

МИСТЕРСТВО 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 ГРОВАНА ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Рецензент Заведующий кафедрой

достоинство, место работы

М.А. Иванов

2020 г.

подпись

И.О. Фамилия

2020 г.

Обеспечение работоспособности таврового сварного соединения с  
мягкими швами для судокорпусных конструкций из высокопрочных  
сталей

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
(МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ)  
ЮУрГУ-15.04.01.2020.144 ГВ ВКР**

Руководитель ВКР

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

к.т.н. доцент

Должность

М.А. Иванов

Личность

И.О., Фамилия

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролёр  
старший преподаватель

Ю.В. Безганс

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ.....	7
1.1 Сварные соединения и швы. Виды ,классификация ,применение.....	7
2.2 Анализ применения мягких швов в современном судостроении.....	8
2.3 Характеристики применяемых материалов.....	11
2.4 Условия эксплуатации изделия.....	13
2.5 Механическая неоднородность сварных соединений.....	13
2 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ.....	15
2.1 Цель и задачи эксперимента.....	15
2.2 Выбор метода исследования.....	15
2.3 Моделирование механической и геометрической неоднородности.....	16
2.3.1 Моделирование образцов в системе Ansys.....	16
2.3.2 Моделирование образцов в системе ESI SYSWELD.....	23
2.4 Анализ влияния геометрических параметров на работоспособность шва.....	33
2.5 Образцы сварного соединения для испытаний.....	34
2.5.1 Оборудование для сварки образцов .....	35
2.5.2 Режимы сварки.....	36
2.6 Механические испытания.....	38
2.7 Методика конструирования мягких сварных швов в тавровых соединениях.....	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	43
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	44
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	46

## ВВЕДЕНИЕ

В современном судостроении используют высокопрочные материалы, обладающие различными механическими, химическими и технологическими свойствами. Высокие свойства стали в современной металлургии появляются не только за счет легирования, но и за счет специальных видов термической и термомеханической обработки металла. Для регламентирования данного процесса изготовления материалов морским регистром судоходства введен ряд документов, описывающий требования к исходному материалу, исчерпывающая информация о требованиях содержится в документе № 2-020101-130 «Правила классификации и постройки морских судов, Часть XIII, Материалы». Однако, использование высокопрочных материалов требует большого внимания при оценке склонности к образованию холодных трещин.

Основными факторами влияющими на образование холодных трещин являются высокая скорость охлаждения сварного соединения, приводящая к появлению закалочных структур бейнитного и мартенситного типов, наличие высоких растягивающих остаточных напряжений и водорода, температура предварительного подогрева и механическая неоднородность сварного соединения, а также применение жестких схем закрепления деталей повышают вероятность образования холодных трещин. Пути уменьшения влияния вышеперечисленных факторов в целом, успешно изучены и применяются в современном производстве. Однако, несмотря на то, что вопрос поднимался неоднократно, изучался многими учеными мира, в судостроении не в полной мере оценена возможность научного применения механической неоднородности в целях предотвращения образования холодных трещин. Ведь известно, что при определенной концентрации водорода в сварном соединении, концентрация будет максимальна в местах с максимальными растягивающими напряжениями. А связь остаточных напряжений и предела текучести металла шва давно известна, а именно, что при увеличении предела текучести становится больше и величина остаточных напряжений, и как следствие, возрастает вероятность образования холодных трещин.

									Лист
									6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2020.144 ПЗ				

# 1 КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ

## 1.1 Сварные соединения и швы. Виды ,классификация ,применение

Сварным соединением называется неразъемное соединение деталей, выполненное сваркой. В сварное соединение входят следующие элементы: сварной шов, прилегающая к нему зона основного металла, в которой, в результате воздействия тепла от сварки произошли структурные изменения (зона термического влияния). Классификация сварных соединений производится по основному признаку - по расположению свариваемых деталей относительно друг друга. Различают следующие типы сварных соединений:

- Стыковые соединения;
- Нахлесточные соединения;
- Тавровые соединения;
- Угловые соединения;

Сварной шов — это участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации расплавленного металла или в результате пластической деформации при сварке давлением или сочетания кристаллизации и деформации. Классификация сварных швов осуществляется по следующим признакам:

По форме поперечного сечения

— стыковые сварные швы

— угловые сварные швы

Стыковой — это сварной шов стыкового соединения. Угловой — это сварной шов углового, нахлесточного или таврового соединений (ГОСТ 2601—84).

По положению , в котором осуществляется сварка :

—нижнеев лодочку — Л;

—полугоризонтальные — Пг;

—горизонтальные — Г;

—полувертикальные — Пв;

—вертикальные — В;

					15.04.01.2020.144 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

—полупотолочные — Пп;

—потолочные — П.

По протяжённости сварного шва

—сплошные. Подразделяются на короткие- длиной до 250...300 мм ,средние- 300...1000 мм и длинные –свыше 1000 мм

— прерывистые. Прерывистые швы могут быть цепными или шахматными.

По отношению к направлению действующих усилий швы подразделяются на:

—продольные;

—поперечные;

—комбинированные;

—косые.

По форме наружной поверхности стыковые швы могут быть выполнены

—нормальными (плоскими)

— выпуклыми

—вогнутыми.

По расположению на сварной конструкции:

—продольные

—поперечные

Основные типы, конструктивные элементы, размеры и условия обозначения швов сварных соединений для ручной электродуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей, регламентированы ГОСТ 5264—80 [6], ГОСТ 14771-76: "Дуговая сварка в защитном газе"[5]

## 1.2 Анализ применения мягких швов в современном судостроении

В современном судостроении одним из наиболее распространённых сварных соединений является тавровое. При помощи данного соединения выполняется сварка различных узлов, таких как сварка корпуса и шпангоута, бортовых стрингеров, палубных бимсов и т.д. Элементы конструкций корпуса в зависимости от уровня напряженности, наличия значительной концентрации напряжений, сложности оформления и изготовления узлов, а также предполагаемых последствий их

									Лист
									8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

15.04.01.2020.144 ПЗ

разрушения для безопасности судна, в целом, подразделяются на три группы связей и зависит от толщины элемента корпуса судна (таблица 1.1) [2]

Таблица 1.1—Группы связей корпуса судна

Толщина элемента корпуса судна, мм	Группа связей, к которой относится элемент корпуса судна					
	I		II		III	
	Нормальной прочности	Повышенной прочности	Нормальной прочности	Повышенной прочности	Нормальной прочности	Повышенной прочности
$S \leq 15.0$	A	АН	A	АН	A	АН
$15 < S \leq 20$			B		B	
$20 < S \leq 30$			D		D	
$25 < S \leq 35$			D	АН	ЕН	
$30 < S \leq 35$			B			
$35 < S \leq 40$			D	DН	E	ЕН

На основании требований морского регистра, материалы судостроительных сталей подразделяются по прочности[3]:

- 1) Нормальной прочности, подразделяются на категории 1, 2, 3 и 4
- 2) Повышенной прочности – на категории 1У (от 315 Мпа), 2У (от 355 Мпа) и 3У (от 390 Мпа).
- 3) Высокой прочности (от 420 Мпа) – на категории 3УХХ, 4УХХ, 5УХХ, где ХХ – обозначение одной из групп прочности наплавленного металла и сварного соединения, например, 3У42, 4У42, 5У42, 3У46, 3У50, 3У62, 3У69. Расшифровка данных категорий приведена в таблице 1.2

Таблица 1.2—Механические свойства материалов

Категория сварочного материала	Предел текучести металла шва
1	305 МПа
2	305 МПа
3	
4	
1Y	375 МПа
2Y	
3Y	
4Y	
5Y	
2Y40	400 МПа
3Y40	
4Y40	
5Y40	
3Y42	420 МПа
4Y42	
5Y42	
3Y46	460 МПа
4Y46	
5Y46	
3Y50	500 МПа
4Y50	
5Y50	
3Y55	550 МПа
4Y55	
5Y55	
3Y62	620 МПа
4Y62	

К сварочным материалам так же имеются особые требования. Для правильного назначения материалов для сварки высокопрочных сталей, морским регистром введены требования (таблица 1.3) ,которые определяют отношение прочности сварочного материала, к прочности основного металла.

Таблица 1.3—Требования к подбору сварочных материалов

Идентификация категорий сварочных материалов по уровню прочности	Идентификация категорий стали высокой прочности по уровню прочности							
	(A/F) 420	(A/F) 460	(A/F) 500	(A/F) 550	(A/F) 620	(A/F) 690	(A/E) 890	(A/E) 960
(3Y/5Y)42	+	-	-	-	-	-	-	-
(3Y/5Y)46	+	+	-	-	-	-	-	-
(3Y/5Y)50	+	+	+	-	-	-	-	-
(3Y/5Y)55	-	-	+	+	-	-	-	-
(3Y/5Y)62	-	-	-	+	+	-	-	-
(3Y/5Y)69	-	-	-	-	+	+	-	-
(3Y/4Y)89	-	-	-	-	-	-	+	-
(3Y/4Y)96	-	-	-	-	-	-	+	+

В соответствии с требованиями правил морского регистра судоходства [9], область применения марки сварочного материала в зависимости от результатов испытаний может быть ограничена одной категорией прочности основного металла без распространения на низшие категории стали высокой прочности, как указано в таблице 1.3. То есть допускается применять сварочные материалы выше категории прочности, чем основной металл, при этом сварочные материалы категории прочности ниже, чем высокопрочная сталь неприменимы.

### 1.3 Характеристики применяемых материалов

Назначение применяемых материалов для проведения исследования производилось на основании рекомендаций, приведённых в НД № 2-020101-Правил классификации и постройки морских судов часть XIII Материалы.[3] Для данной рабо-



ты использовалась сталь высокой прочности E500W. Индекс Wговорит о том, что данная сталь обладает улучшенной свариваемостью [3]. Химические свойства данной стали приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4—Химические свойства E500W

значения приведены в %

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	Mb	Al	V	Nb	S ,не более	P,не более
E500W	0.08- 0.12	0.45- 0.75	0.20- 0.40	1.05- 1.30	0.35- 0.65	1.85- 2.15	0.10- 0.18	0.010- 0.050	0.02- 0.06	0.02- 0.05	0.005	0.010

При назначении основного металла большое внимание уделялось также механическим свойствам. Свойства данного материала приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5—Механические свойства E500W

Марка стали	Временное сопротивление $R_m, \text{Н/мм}^2$	Предел текучести $R_e, \text{Н/мм}^2$	Ударная вязкость металла KCV ,Дж при температуре -40°C	Относительное удлинение при разрыве, $\delta_5$ [%]
E500W	610-770	500	80	20

С целью допущения применения сварочных материалов с низким пределом текучести для сварки высокопрочных сталей был произведён анализ и назначение сварочных материалов с пределом текучести ниже 450 МПа.

Для проведения эксперимента мною была выбрана порошковая сварочная проволока ESAB FILARC PZ6125, Ø1,2 мм – категория сварочного материала по уровню прочности – 5Y42. Механические свойства сварочной проволоки приведены в таблице 1.6. Химический состав приведен в таблице 1.7

Таблица 1.6—Механические свойства проволоки ESAB FILARC PZ6125

Предел текучести, $\sigma_T, \text{МПа}$	Временное сопротивление, $\sigma_B, \text{МПа}$	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV, Дж/см <sup>2</sup> / -40С <sup>0</sup>
445	556	28.4	139

Таблица 1.7—Химические свойства проволоки ESABFILARCPZ6125

значения приведены в %

C	Si	Mn	P	S	Ni	V
0.07 %	0.38	1,22	0.00	0.013	0,89	0.01

Данная проволока имеет эквивалентное содержание углерода менее 0,25% , что говорит о хорошей свариваемости без образования закалочных структур.

#### 1.4 Условия эксплуатации изделия

Условия эксплуатации данной стали ограничиваются диапазоном температур от-70 до +450 °С. Ввиду высокой хладостойкости данный материал успешно применим в условиях крайнего севера.

Основные нагрузки которым подвержены тавровые сварные соединения в судокорпусных конструкциях можно разделить на два вида[15]:

—Статическое растяжение

—Статический изгиб

В данной работе будет оценена работа таврового соединения в условиях статического растяжения.

#### 1.5 Механическая неоднородность сварных соединений

Под механической неоднородностью сварных соединений в данной работе, и в целом, понимается различие механических характеристик, прежде всего, предела текучести и твердости металлов и различных его участков. Механическая неоднородность, как правило, присуща всем сварным соединениям [7].Появление механической неоднородности в отдельных участках связано с различием в химическом составе, структуре ЗТВ сварного соединения, а также различием в термических циклах. Как правило, во всех прочностных расчётах принято не учитывать наличие механической неоднородности, так как в расчётах за базовые величины берётся равнопрочность. При обзоре научных работ, согласно работам [8,12,7], наличие в сварных соединениях мягких или твёрдых прослоек практически неизбежно, но при научном подходе, благодаря их наличию, можно получить выгоду,

										Лист
										13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2020.144 ПЗ					

повысив деформационную способность шва, не теряя при этом общей прочности соединения.

					15.04.01.2020.144 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

## 2 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

### 2.1 Цель и задачи эксперимента

Цель данной работы заключается в том, чтобы выяснить влияние геометрической и механической неоднородности на прочностные характеристики сварного шва, и как следствие, внести рекомендации в части применения сварочных материалов категории пониженной прочности в «Правила классификации и постройки морских судов, часть XIV, Сварка» Российского морского регистра судоходства.

Для достижения поставленной задачи был произведен ряд работ, описанных далее.

### 2.2 Выбор объекта исследования.

Объектом исследования в данной работе было сварное соединение ТЗ (рисунок 2.1) без разделки кромок с заложенным конструктивным непроваром в соответствии с ГОСТ 14771-76[5]

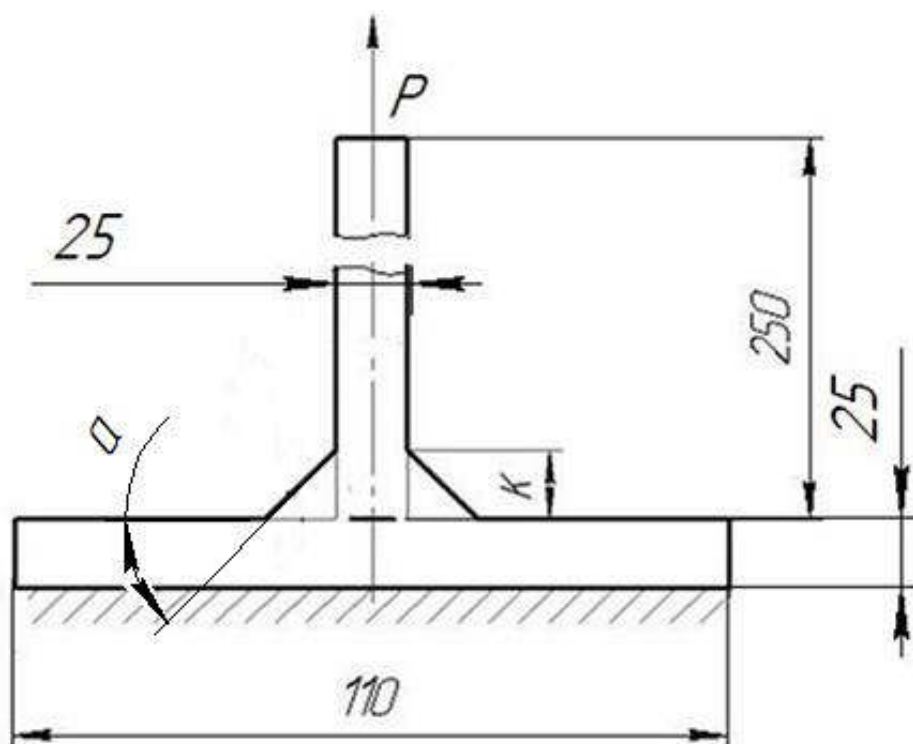


Рисунок 2.1 Рассматриваемое соединение ТЗ  
**К** – величина катета, **Р** – растягивающая нагрузка ,  
**а**-угол при вершине лобового катета

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2020.144 ПЗ

Лист

15

Было рассмотрено 3 варианта катета (рисунок 2.2) с различными геометрическими характеристиками, а также конструктивным непроваром, распределенным по всему сечению образца:

- 1) Равносторонний 12 мм, угол при вершине лобового катета  $45^\circ$
- 2) Стенка 11 мм, полка 19 мм, угол при вершине лобового катета  $60^\circ$
- 3) Стенка 13 мм, полка 8 мм, угол при вершине лобового катета  $30^\circ$

При заданных режимах для достижения требуемого катета сварку выполняли в три прохода

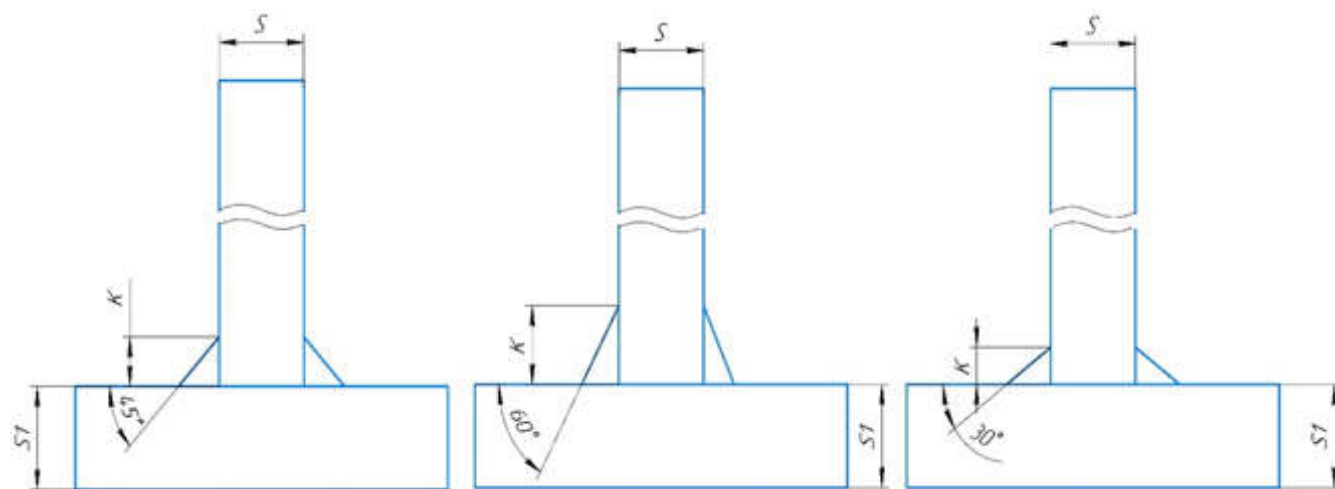


Рисунок 2.2—Объекты исследования

### 2.3 Моделирование механической и геометрической неоднородности.

Моделирование образцов производилось поэтапно:

- 1) Моделирование в системе ANSYS на платформе Workbench 2020 R1
- 2) Моделирование в системе ESI SYSWELD

#### 2.3.1 Моделирование в системе ANSYS

При моделировании в системе ANSYS за начальное условие было задано моделирование в 2х мерном пространстве без придания объёма детали. Проведение моделирования с помощью МКЭ позволяет оценить конструктивную работоспособность сварного соединения без проведения натурального эксперимента, в нашем случае, данная работа проводилась для того, чтобы оценить слабые места выбранных вариантов сварного соединения, определить варианты которые будут

воспроизведены в натурном эксперименте. Задача позиционировала как упруго-пластическая. При моделировании были заданы следующие параметры материала:

1) Предел текучести основного металла - 500 МПа, категория сварочного материала по уровню прочности – 5Y42

Пластичность металла была определена билинейным изотропным упрочнением, диаграмма растяжения металла приведена на рисунке 2.4, с модулем Тангенса равным 0, поведение металла было задано идеализированным, так как натурная диаграмма растяжения с пределом текучести и углом тангенса, характеризующеего поведение металла отсутствовала

3) Также с учётом того факта, что моделирование производилось в двухмерном пространстве и значения, которые будут получены в результате моделирования будут существенным образом отличаться от натурального эксперимента, в процесс для сравнения результатов был заложен образец с пределом текучести основного металла 500 МПа, категорией сварочного материала по уровню прочности – 5Y50 и углом при вершине лобового катета  $45^\circ$ . В процессе моделирования была применена схема нагружения - закрепления образца с характеристиками указанными на рисунке 2.3

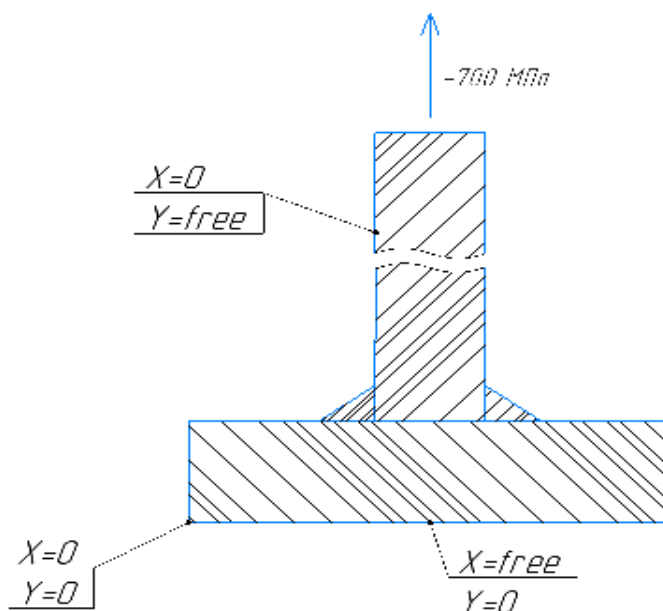


Рисунок 2.3—Схема нагружения-закрепления образцов

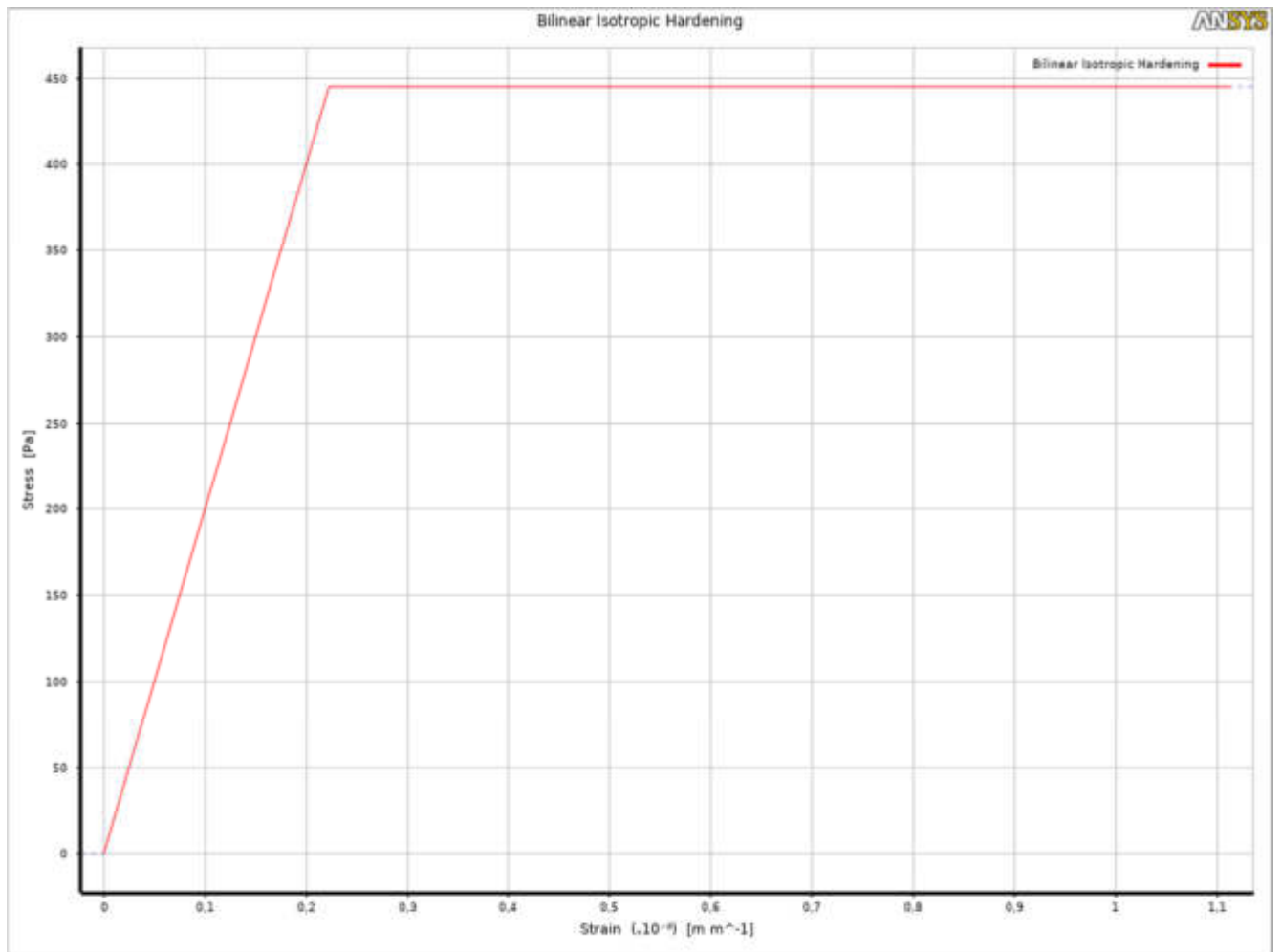


Рисунок 2.4—Билинейная диаграмма растяжения металла

Первый образец был смоделирован с углом при вершине лобового катета 30°(рисунок 2.5)

Так же для полноты картины работы сварного соединения оценивались пластические деформации, возникающие во время растяжения образца (рисунок 2.6)

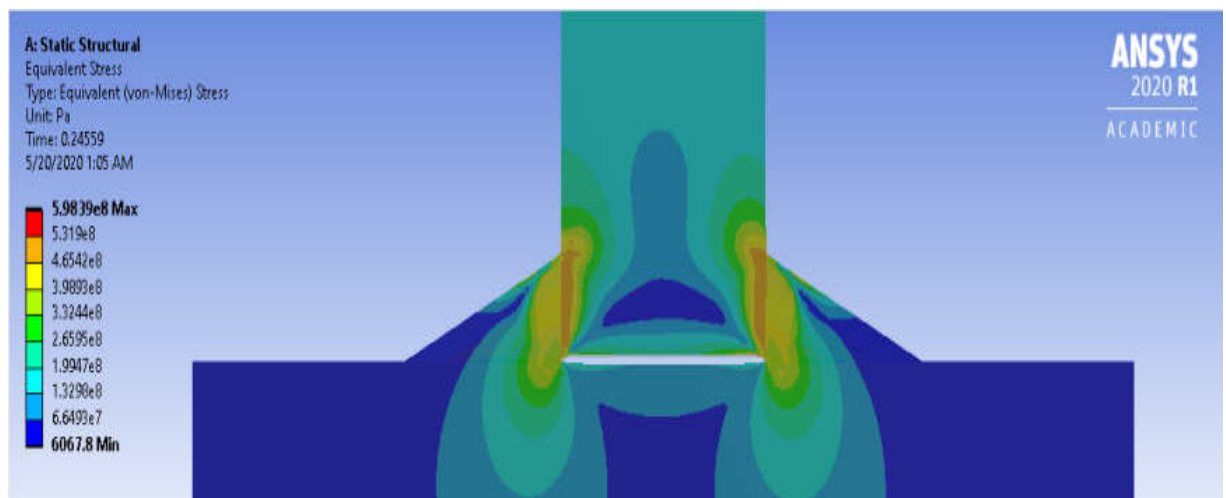


Рисунок 2.5—Напряжения по Мизесу в образце №1

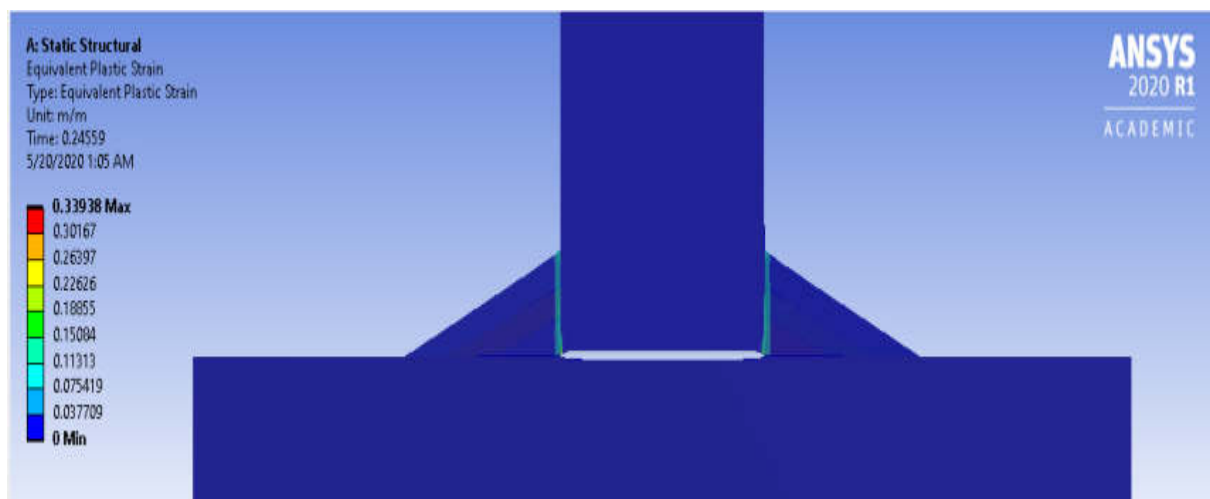


Рисунок 2.6—Пластические деформации в образце №1

Далее, после проведения анализа работы соединения, сбора необходимых данных и проверки хода выполнения, был смоделирован образец № 2 с углом при вершине лобового катета  $45^\circ$ . Напряжения и деформации полученные в ходе моделирования приведены ниже(рисунок 2.7, 2.8)

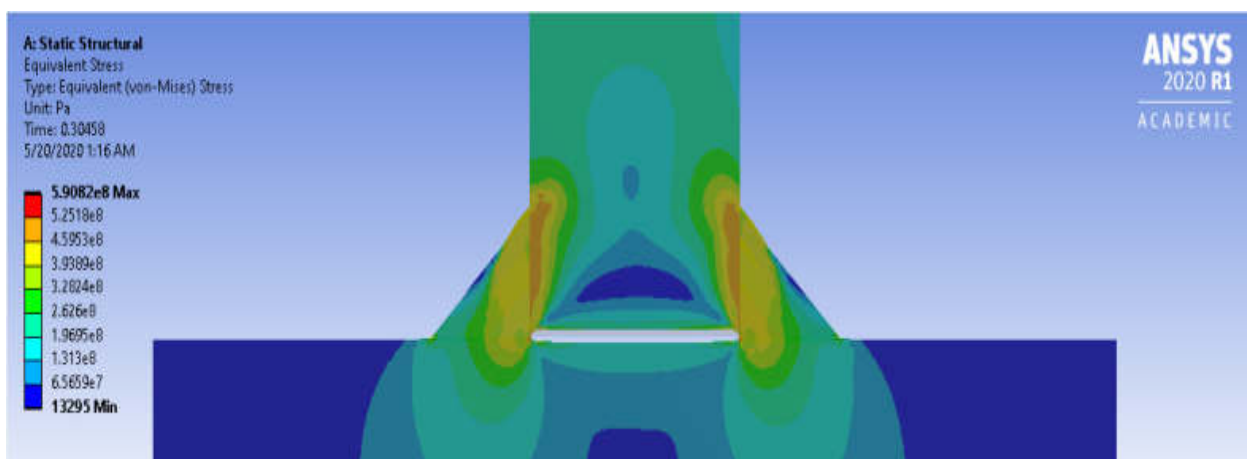


Рисунок 2.7—Напряжения по Мизесу в образце №2

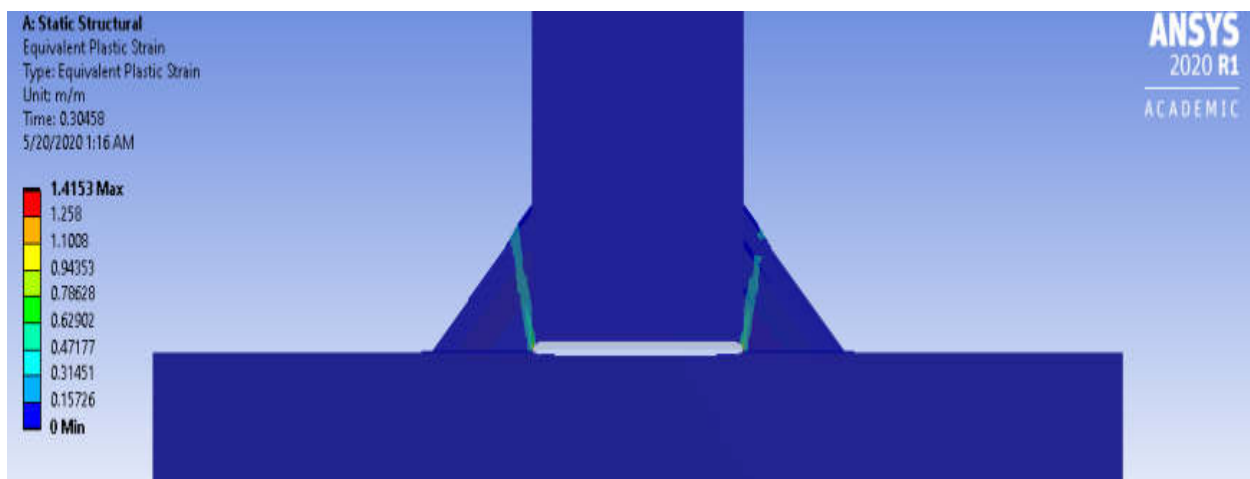


Рисунок 2.8—Пластические деформации в образце №2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Следующий вариант был смоделирован с углом при вершине лобового катета  $60^\circ$ .  
 Данные полученные при моделировании предоставлены ниже(рисунок 2.9,2.10)

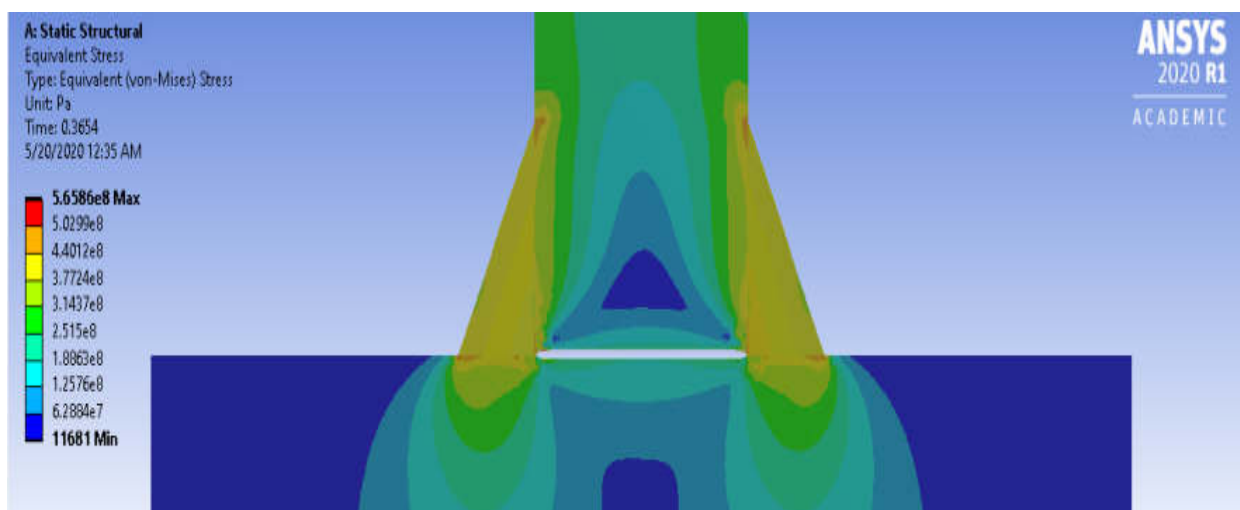


Рисунок 2.9—Напряжения по Мизесу в образце №3

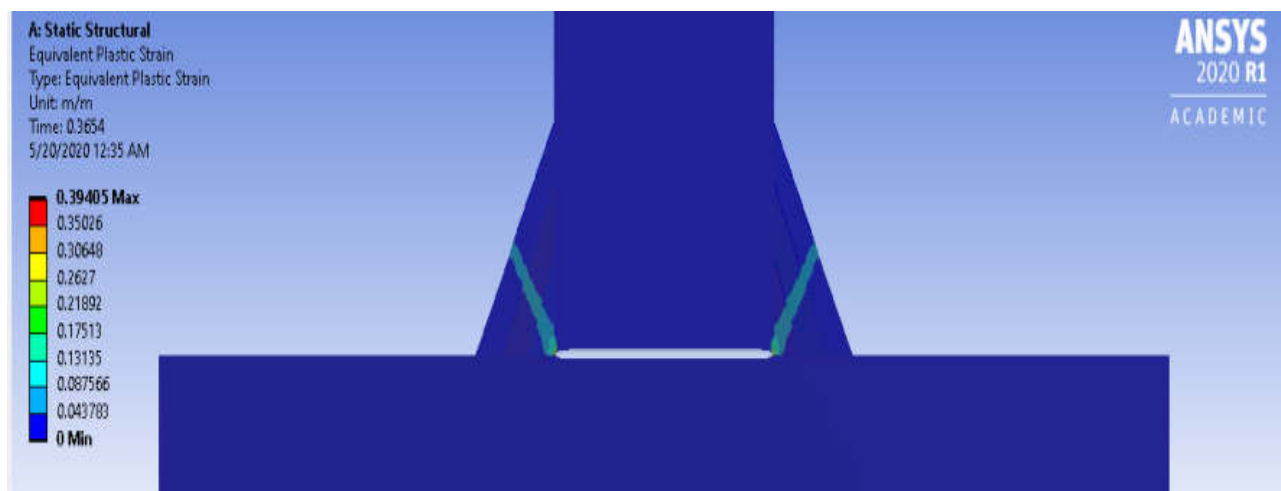


Рисунок 2.10—Пластические деформации в образце №3

Далее, для проведения сравнения результатов моделирования был смоделирован образец с равнопрочным соединением и распространенным углом при вершине лобового катета  $45^\circ$ . Ниже на рисунках 2.11,2.12 приведены полученные результаты.

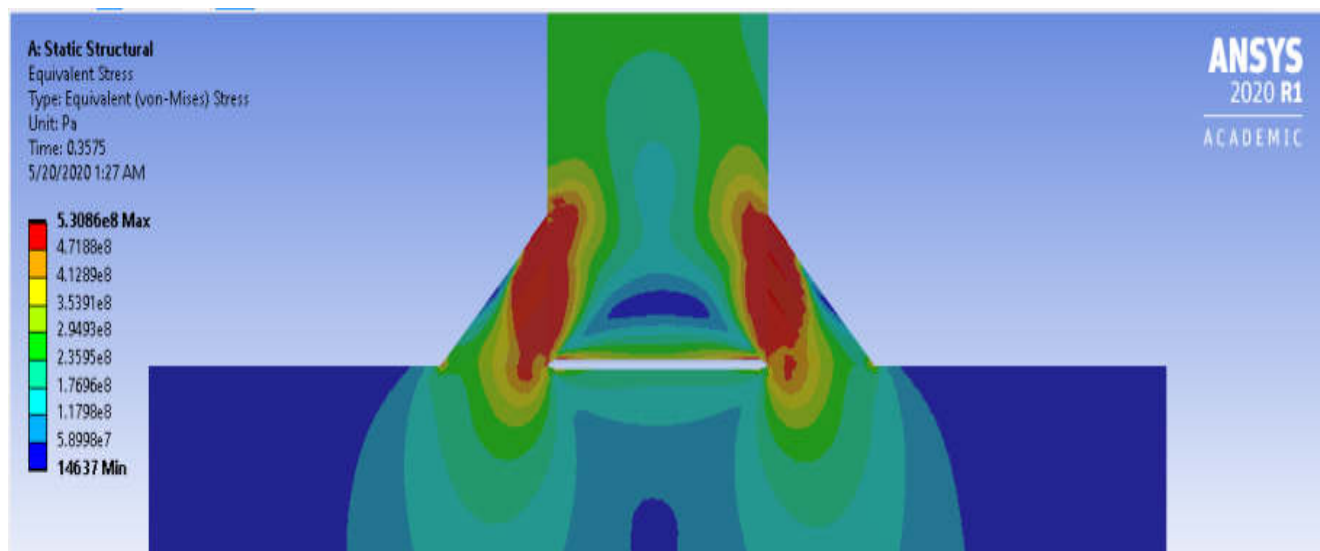


Рисунок 2.11—Напряжения по Мизесу в образце №4

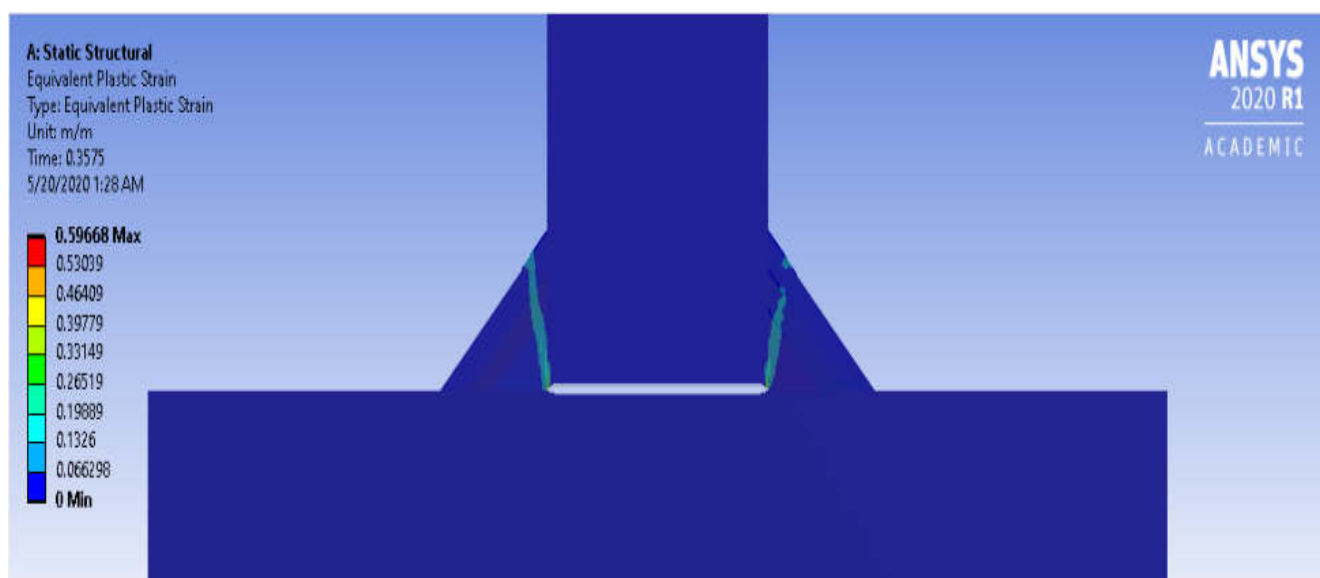


Рисунок 2.12—Пластические деформации в образце №4

В таблице 2.1 предоставлены данные, полученной разрушающей нагрузки по четырем образцам, которые возникли в условиях используемой схемы нагружения и растяжения. В учёт анализа брался тот факт, что задача моделировалась в двухмерном пространстве. Таким образом, данные значения имеют справочный характер, который помогает косвенно оценить работу сварных швов в условиях данного нагружения.

Таблица 2.1—Результаты моделирования ANSYS

Образец №	Угол при вершине лобового катета	Предел текучести основного металла, МПа	Категория сварочного материала по уровню прочности	Нагрузка, при которой происходит разрушение, МПа
№1	30°	500	5Y42	171,7
№2	45°			213,2
№3	60°			225,78
№4	45°		5Y50	250,2

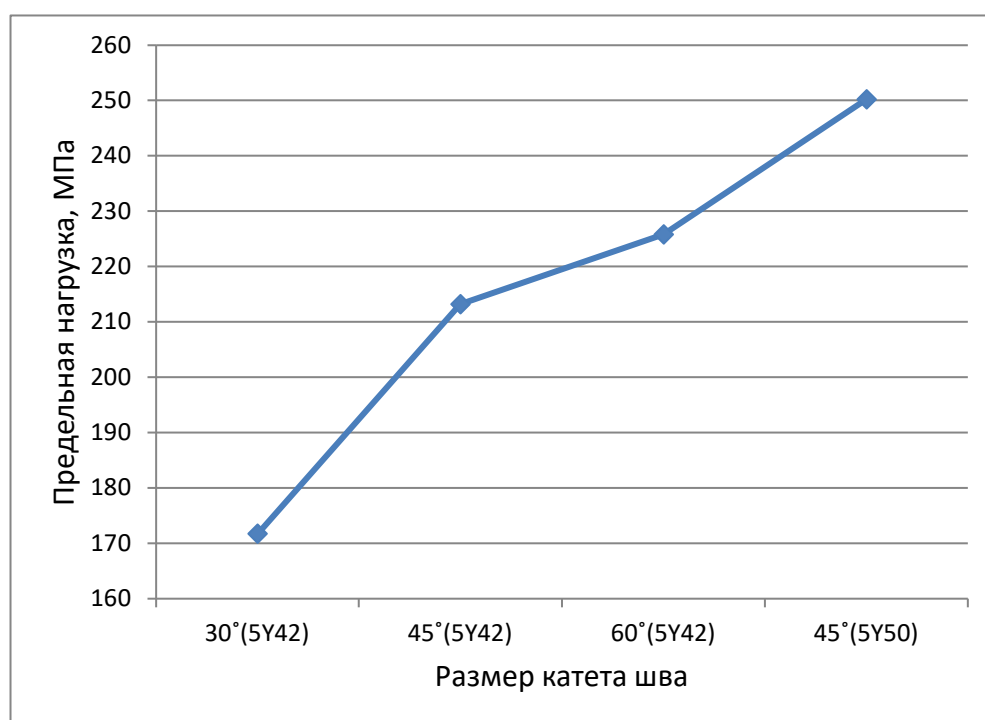


Рисунок 2.13 Зависимость влияния геометрических параметров на предельную нагрузку при моделировании в ANSYS

Проанализировав данные, полученные в ходе выполнения моделирования, была составлена модель разрушения образцов (рисунок 2.14), которая показывает два пути разрушения образцов.

В первом случае, наблюдается работа металла шва, напряжения идут от корня шва под углом к облицовочному слою шва, в данном случае при первом варианте были получены удовлетворительные результаты моделирования.

Во втором случае работа шва не наблюдалась, разрушение пошло по границе сплавления. Данный факт говорит о непригодности данного образца для дальнейшего исследования в натурном эксперименте.

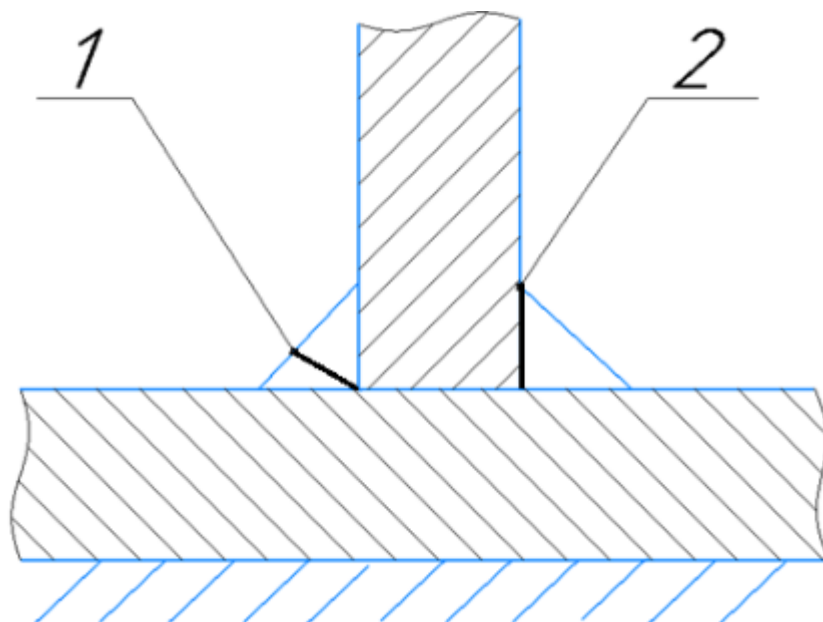


Рисунок 2.14 Схема разрушения образцов

### 2.3.2 Моделирование в системе ESI SYSWELD

Моделирование в системе ESI SYSWELD производилось с целью оценки сварочных напряжений, появляющихся в ходе сварки. Исходными данными для моделирования в ESI SYSWELD, также как и в ANSYS являлся предел текучести основного металла -500Мпа, категория сварочного материала по уровню прочности –5У42 и 3 катета с различными геометрическими параметрами:

- 1)Равносторонний 12 мм , угол при вершине лобового катета 45°
- 2)Стенка 11 мм ,полка 19 мм, угол при вершине лобового катета 60°
- 3)Стенка 13 мм, полка 8 мм , угол при вершине лобового катета 30°

Процесс сварки происходил в 3 прохода, с одинаковыми режимами сварки.

При анализе термического цикла выполняемых проходов постоянность была замечена при выполнении корневого прохода, температура корневого шва при моделировании 3х образцов с различной геометрией была неизменна, и составляла 3100°С. Далее, при наложении последующих проходов температура корневого шва снижалась, диаграмма термического цикла предоставлена на рисунке 2.15.

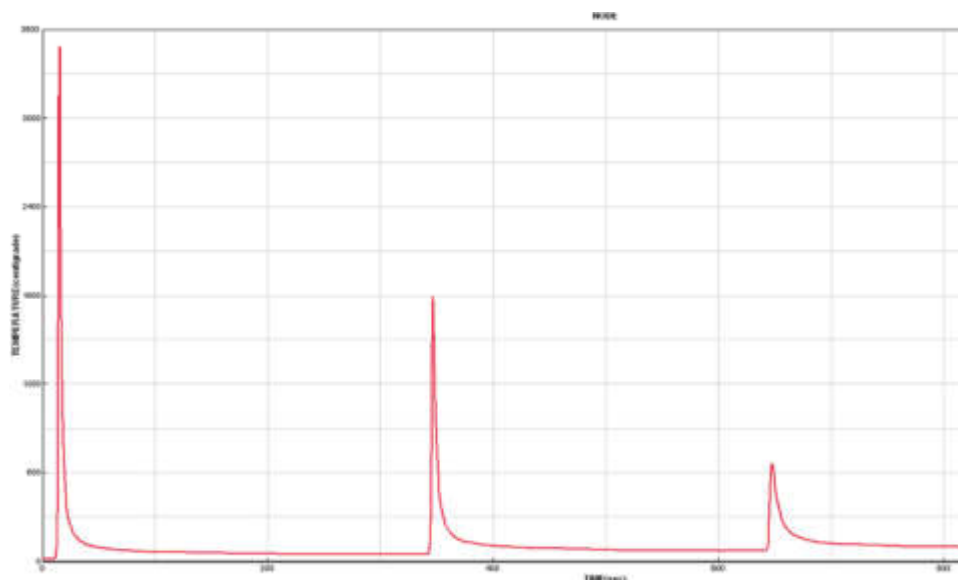


Рисунок 2.15—Термический цикл, оказываемый на корень шва.

На рисунке 2.16 показано распределение внутренних напряжений при сварке корневого шва. На рисунке 2.17 показано распределение внутренних напряжений при сварке заполняющего шва. На рисунке 2.18 показано распределение напряжений по Мизесу напряжений при сварке облицовочного шва.

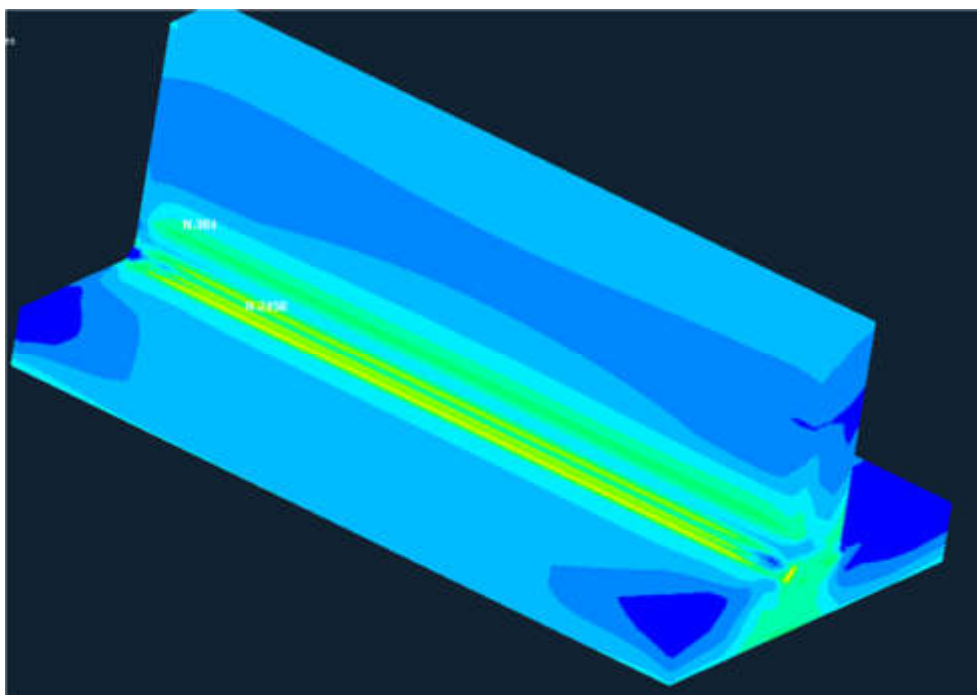


Рисунок 2.16—Распределение внутренних напряжений при сварке корневого шва.

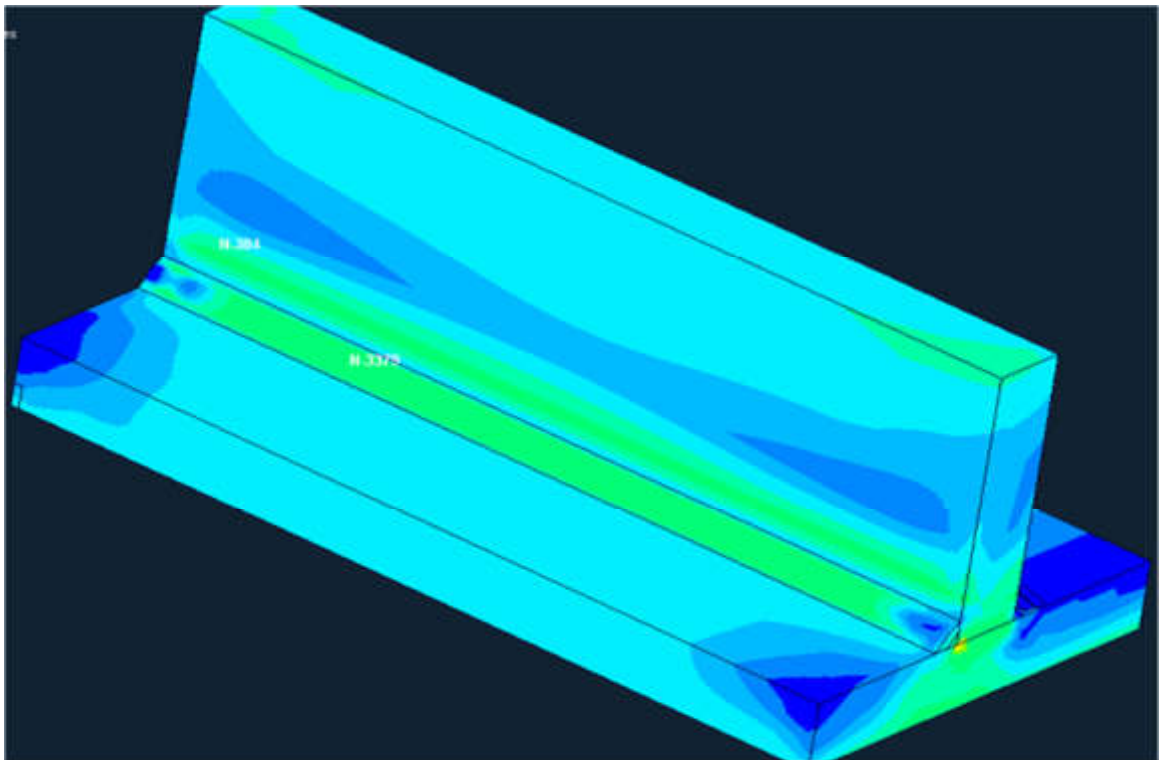


Рисунок 2.17 — Распределение внутренних напряжений при сварке заполняющего шва.

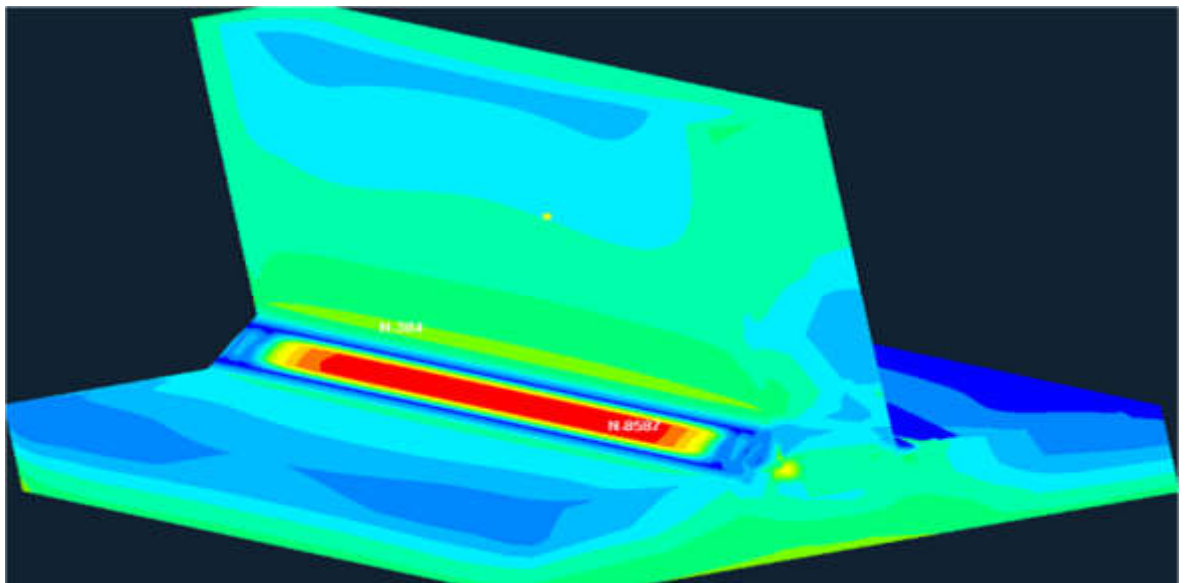


Рисунок 2.18 — Распределение внутренних напряжений при сварке облицовочного шва.

Из рисунков видно, что с каждым последующим наложением сварочного шва рост внутренних напряжений усиливается. Максимальные напряжения сконцентрированы в самом шве.

Для того, чтобы снизить эти внутренние напряжения мы используем разные геометрические параметры швов.

## Образец №1 с углом вершины лобового катета 30°

Результат испытываемых напряжений по Мизесу первого образца с катетом шва равным 30° приведен на рисунке 2.19.

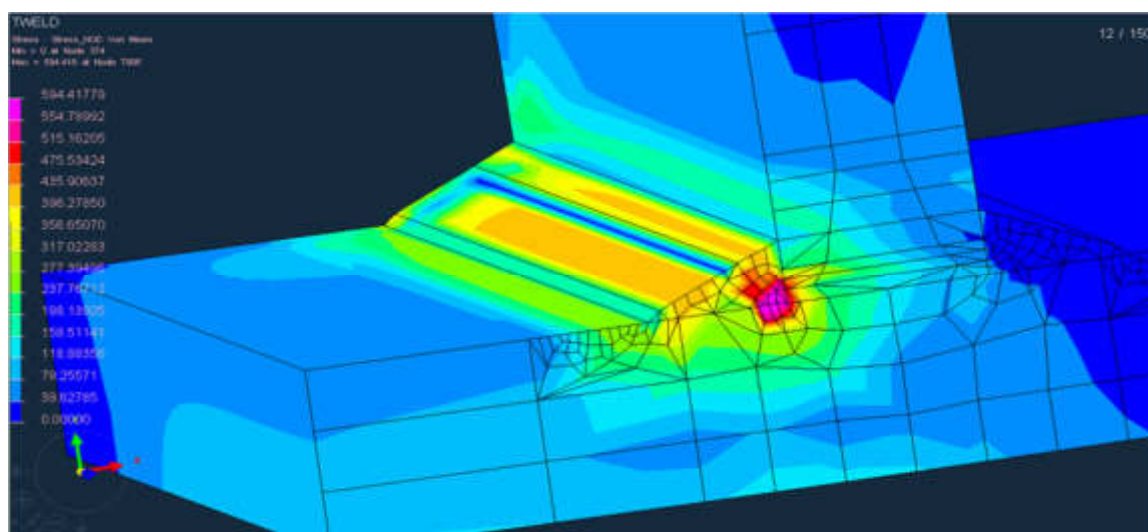


Рисунок 2.19 —Результат испытываемых напряжений по Мизесу образца. № 1

Так же стоит отметить, что для каждого прохода сварочного шва будут свои внутренние напряжения. Для данного образца эти значения подробно указаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2— Внутренние напряжения для образца №1

Проход №	Значение напряжений по Мизесу ,Мпа
1)Корень шва	516,6
2)Заполнение	590,6
3)Облицовочный шов	594,4

По такому же принципу были рассмотрены напряжения, которые приводят к разрушению. На рисунке 2.20 показано распределение этих напряжений в разрезе детали. А значения напряжений для каждого участка шва приведены в таблице 2.3. Увеличение напряжений на втором проходе говорит о повышенном пределе текучести металла шва в указанной зоне, здесь сработала закономерность увеличения напряжений в связи с высокими значениями предела текучести.

Таблица 2.3 Первые главные напряжения образца №1

Проход №	Первые главные напряжения, МПа
1)Корень шва	572,4
2)Заполнение	724,7
3)Облицовочный шов	681,1

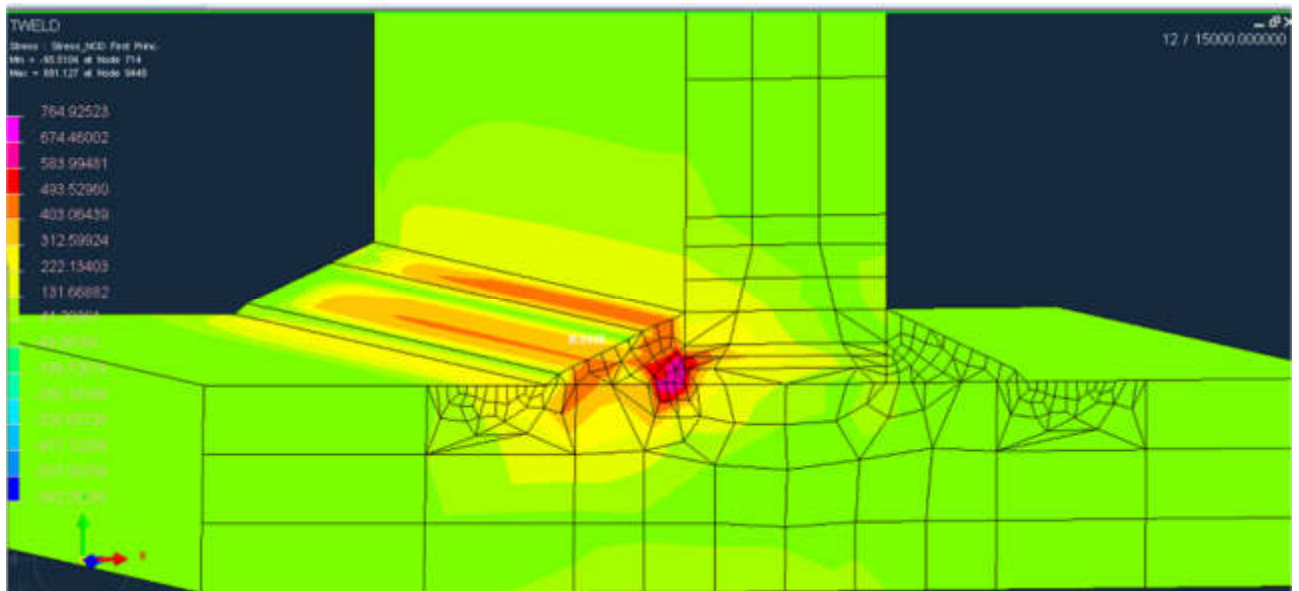


Рисунок 2.20—Первые главные напряжения образца №1

Также было рассмотрено, какие деформации испытывает каждый сварочный шов. На рисунке 2.21 приведены деформации корневого шва.

Данные о деформации по Мизесу последующих образцов будут указаны в таблицах без рисунков.

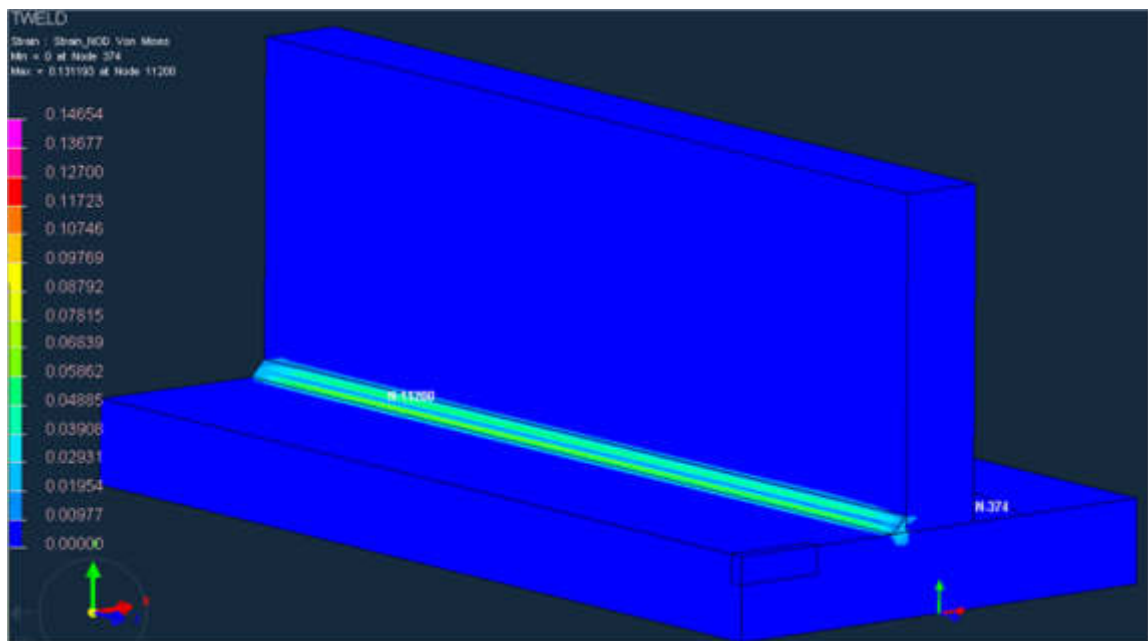


Рисунок 2.21—Пластические деформации корневого шва в образце № 1

Как видно, значение деформации для корневого шва составляет 0,131.

Деформации для заполняющего шва приведены на рисунке 2.22.



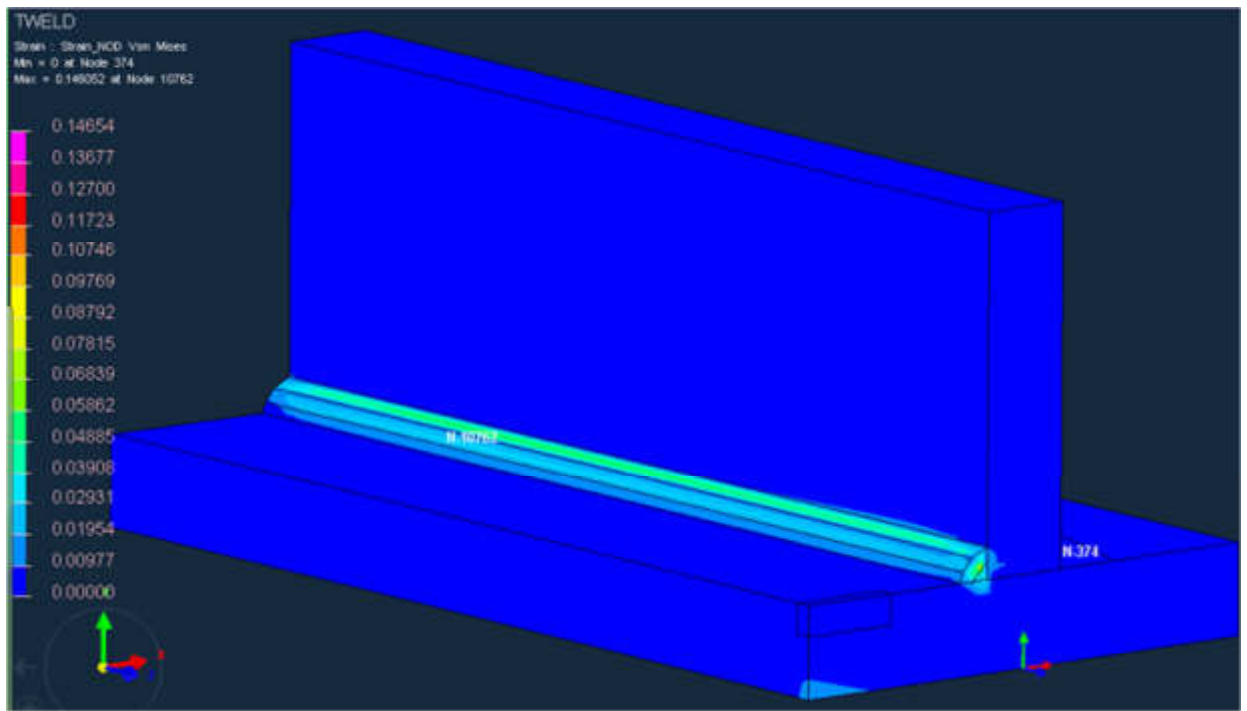


Рисунок 2.22—Пластические деформации в заполняющем шве

Значение деформации для заполняющего шва равно 0,146

Деформации для облицовочного шва приведены на рисунке 2.23.

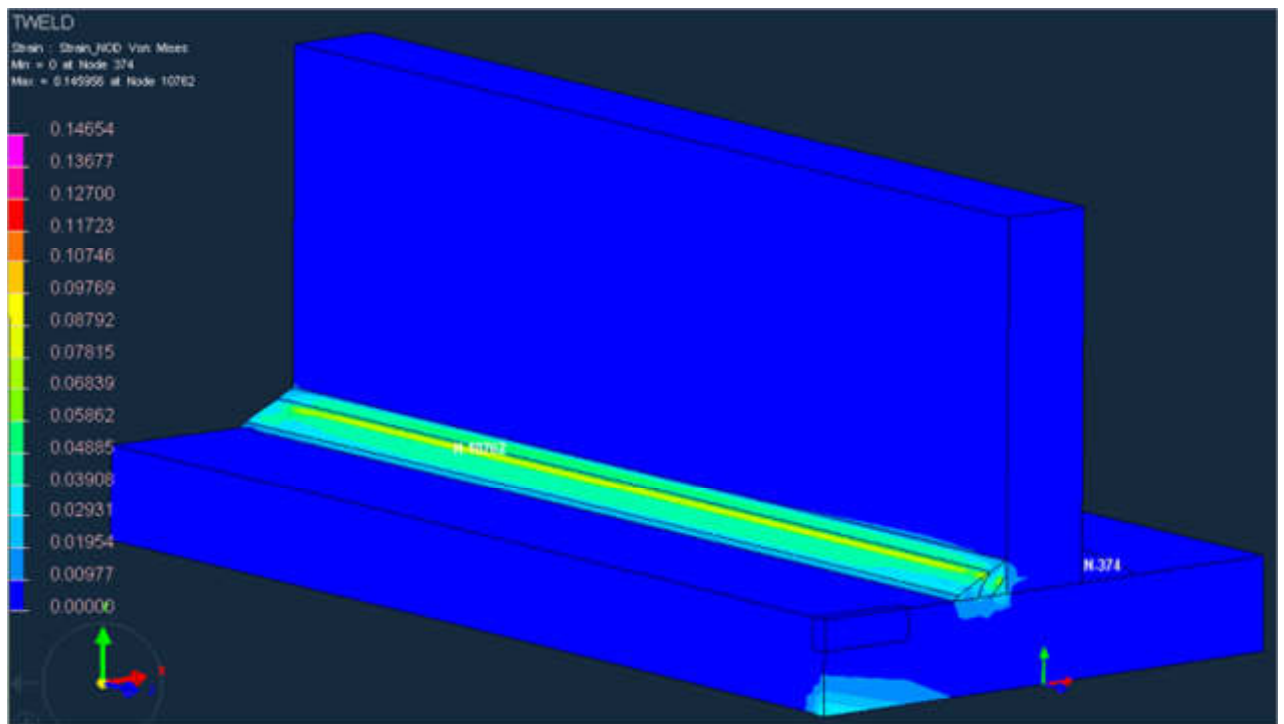


Рисунок 2.23—Пластические деформации в облицовочном шве

Значение деформации для облицовочного шва равно 0,145.

Более наглядно значения деформации данного образца приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4—Пластические деформации в образце № 1

Проход №	Значение деформации по Мизесу
1)Корень шва	0,131
2)Заполнение	0,146
3)Облицовочный шов	0,145

### Образец № 2 с углом вершины лобового катета 60°

Для второго образца результаты внутренних напряжений с катетом шва равным 60° приведены на рисунке 2.24.

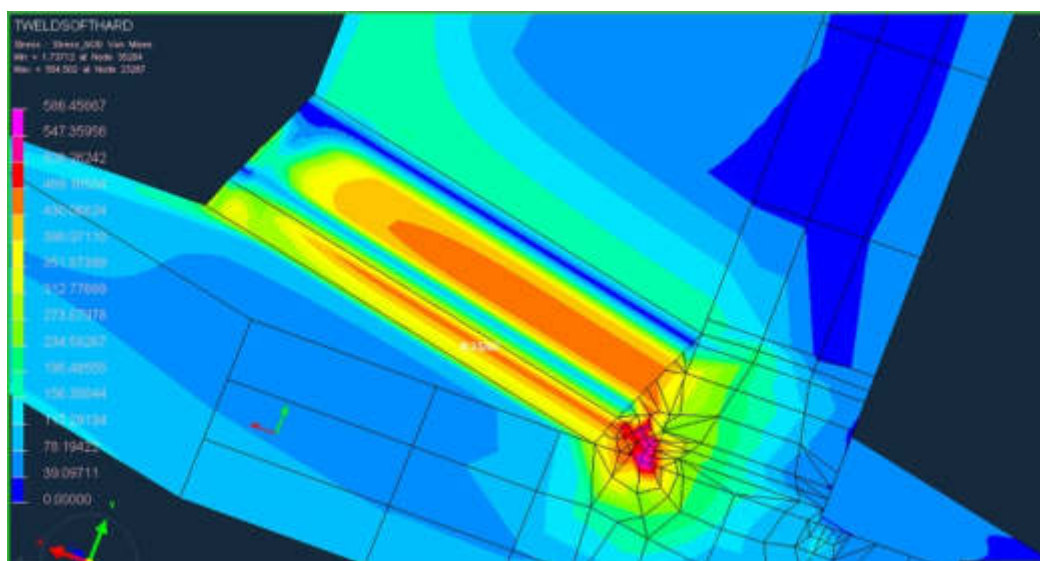


Рисунок 2.24 —Результат испытываемых напряжений образца № 2.

Значения внутренних напряжений данного образца для каждого прохода приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5—Значения внутренних напряжений в образце № 2

Проход №	Напряжения по Мизесу ,Мпа
1)Корень шва	519,6
2)Заполнение	586,4
3)Облицовочный шов	584,5

Значение первых главных напряжений приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6—Первые главные напряжения в образце № 2

Проход №	Первые главные напряжения, МПа
1)Корень шва	600,4
2)Заполнение	719,7
3)Облицовочный шов	732,2

Значения деформации данного образца приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7—Пластические деформации по Мизесу в образце № 2

Проход №	Значение деформации по Мизесу
1)Корень шва	0,174
2)Заполнение	0,181
3)Облицовочный шов	0,180

### Образец № 3 с углом вершины лобового катета 45°

Результаты внутренних напряжений для третьего образца с углом катета шва в 45° приведены на рисунке 2.25.

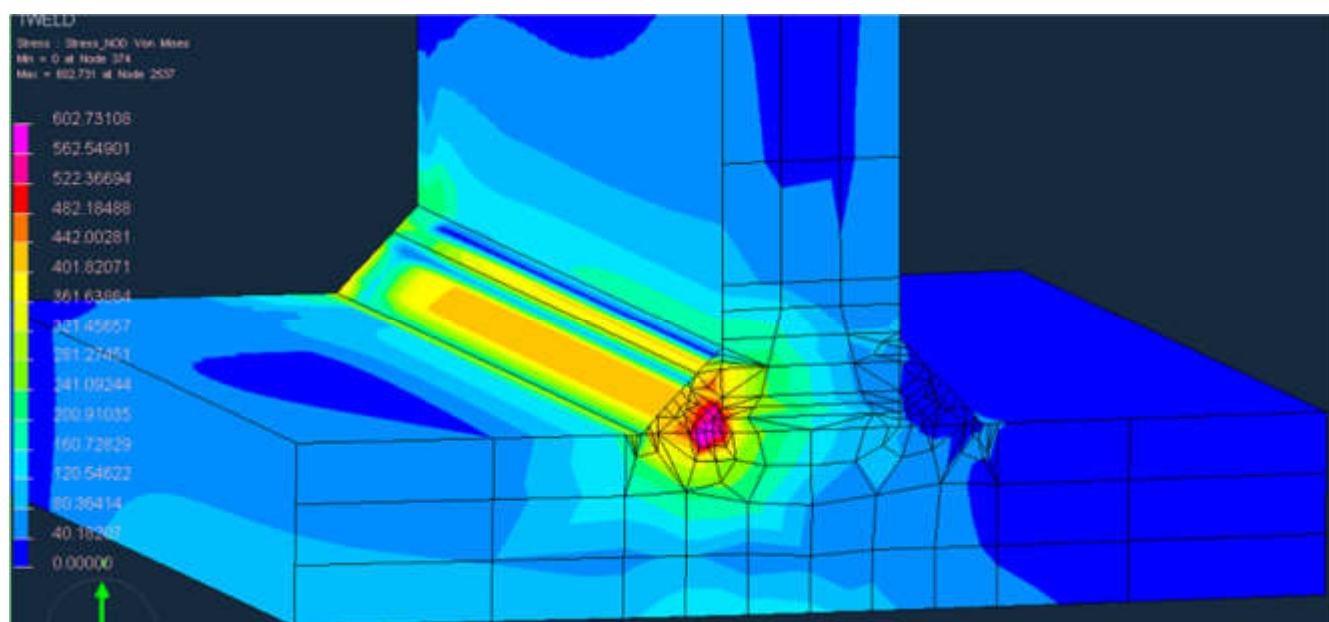


Рисунок 2.25 – Результаты напряжений для образца № 3.

Значения напряжений данного образца для каждого прохода приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7—Внутренние напряжения по Мизесу образца № 3

Проход №	Напряжения по Мизесу
1)Корень шва	510,7
2)Заполнение	571,9
3)Облицовочный шов	602,7

Значение деформаций приводящих к разрушению приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7— Первые главные напряжения в образце № 3

Проход №	Первые главные напряжения, МПа
1)Корень шва	573
2)Заполнение	723,4
3)Облицовочный шов	724,8

Значения деформации данного образца приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8— Пластические деформации по Мизесу в образце № 3

Проход №	Значение деформации по Мизесу
1)Корень шва	0,129
2)Заполнение	0,133
3)Облицовочный шов	0,135

Результаты моделирования внутренних напряжений для образцов приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9—Внутренние напряжения объектов исследования

№ образца	Угол катета шва (предел текучести основного металла/категория сварочного материала)	Напряжения по Мизесу, МПа		
		Корень шва	Заполнение	Облицовочный шов
Образец №1	30°(5Y42)	516,6	590,6	594,4
Образец №2	45 °(5Y42)	510,7	571,9	602,7
Образец №3	60 °(5Y42)	519,6	586,4	584,5
Образец №3	45 °(5Y50)	527,9	622,9	627,9

Более наглядно разницу видно на графике оценке напряжений по Мизесу (рисунок 2.26). Результаты моделирования внутренних напряжений приводящих к разрушению для всех 3 образцов приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10—Первые главные напряжения объектов исследования

№ образца	Угол катета шва (предел текучести основного металла/категория сварочного материала)	Первые главные напряжения, МПа		
		Корень шва	Заполнение	Облицовочный шов
Образец №1	30°(5Y42)	572,4	724,7	681,1
Образец №2	45 °(5Y42)	573	723,4	724,8
Образец №3	60 °(5Y42)	600,4	719,7	732,2
Образец №4	45 °(5Y50)	629,8	739,3	751,2

Более наглядно разницу видно на графике оценке первых главных напряжений(рисунок 2.27)

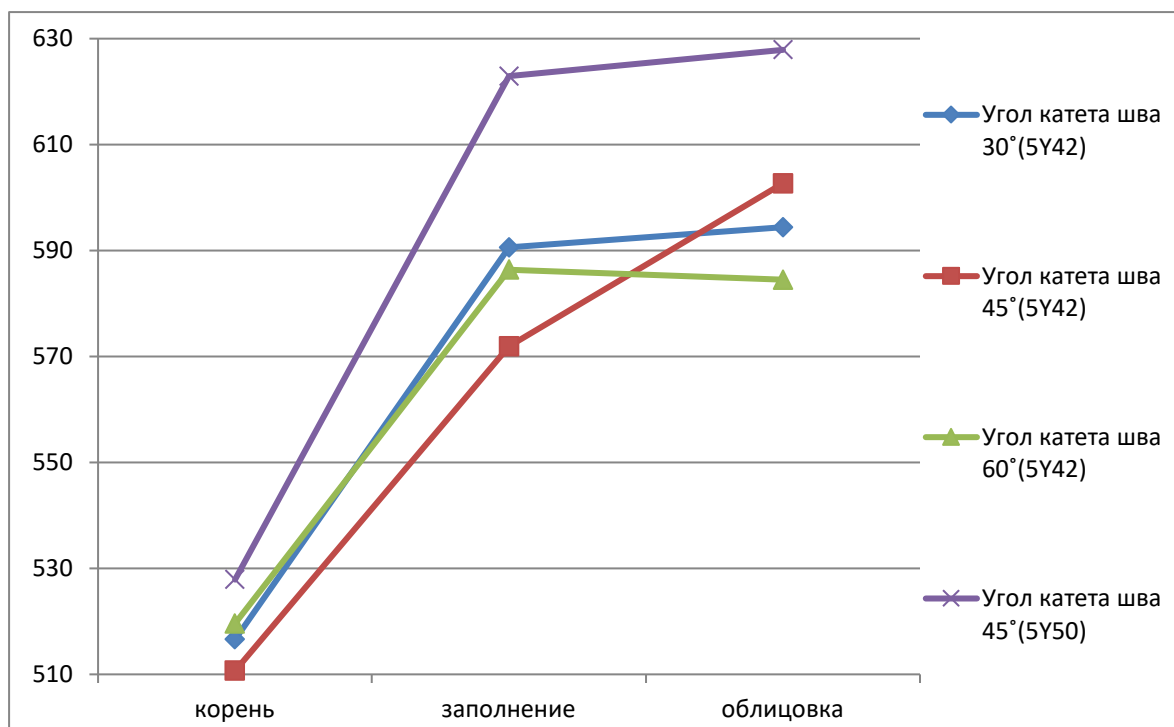


Рисунок 2.26—График оценки напряжений по Мизесу

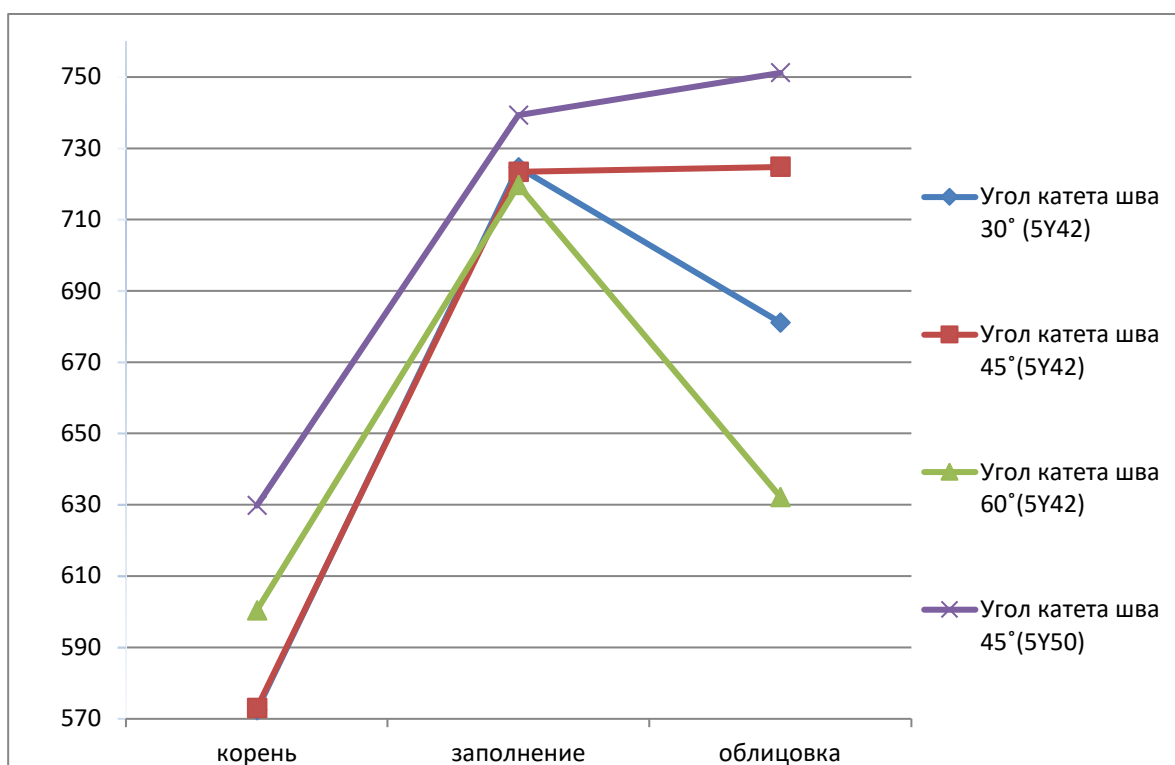


Рисунок 2.27—График оценки первых главных напряжений

Результаты моделирования испытываемых деформаций для всех образцов приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11—Пластические деформации объектов исследования

№ образца	Угол катета шва (предел текучести основного метал- ла/категория сва- рочного материа- ла)	Испытываемые деформации ,мм		
		Корень шва	Заполнение	Облицовочный шов
Образец №1	30°(5Y42)	0,131	0,146	0,145
Образец №2	45 °(5Y42)	0,129	0,133	0,135
Образец №3	60 °(5Y42)	0,174	0,181	0,180
Образец №4	45 °(5Y50)	0,178	0,207	0,209

Более наглядно разницу видно на графике оценке испытываемых деформаций(рисунок 2.28)

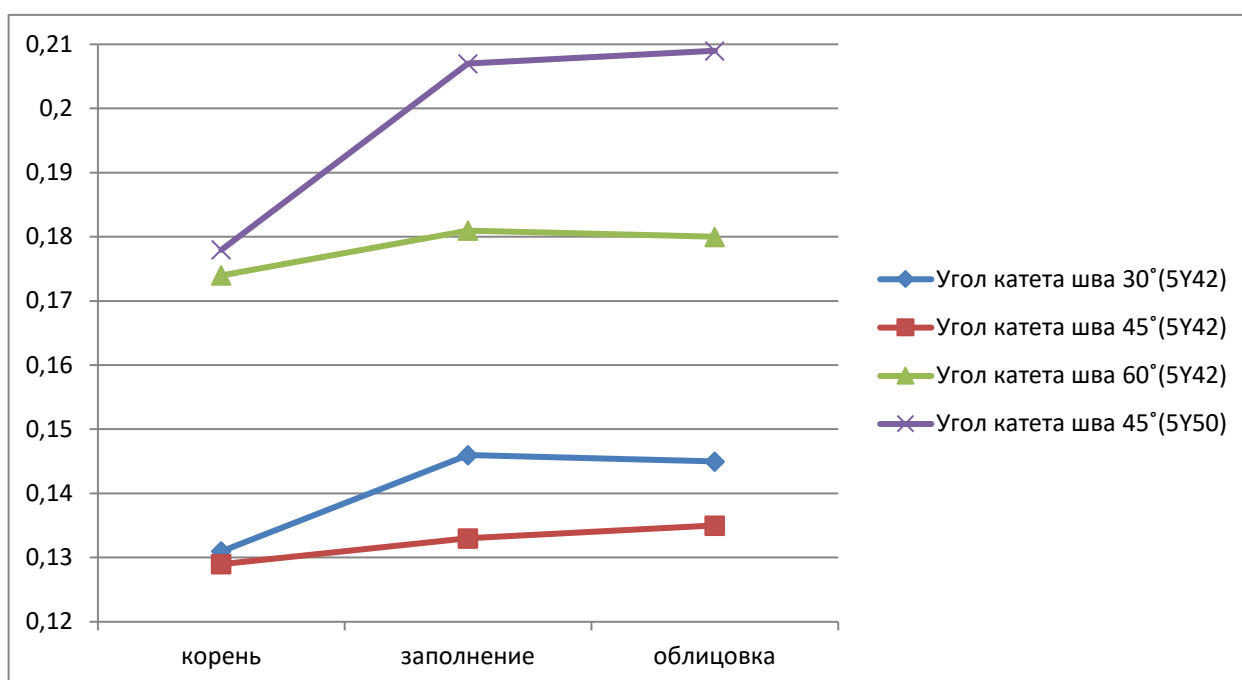


Рисунок 2.28—График оценки испытываемых деформаций

#### 2.4 Анализ влияния геометрических параметров на работоспособность шва

В ходе проведения анализа данных, полученных при моделировании в программных комплексах ESI SYSWELD и ANSYS было замечено, что по работоспособности сварной шов с углом вершины лобового катета 30° в некоторой сте-

пени уступает образцам с 45° и 60°. При моделирование в программном комплексе ANSYS было замечено, что образец с углом вершины лобового катета 30° разрушается по линии сплавления. Это связано с направлением растягивающей нагрузки и тем, что по стенке катет имел меньшую площадь наплавленного металла, чем по полке. По образцам с углом 45° и 60° получены результаты, показывающие работоспособность шва.

При анализе данных, полученных в результате моделирования в ESI SYS-WELD, первостепенным фактором для оценки работоспособности шва были первые главные напряжения, так как данные значения показывают на каком этапе зарождаются структуры, приводящие к разрушению образцов. По сравнению с работоспособностью шва образца № 4 45°(5Y50), имеющего базовые характеристики образец №2 с катетом 45°(5Y42) показал хорошие результаты. Разница в напряжениях, которые приводят к образованию структуры разрушения составила 4% при разности в пределе текучести 11%. Также стоит обратить внимание на наличие пластических деформаций после сварки. У образца № 4 их величина составила 21%, в то же время у образца № 2 величина составила 13%, что говорит о дополнительном запасе пластичности, который образуется за счёт применения механически неоднородного соединения.

Образец с углом катета 30°, показал самый низкий результат. Исходя из полученных данных, образец с углом при вершине лобового катета 30° в натурные испытания не закладывался.

## 2.5 Образцы сварного соединения для испытаний.

В качестве аналога стали E500W для проведения натуральных испытаний была выбрана сталь 10Г2ФБЮ. Механические свойства данной стали, применяемой в опытах приведена в таблице 2.12.

Таблица 2.12— Механические свойства стали 10Г2ФБЮ

Марка стали	Временное сопротивление, $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение, %
10Г2ФБЮ	620	500	24,5

Химический состав стали 10Г2ФБЮ описан в таблице 2.13

Таблица 2.13— Химический состав стали 10Г2ФБЮ

Химический элемент	C	Si	Mn	S	P	V	N	Cu	Nb	Ti	Al
%	0,06	0,08	1,62	0,001	0,008	0,006	0,005	0,11	0,05	0,02	0,03

Для проведения механических испытаний было собрано 3 образца тавровых соединений ТЗ с приведенными на рисунке 2.29 геометрическими параметрами.

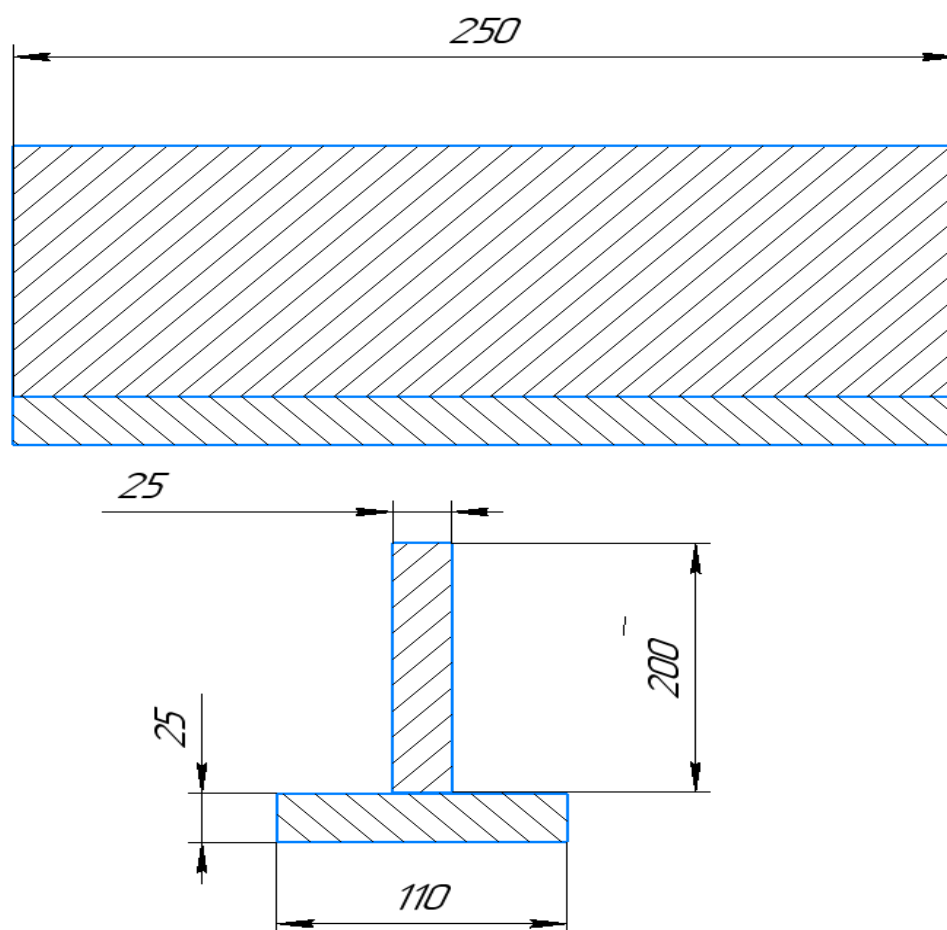


Рисунок 2.29—Геометрические параметры образца

### 2.5.1 Оборудование для сварки образцов

Сварку производили на сварочном роботе Fanuc 120IC/10L с позиционером Fanuc 2-axes Servo Positioner A05B-1220-J201 с источником сварочного тока Kemppi KemparcPulse 450.

Характеристики оборудования приведены в таблице 2.14

Таблица 2.14—Характеристики оборудования



Напряжение холостого хода	50 В
Мощность холостого хода	100 Вт
Производительность	88%
Коэффициент мощности	0,90
Максимальный выходной ток	450 А (ПВ 60%)
Диапазон рабочей температуры	-20...+40
Управляемых осей	6
Повторяемость	+/-0,03
Диапазон рабочей температуры	0...+45

### 2.5.2 Параметры сварки

Пластины для сварки таврового соединения собирались на прихватки. Угол сборки контролировался угольником. По окончании сборки пластины устанавливались на сварочный позиционер, на котором и производилась сварка.

Параметры сварки представлены в таблице 2.15.

Таблица 2.15—Параметры сварки

№ прохода	Сила тока I ,А	Напряжение U ,В	Скорость СваркиV ,см/мин	Погонная энергия , кДж/см
1	186	22,8	20см/мин	10 +/-1
2	182	22,8		10 +/-1
3	188	22,8		10 +/-1
4	195	22,9		10 +/-1
5	200	22,8		10 +/-1
6	195	22,9		10 +/-1

Схема очередности наложения валиков представлена на рисунке 2.30

Для проведения дальнейших испытаний на статическое растяжение, к ранее сваренному тавру приварили с обратной стороны пластину образовав симметричное тавровое соединение.

Для того, чтобы разрушение происходило в испытуемом соединении – площадь наплавленного металла в несколько раз превышала площадь металла, в рабочей плоскости (рисунок 2.31)

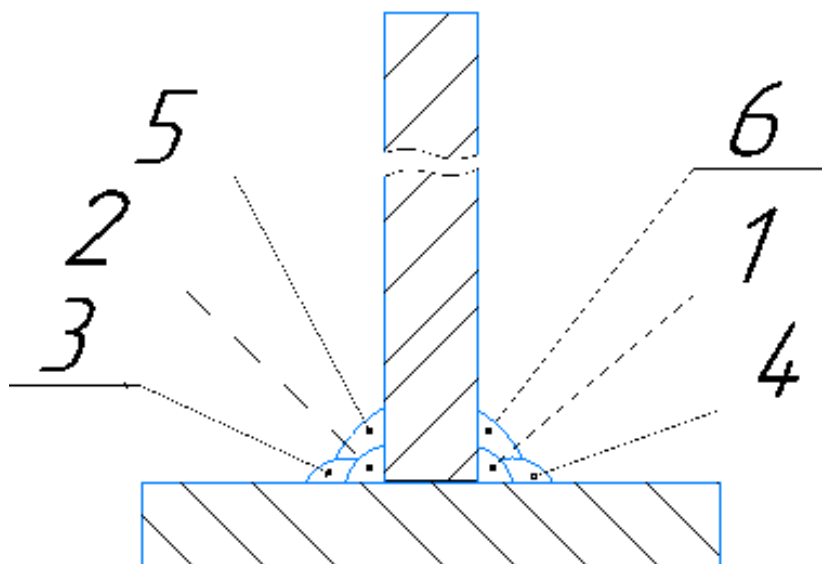


Рисунок 2.30—Порядок наложения швов(1 ,2-корневой ;3,4-заполняющие;5,6-облицовочные)

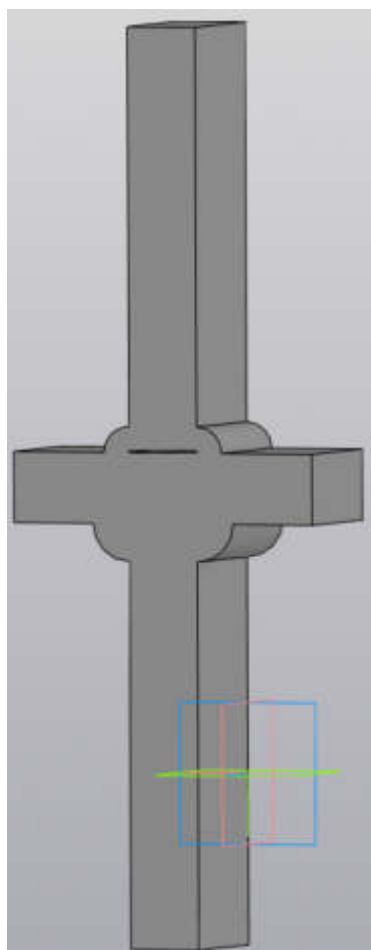


Рисунок 2.31—Модель образца на испытания  
2.6 Механические испытания

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Полученные образцы были распилены на 4 части, 3 части для проведения испытаний на статическое растяжение (рисунок 2.32), 1 части для измерения твердости и проведения металлографического исследования.



Рисунок 2.32—Испытуемые тавровые сварные соединения

После маркировки образцов , провели механические испытания на статическое растяжение, результаты испытаний приведены в таблице 2.16

Таблица 2.16—Результаты механических испытаний

№ варианта соединения	Угол катета шва (предел текучести основного металла/категория сварочного материала)	№ испытуемого образца	Нагрузка, при которой происходит разрушение, Н	Среднее значение нагрузки разрушения, Н	Среднее значение нагрузки разрушения, МПа
№1	45° (5Y50)	1-1	472360	484333	585
		1-2	468440		
		1-3	483140		
№2	45° (5Y42)	2-1	513130	551166	548
		2-2	523800		
		2-3	484030		
№3		7-1	561630		
		7-2	572300		
		7-3	552900		

Окончание таблицы

№4	60° (5Y42)	6-1	532530	540333	535
		6-2			
		6-3			

Фотографии, разрушенных образцов, позволяющие оценить тип разрушения приведены ниже.

Образец № 7 с катетом 45° и категорией прочности сварочного материала 5Y42.

Анализируя характер разрушения (рисунок 2.33), становится очевидно, что разрушение происходило вязко, место разрушения - центр шва. Как правило, сварное соединение считается годным, когда разрушение происходит по зоне сплавления, но ввиду того, что в данном соединении закладывался концентратор напряжения в виде непровара, то разрушение по центру шва говорит о том, что пластичность металла дала положительный эффект. При этом трещина из концентратора не разрушила образец, разрушение произошло на полученном значении предельной нагрузки ввиду наличия дефекта в форме несплавления в центре шва.



Рисунок 2.33—Образец с катетом 45°

Образец № 2 с катетом 45° и категорией прочности сварочного материала 5Y42.

Анализируя характер разрушения (рисунок 2.34), становится очевидным, что металл шва не работал, разрушение произошло по зоне сплавления. При подробном изучении образца замечено наличие дефекта в виде несплавления по всей длине

шва. Характер разрушения говорит о неправильно подобранной силе тока , так как режим не обеспечил проплавление.

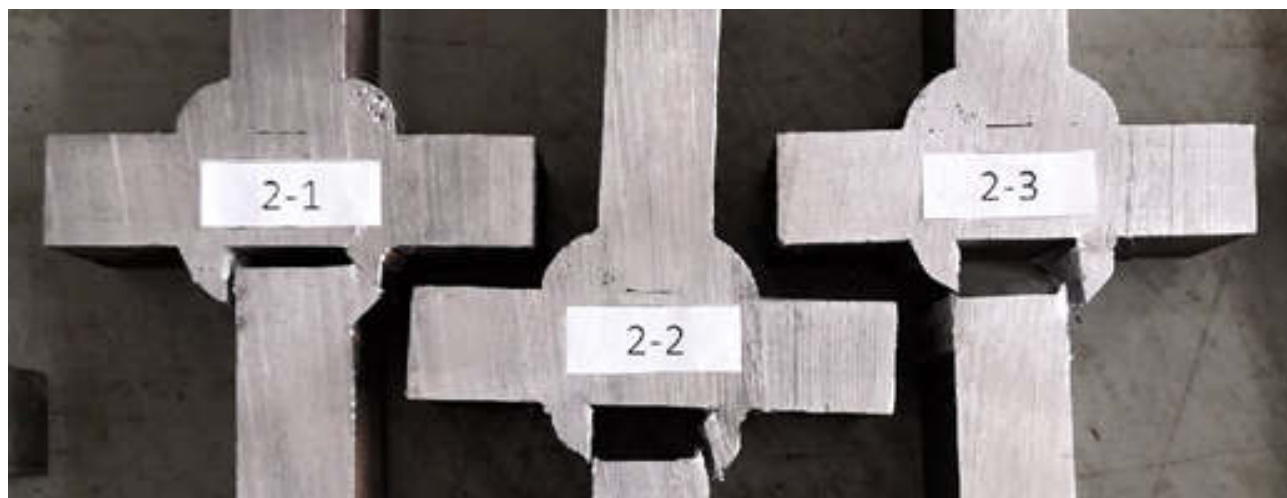


Рисунок 2.34—Образец с катетом 45°

Образец № 6 с катетом 60° и категорией прочности сварочного материала 5Y42.

Анализируя характер разрушения (рисунок 2.35), видно, что при работе на растяжение была задействована часть наплавленного металла находящегося на полке. Концентратор напряжения в виде непровара спровоцировал образование трещины, по пути её развития произошло разрушение. На образце 6-2 присутствует дефект в виде несплавления, что послужило дополнительным концентратором при разрушении.

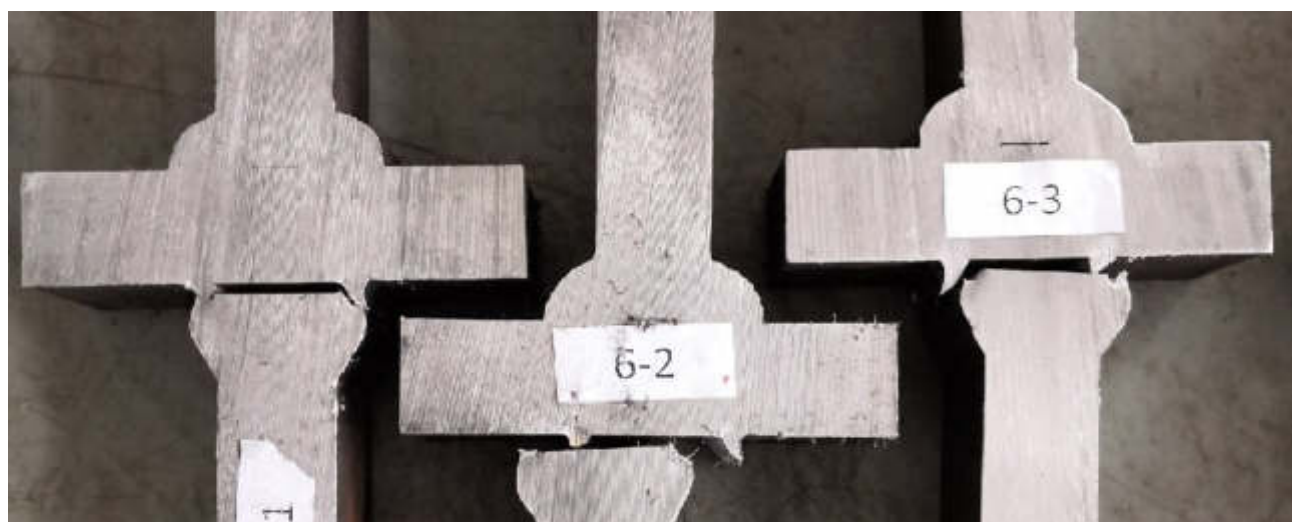


Рисунок 2.35—Образец с катетом 60°

Для наглядного сравнения результатов испытаний, значения приведены на графике (рисунок 2.36)

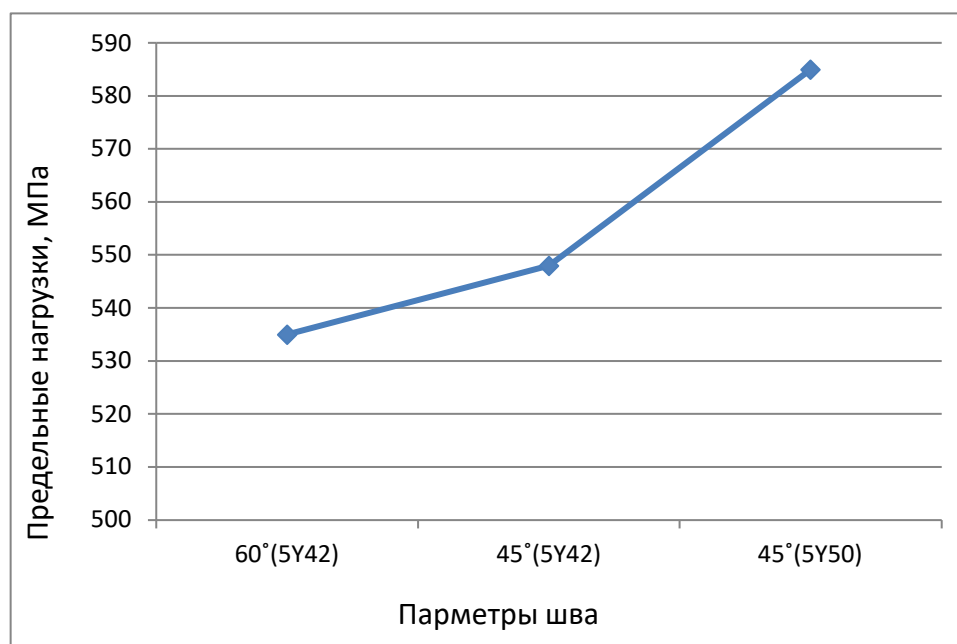


Рисунок 2.36—Результаты механических испытаний

## 2.7 Методика конструирования мягких сварных швов в тавровых соединениях

После проведения исследований влияния геометрических параметров сварного шва с применением мягких сварочных материалов на механические свойства таврового соединения, становится очевидным, что благодаря снижению предела текучести металла шва снижается риск развития трещин, так как снижаются напряжения шва, также обеспечивается запас пластичности, что особо заметно на графике оценки пластических деформаций. Таким образом, мягкие сварные швы зарекомендовали себя положительным образом в части обеспечения технологической прочности соединения, но при этом негативно влияя на конструктивную прочность, которая требует дополнительных допущений при проектировании. Для того, чтобы минимализировать вероятность снижения холодных трещин в соединении в то же время обеспечить требуемую технологическую и конструктивную прочность предлагается несколько путей развития:

1) Применение композитных сварных швов, где корневой слой шва выполняется мягким швом, тем самым замедляя распространение трещины, а заполняющие и облицовочные слои шва выполнены равнопрочным соединением, которое обеспечивает как конструктивную, так и технологическую прочность. Результаты

проведения данного эксперимента можно найти в работе «Обеспечение работоспособности таврового сварного соединения с композитными швами для судокорпусных конструкций из высокопрочных сталей».

2) Достижение конструктивной и технологической прочности за счет увеличения площади наплавленного металла в направлении действия растягивающей нагрузки. Данный факт был замечен при сравнении результатов механических испытаний швов, моделирования в ANSYS, образцы с увеличенным количеством металла, наплавленным по направлению растягивающей нагрузки (стенка) показали удовлетворительный результат, как по значениям, так и по характеру разрушения. Разница в значениях между образцом с увеличенным количеством наплавленного металла и стандартным при проведении натурных испытаний составила всего 6%, при том, что в образце с увеличенным количеством наплавленного металла присутствовали дефекты.

Для обеспечения конструктивной прочности механически неоднородных сварных соединений необходимо производить расчет минимального катета с учетом коэффициента механической неоднородности соединения, а также предела текучести основного металла, предела текучести металла шва и площади базового катета, рекомендованного нормативными документами, по выражению 1:

$$K = \sqrt{2 * S_{500} \frac{\sigma_{0,2}^{500}}{\sigma_{0,2}^{420}}} \quad (1)$$

где  $\sigma_{0,2} \geq 500$  Мпа основной металл из стали E500W,

$\sigma_{0,2} \geq 420$  Мпа, сварочный материал соответствующий категории 4Y42

$S_{500}$ , площадь базового катета шва рекомендованного СП 16.13330.2017 для равнопрочного соединения.

При этом, при конструировании неравнокатетных швов необходимо большое внимание уделять качеству сварки во избежание влияния технологических дефектов на прочностные характеристики соединения.

									Лист
									42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнив цель данной работы, а именно, оценку работоспособности сварного соединения с механической неоднородностью и различными геометрическими параметрами, получили результаты, которые позволяют оценить сварные соединения несколькими инструментами :

### 1) ANSYS WORKBENCH.

Благодаря данному ПО, получили предварительные результаты, которые помогли оценить работоспособность швов и предугадать дальнейшее развитие событий, а именно, тот факт, что наряду с механической неоднородностью значительным образом на механические свойства изделия влияют и геометрические параметры.

### 2) ESI SYSWELD.

С помощью данного ПО, были оценены возникающие напряжения как остаточные, так и первые главные, которые характеризуют момент разрушения образцов в условиях жесткого закрепления. Разница в значении разрушающей нагрузки между образцом с равнопрочным соединением и соединением выполненным с механической неоднородностью при оценке первых главных напряжений составила 4,5% , а во время механических испытаний эта разница составила 6,3 %.

Также при анализе пластических деформаций было замечено, что при равнопрочном равнокатетном соединении, пластические деформации достигли 21%, в то время как равнокатетное соединение с мягким швом достигло лишь 13% пластических деформаций.

Таким образом, анализируя результаты полученные в ходе комплексного изучения вопроса, рекомендуется Российскому морскому регистру судоходства учесть вопрос возможности применения сварочных материалов более низкой категории при выполнении сварки высокопрочных сталей, а именно, категории сварочного материала по уровню прочности на 2 уровня ниже основного металла – 5Y42 для сварки стали категории PCE500W.

									Лист
									43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

15.04.01.2020.144 ПЗ



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 52927-2015 Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. – Москва. ФГУП Стандартиформ, 2017. – 65с.

2.НД:2-020101-124 .«ПРАВИЛА КЛАССИФИКАЦИИ И ПОСТРОЙКИ МОРСКИХ СУДО Часть II КОРПУС» – Санкт-Петербург.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2020. – 18с

3.НД № 2-020101-124. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII. Материалы. – Санкт-Петербург.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2020. – 273 с.

4.СНиП II-23-81СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. –АО "НИЦ "Строительство" - ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко, МГСУ, СПбГАСУ

5.ГОСТ 14771-76: "Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры", –Москва ,Стандартиформ.

6.ГОСТ 5264-80 Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры

7.Шахматов М.В Работоспособность и неразрушающий контроль сварных соединений с дефектами / М.В Шахматов , В.В Ерофеев , В.В Коваленко.- Челябинск: ЦНТИ. 2000.-227 с.

8. Бакши О.А. Повышение несущей способности нахлесточных и тавровых соединений с лобовыми / О.А. Бакши ,Н.Л. Зайцев ,Р.З.Шрон ,/ Сварочное производство. 1977- №9. –С-3-5

9. НД № 2-020101-124. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIV. Сварка. – Санкт-Петербург.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2020. – 151 с.

10. И.К. Походия. Сварка порошковой проволокой/ И.К. Походия, А.М. Суптель, В.Н. Шлепаков. – Киев: изд-во «Наукова думка», 1972. – 222с.

11. Чернявский А.О. Расчетная оценка прочности механически неоднородных тавровых сварных соединений высокопрочных сталей/ Чернявский. А.О,

										Лист
										44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2020.144 ПЗ					

Иванов М.А, Тиньгаев А.К, Алрухайми А.Г. // Сварка и диагностика. – 2019. – Вып.4. – С. 21-25.

12. Бакши О.А. Механическая неоднородность сварных соединений. Текст лекций по курсу «Специальные главы прочности сварных конструкций» Часть 1/ О.А. Бакши// Челябинский политехнический институт им. Ленинского комсомола. – 1981. – 57с.

13. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наукова думка, 1973. – 216 с.

14. Партон В.З. Механика упругопластического разрушения/ В.З. Партон, Е.М. Морозов. – М:Наука, 1985. – 504 с.

15. Айметов С.Ф. Разработка методов оценки работоспособности сварных соединений при статическом изгибе: диссертация... кандидата технических наук: 05.02.10-Челябинск, 2011.-187 с: ил.

										Лист
										45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2020.144 ПЗ					