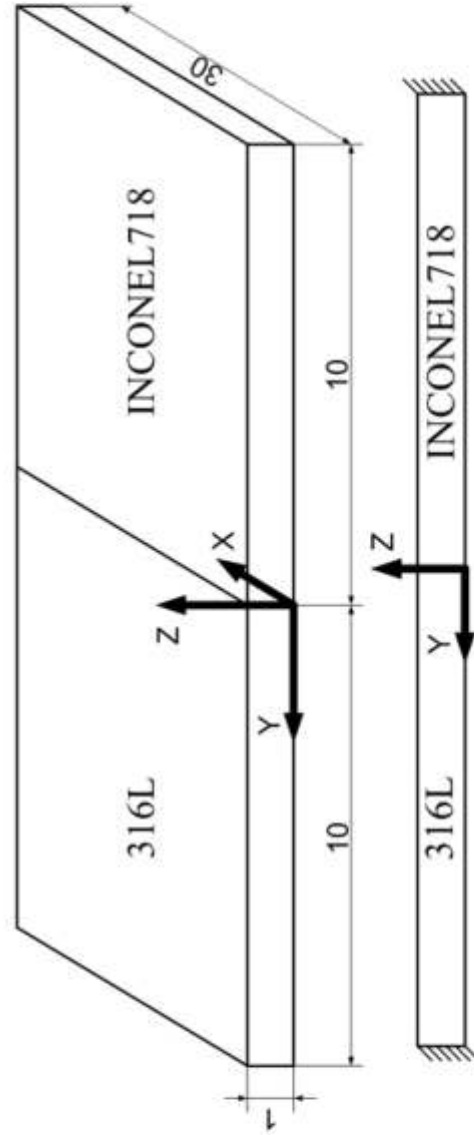


Рисунок 3 – Модель стыковой сварки

Рисунок 4 – Результат решения температурной задачи для опыта с  $q_{п} = 1000$  Дж/см.

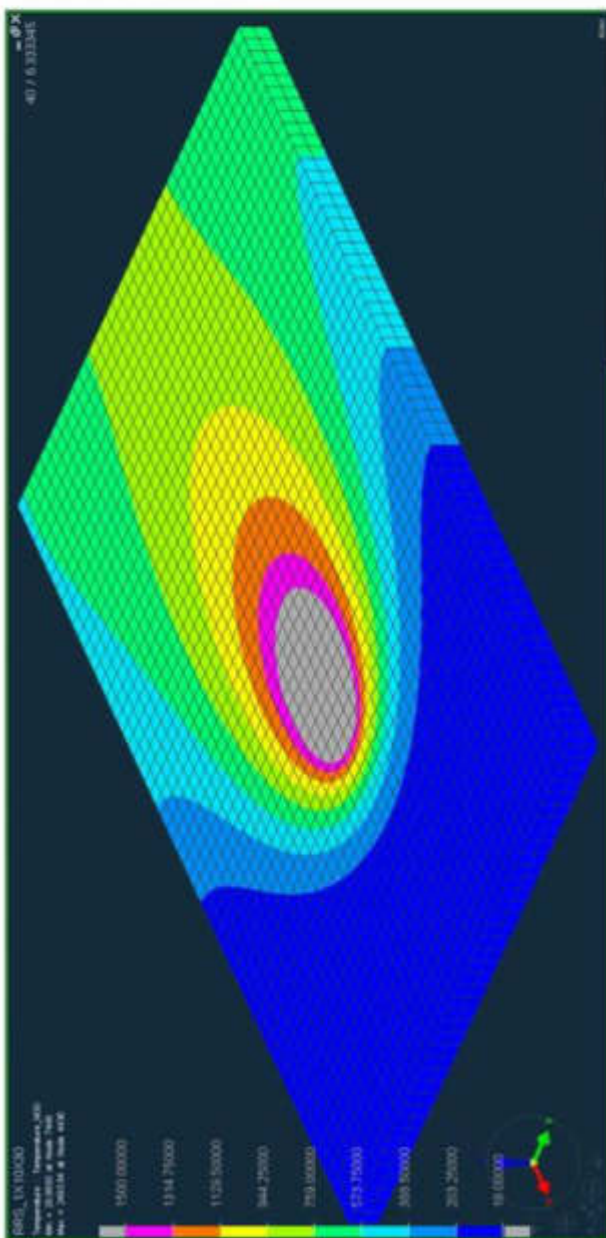
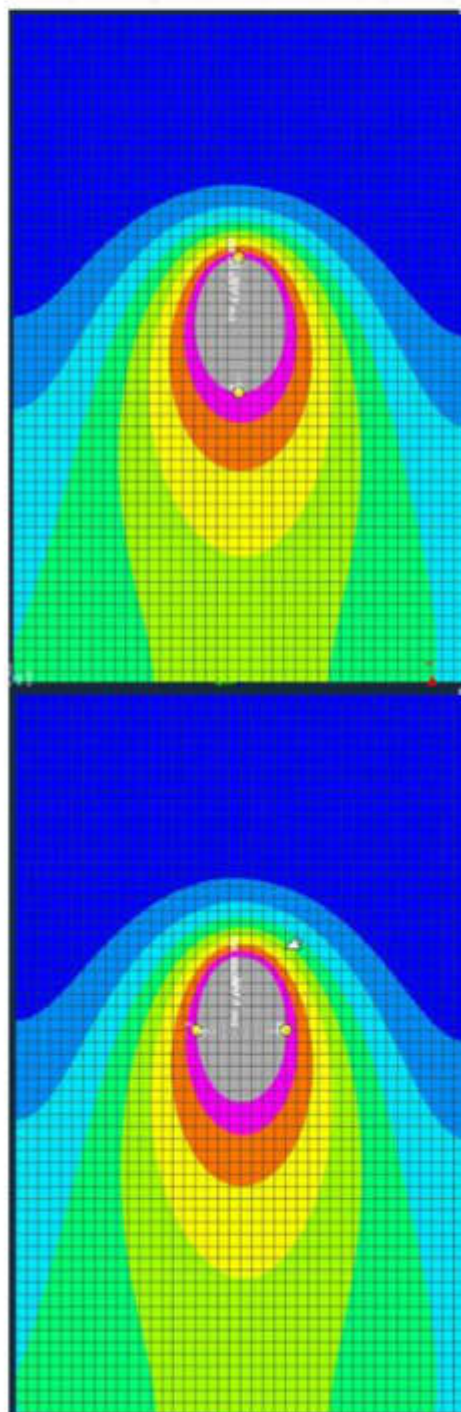


Рисунок 5 – Ширина и длина сварочной ванны 4,0 и 6,1 мм соответственно при  $q_{п} = 1000$  Дж/см.



В таблице 7 представлены результаты измерения ширины сварочной ванны при изменении погонной энергии. Выбор значения погонной энергии обусловлен двумя ограничениями. С одной стороны необходимо снизить погонную энергию для увеличения скорости охлаждения с целью повышения стойкости к межкристаллитной коррозии. С другой стороны ширина шва должна быть достаточной для практического применения с целью компенсации технологических неточностей. Поэтому оптимальный диапазон погонной энергии при сварке листов 1 мм составляет  $q_{п} = 750-1250$  Дж/см.

Ширина сварочной ванны  $e = 4,0$  мм при  $q_{п} = 1000$  Дж/см достаточно хорошо соответствует результату аналитического расчёта – ширина шва  $e = 4,8$  мм при  $q_{п} = 1083$  Дж/см (таблица 6 на слайде 9).

Таблица 7 – Результаты измерения ширины сварочной ванны

Номер опыта	1	2	3	4	5
Погонная энергия $q_{п}$ , Дж/см	500	750	1000	1250	1500
Ширина сварочной ванны $e$ , мм	0,9	2,8	4,0	5,0	5,8

## 7 Моделирование статического растяжения сварных соединений в программном комплексе ANSYS

В соответствии с ГОСТ 6996 одним из основных способов определения качества продукции и показателей свариваемости металлов является испытание сварного соединения на статическое растяжение.

По площади плавления определён химический состав металла шва, подобраны материалы-аналоги и использованы их механические свойства в качестве свойств металла шва.

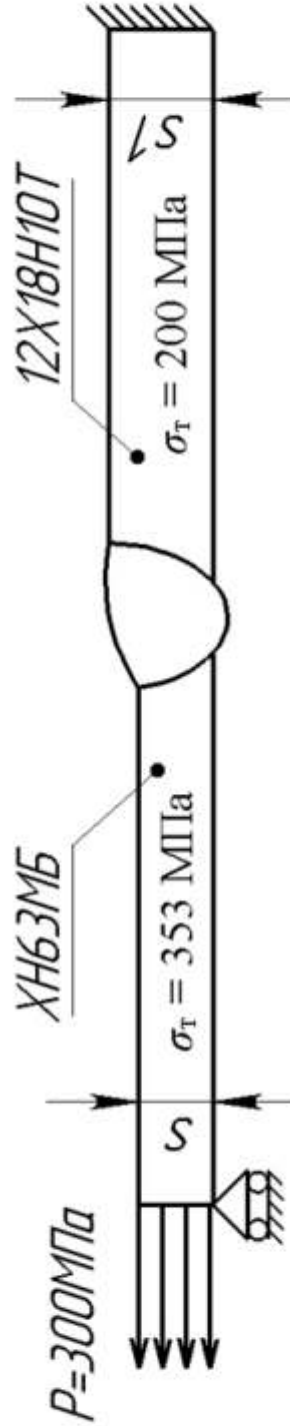


Рисунок 6 – Схема моделирования статического растяжения

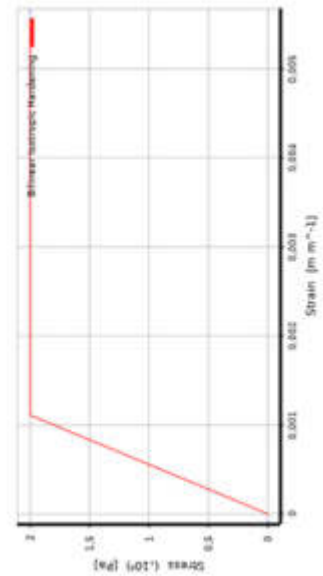
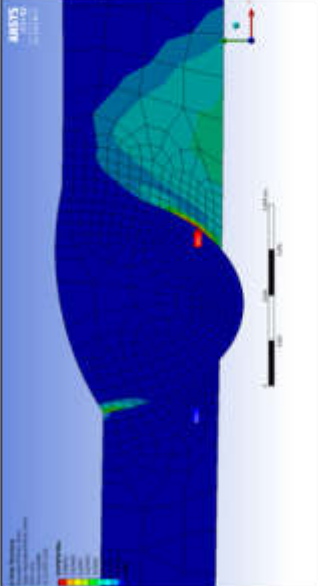
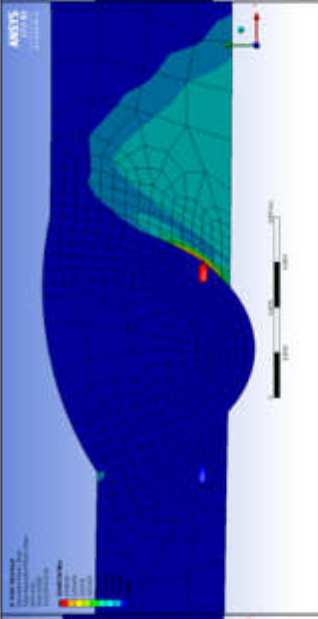
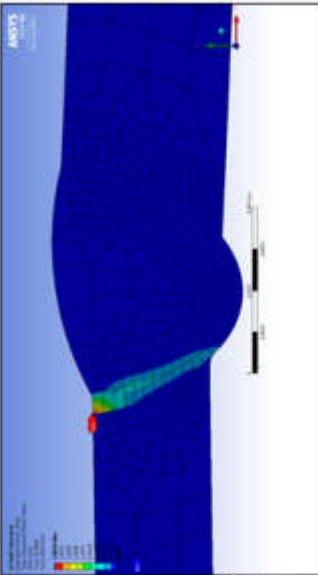


Рисунок 7 – В модели принята диаграмма растяжения, состоящая из наклонной линии упругой деформации и горизонтальной линии пластической деформации, соответствующей пределу текучести.

Эквивалентные пластические деформации представлены на рисунках 8, 9, 10.

		
<p>Рисунок 8 – Сварочная проволока ОК Tigrod 308LSi. Напряжение разрушения составило 256,9 МПа.</p>	<p>Рисунок 9 – Сварочная проволока ОК Tigrod NiCr-3. Напряжение разрушения составило 257,0 МПа.</p>	<p>Рисунок 10 – Сварочная проволока ОК Tigrod 385. Напряжение разрушения составило 230 МПа.</p>

При моделировании статического растяжения сварные швы со сварочными проволоками ОК Tigrod 308LSi и ОК Tigrod NiCr-3 дают одинаковый максимальный результат, худший результат получается с проволокой ОК Tigrod 385 и её применение можно считать нецелесообразным. Применение проволоки ОК Tigrod 308LSi позволит существенно снизить затраты на сварочные материалы, так как её стоимость значительно ниже стоимости проволоки ОК Tigrod NiCr-3.

## 8 Выводы по работе

В ходе выполнения работы, целью которой являлось исследование технологии сварки разнородных материалов из сплава Hastelloy C22 (аналог ХН63МБ) и стали 12Х18Н10Т с помощью способа TIG сварки, было рассмотрено следующее:

- 1) Выбраны типы сварных соединений и сочетание толщин свариваемых листов.
- 2) По справочным данным выбраны три варианта сварочной проволоки и проанализирована структура металла шва по диаграмме Шеффлера.
- 3) Произведён расчёт режимов TIG сварки для листов толщиной от 1 до 8 мм.
- 4) Произведено моделирование TIG сварки листов толщиной 1 мм в программном комплексе SYSWELD, показана достаточно хорошая сходимость с результатом аналитического расчёта режимов сварки.
- 5) На основе моделирования статического растяжения сварных соединений в программном комплексе ANSYS из трёх вариантов выбрана наиболее подходящая сварочная проволока ОК Tigrod 308LSi.

~~~~~  
***Спасибо за внимание!***