

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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

Рецензент

Должность, место работы

Подпись

И.О. Фамилия

« ____ » _____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ М.А. Иванов

« ____ » _____ 2017 г.

Оценка влияния механической неоднородности сварных соединений с угловыми швами,
работающих в условиях растяжений и изгиба

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ)**

Руководитель ВКР

_____ **Айметов С. Ф.,**
Подпись И.О., Фамилия

« ____ » _____ 2017 г.

Автор ВКР

магистрант группы П-246

_____ **Суханов Владислав**
Игоревич

« ____ » _____ 2017 г.

Нормоконтролёр
преподаватель

_____ **Ю.В. Безганс**

« ____ » _____ 2017 г.

Челябинск, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Одним из важных направлений развития сварочного производства является повышение надежности сварных конструкций и улучшение норм их проектирования. При изготовлении сварных конструкций возможность возникновения дефектов достаточно высока. В данное время установлены очень жесткие нормы на возможные дефекты, размеры которых, зачастую, выбраны как минимально возможные.

Особенную роль в работоспособности оборудования с разнородными конструктивными элементами играют мягкие и твердые прослойки сварных соединений. Под «мягкими прослойками» понимаются «участки сварного соединения, имеющие пониженные прочностные характеристики по сравнению с таковыми для основного металла». Твердые прослойки обладают повышенной прочностной характеристикой. Однако в большинстве случаев они менее пластичны и более склонны к хрупкому разрушению. Сварным соединениям присуща и электрохимическая неоднородность, порождаемая теми же факторами, что и структурно механическая неоднородность. Существующие методы и подходы к оценке механической неоднородности, в основном, на предположении однородности механических характеристик как в микро, так и макрообъемах, что в ряде случаев может значительно завышать характеристику безопасности их эксплуатации в лучшем случае, а в худшем привести к непредвиденным последствиям катастрофических разрушений. Решению этой сложной, актуальной и практически важной проблеме и посвящена настоящая работа.

Цель работы – Оценка влияния механической неоднородности сварных соединений с угловыми швами, работающих в условиях растяжения изгиба на прочность.

Для решения поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи:

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

- оценка роли твердых прослоек в угловых соединениях;
- выбор оптимальных параметров сварного соединения;
- определить при каких параметрах сварного соединения, при растяжения и изгибе деформации будут в основном металле, а не в сварном шве;
- исследование напряжённо деформированного состояние тавр соединения с угловыми швами с усиление и без

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Общие сведения, классификация, назначение угловых соединений

Угловое соединение - сварное соединение двух элементов, расположенных под углом и сваренных в месте примыкания их краев (рис. 1.1).

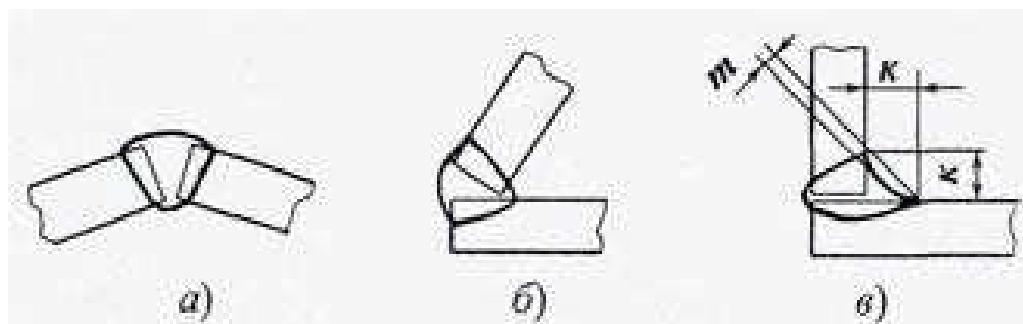
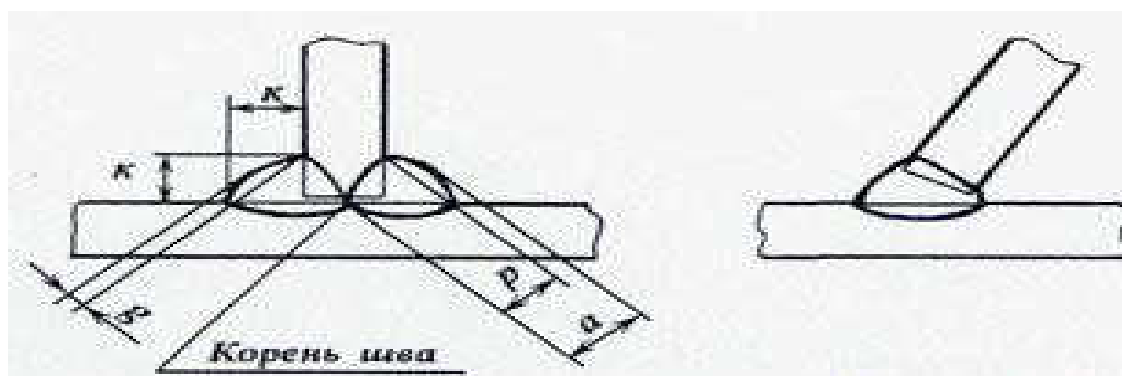


Рисунок 1.1 – Угловые соединения

Тавровое соединение - сварное соединение, в котором торец одного элемента примыкает под углом и приварен к боковой поверхности другого элемента (рис. 1.2).



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.251.00 ПЗ

Лист

8

Рисунок 1.2 – Тавровые соединения

Нахлесточное соединение - сварное соединение, в котором сваренные элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (рис. 1.3, а, б). Отсутствие опасности прожогов при сварке облегчает применение высокопроизводительных режимов сварки. Применение нахлесточных соединений облегчает сборку и сварку швов, выполняемых при монтаже конструкций (монтажных швов).

Торцовое соединение - сварное соединение, в котором боковые поверхности сваренных элементов примыкают друг к другу (рис. 1.3).

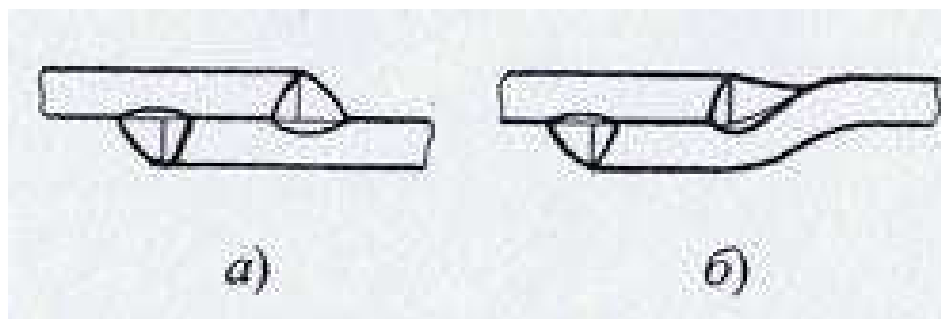


Рисунок 1.3 – Нахлесточные соединения (а, б)

Сварные швы подразделяют по разным признакам: по типу шва, по протяженности, по способу выполнения, по пространственному положению и по форме разделки кромок.

По типу сварные швы делят на стыковые, угловые и прорезные.

Угловой шов - сварной шов углового, нахлестанного или таврового соединений.

Угловой шов имеет следующие размерные характеристики: катет, толщину, расчетную высоту. Катет углового шва определяется кратчайшим расстоянием от поверхности одной из свариваемых частей до границы углового шва на поверхности второй свариваемой части (см. рис. 1.2, в; 1.3, а). Катет задается в качестве параметра режима, который нужно выдерживать при сварке. Толщина углового шва a - наибольшее расстояние от поверхности углового шва до точки максимального проплавления основного металла (см. рис. 1.3, а). Для оценки

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2017.251.00 ПЗ				

прочности сварного соединения используют расчетную высоту углового шва - r (см. рис. 1.3, а). Для угловых швов более благоприятна вогнутая форма поверхности шва с плавным переходом к основному металлу (см. рис. 1.3, в).

Стыковые сварные швы, как правило, выполняют непрерывными. Угловые швы могут быть непрерывными (рис. 1.4, а) и прерывистыми (рис. 1.4, б), с шахматным (рис. 1.4, в) и цепным (рис. 1.4, г) расположением отрезков шва. Угловые швы могут быть выполнены и точечными швами (рис. 1.4, б, д).

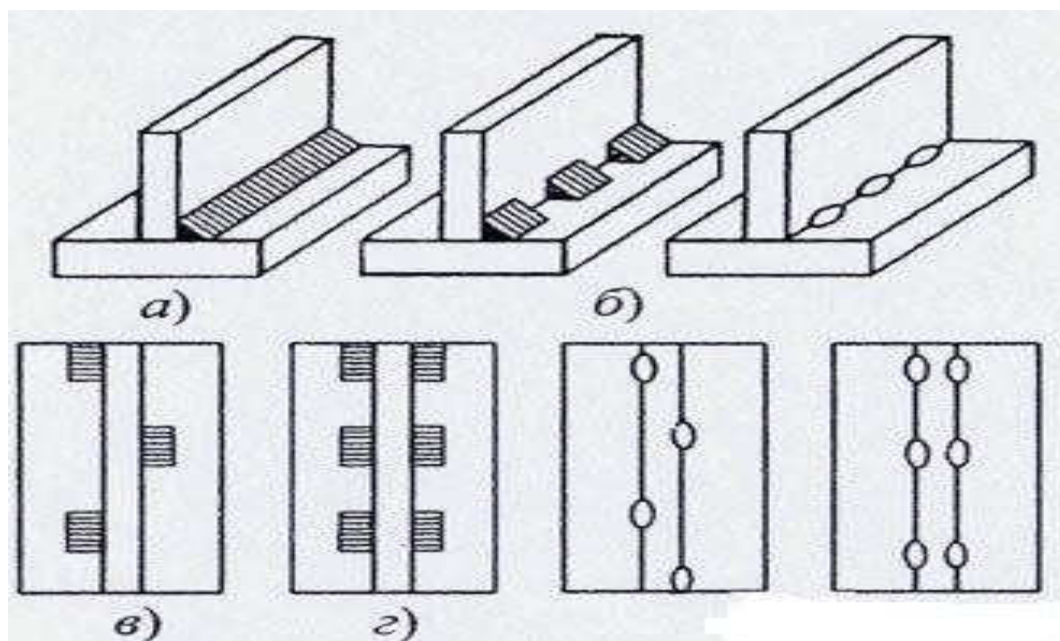


Рисунок 1.4 – Угловые швы тавровых соединений

МКЭ используется при выполнении проверочного расчета, для проведения которого необходимо знать геометрию соединения и хотя бы приблизительные линейные размеры. С этой целью в качестве первого приближения для выполнения расчета можно использовать традиционные методы расчета, реализованные в системе APM Joint, а в дальнейшем перейти к МКЭ. Такой подход позволяет существенно снизить время реализации комплексного расчета сварного соединения.

Применение на втором этапе для прочностного анализа метода конечных элементов позволяет повысить надежность ответственных соединений, снизить металлоемкость и повысить технологичность сварной конструкции.

Назначение и область применения угловых швов

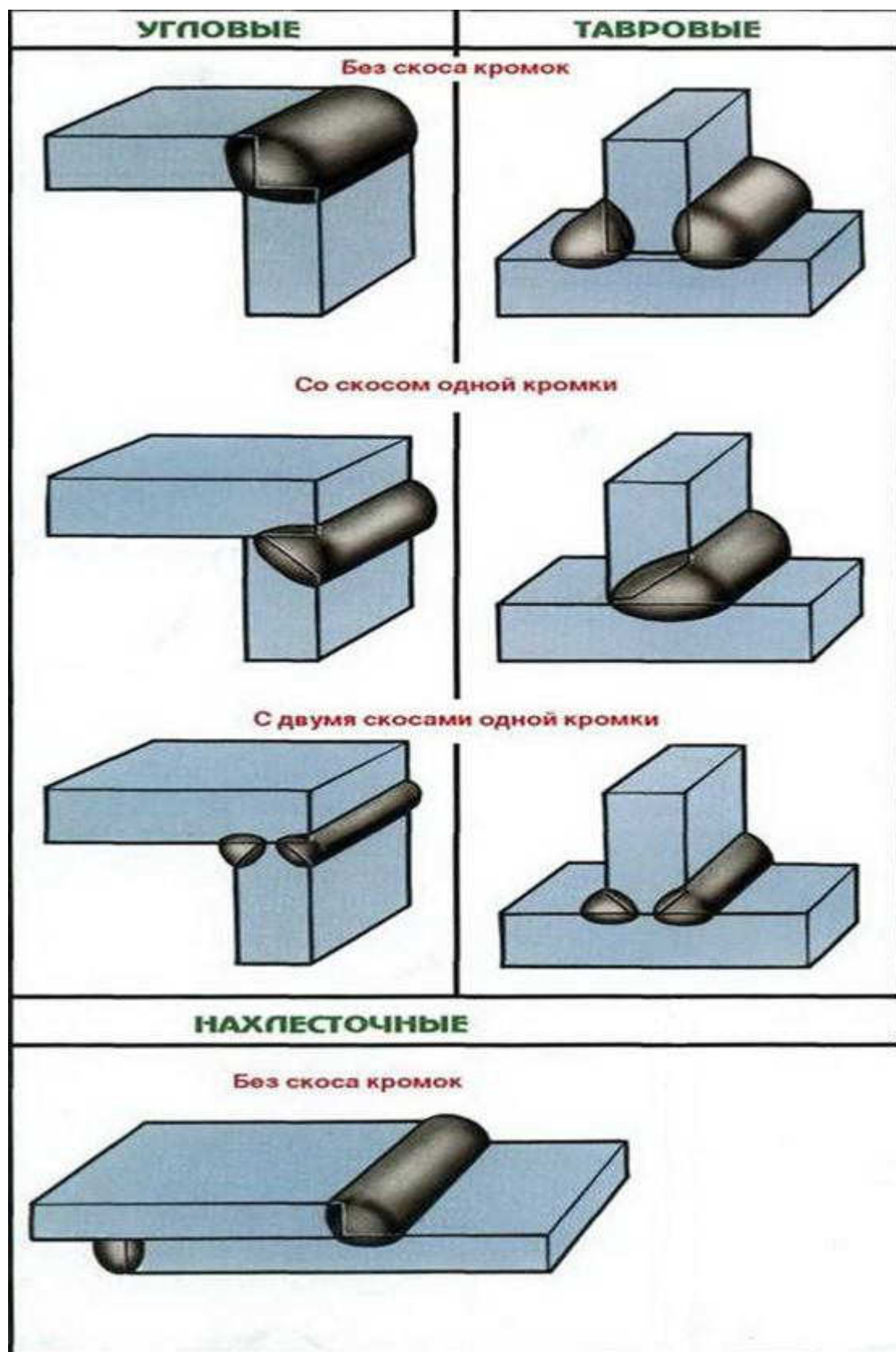


Рисунок 1.5 – Типы сварных соединений

Сварные угловые швы применяются в таких соединениях из двух металлических деталей, как соединение, образующее угол различной величины с разделкой под сварку одной из кромок, соединение внахлест, а также тавровое соединение (Рисунок 1.5). Последнее представляет собой примыкание с привариванием торца одного из элементов к боковой плоскости другого элемента.

По характеру укладки сварки угловые швы могут быть сплошными и прерывистыми. Прерывистый шов представляет собой соединение в виде отдельных отрезков (шпонок). Такая техника подразумевает еще и точечную сварку угловых сопряжений. При этом отрезки (точки) такого шва могут располагаться с разных сторон свариваемого элемента друг против друга либо в шахматном порядке.

Швы различаются и по своей протяженности. Короткие не превышают по длине 250 мм, и делаются они на проход. От середины сопряжения двух металлических поверхностей и к краям свариваемой конструкции производятся средние швы, имеющие длину от 250 до 1000 мм. Длинные угловые швы превышают длину в 1000 мм.

По количеству слоев сварки угловые швы разделяются на однослойные и многослойные. Число слоев зависит от толщины элементов, которые подвергаются сварке. В частности, однослойная сварка используется в тех случаях, когда шовный катет (вертикальное или горизонтальное основание шва) составляет не более 8 мм в ширину.

1.2 Техника сварки угловых швов (тавровых)

Угловые швы (или валиковые) применяются при Т-образных (тавровых) соединениях и соединениях внахлестку и являются очень распространёнными в сварных конструкциях.

Сварка тавровых соединений в нижнем положении производится так, что одна

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

плоскость свариваемого изделия горизонтальна, а другая вертикальна и шов накладывается в прямой угол между этими поверхностями.

При тавровом соединении, если толщина вертикального листа не превышает 12 мм, специальной обработки кромок не требуется, только нижнюю кромку вертикального листа необходимо обрезать так, чтобы стык не имел зазоров больше 2 мм.

В тавровых соединениях с толщиной вертикального листа от 12 до 25 мм делается V-образная подготовка. При толщине вертикального листа от 25 до 40 мм делаются односторонние U-образные скосы кромок, а при большей толщине – двусторонние V-образные скосы кромок (Рисунок 1.6).

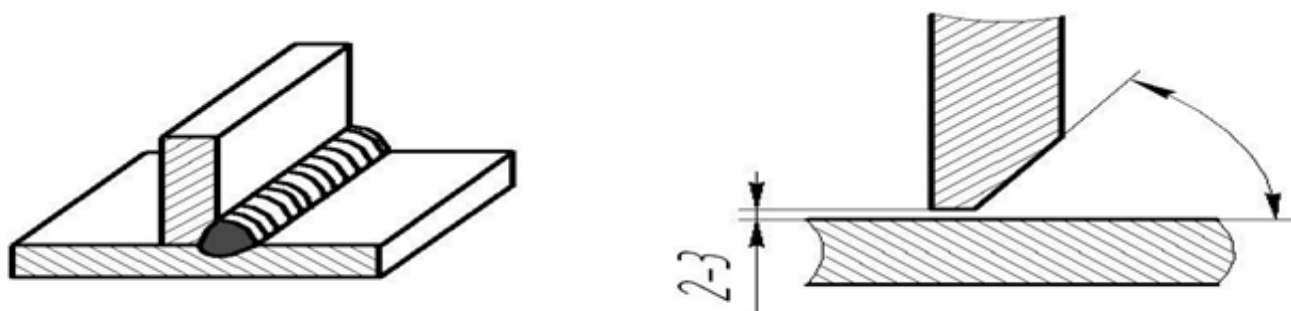


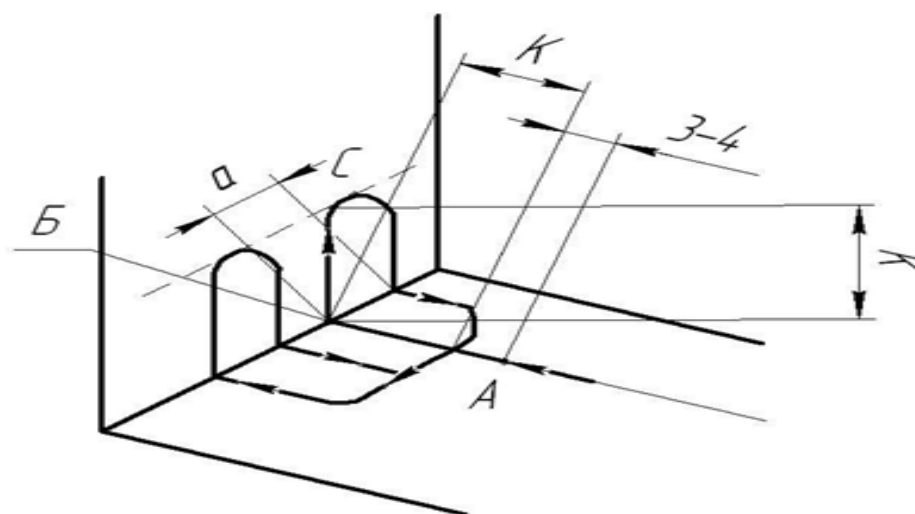
Рисунок 1.6 – Угловые швы тавровых соединений

Наибольшую опасность при сварке угловых швов представляет возможность непровара одной из сторон, а также непровар угла. Поэтому при сварке углового шва электрод располагают в плоскости, делящей угол пополам, и концу электрода сообщают поперечные колебательные движения для расплавления металла кромок. Сварка угловых швов бывает однослойная и многослойная. Однослойная применяется в том случае, если катет шва не превышает 10 мм.

Техника наложения углового шва заключается в следующем: Дугу возбуждают на нижнем листе, отступив от вершины угла на 3-4 мм больше, чем катет шва (точка А), затем дугу ведут от точки А к вершине угла, в точку В, где её несколько задерживают для лучшего проплавления вершины угла; далее дугу поднимают на высоту, равную катету шва по вертикальной стенке (а при

многослойной сварке-на высоту, равную катету первого слоя шва), и по ней передвигают назад на некоторую величину. После этого дугу несколько быстрее, чем при подъеме, опускают на горизонтальный нижний лист и доводят на нём толщину шва на величину катета. Отсюда по нижнему листу дугу передвигают вперёд до границы кратера и по ней направляют в вершину угла, снова задерживая дугу на некоторое время для лучшего проплавления вершины; затем поднимают вверх, возвращают назад на ту же величину а, спускают вниз- и повторяют весь процесс в прежнем порядке (Рисунок 1.7).

Ни в коем случае нельзя начинать сварку в точках В или С, так как в этом случае расплавленный металл с электрода наплывает на не расплавленный ещё основной металл нижнего листа и перекрывает вершину угла, из-за чего а получается не провар, опасный тем, что его можно обнаружить только сломав шов (Рисунок 1.7).



Движение электрода при сварки угловых швов

Рисунок 1.7 – Угловые швы тавровых соединений

При сварке толстопокрытыми электродами или на повышенных величинах тока образуется большая ванна расплавленного металла, вследствие чего накладывание угловых швов обычным способом затруднительно, так как при этом большая часть расплавленного металла стекает на горизонтальную

										Лист
										14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

15.04.01.2017.251.00 ПЗ

поверхность и шов получается неправильного сечения. Во избежание этого рекомендуется свариваемое изделие располагать так, чтобы обе поверхности были наклонены к горизонту под углом в 45° (рис.1.8.), т. е. сварку производить в лодочку.

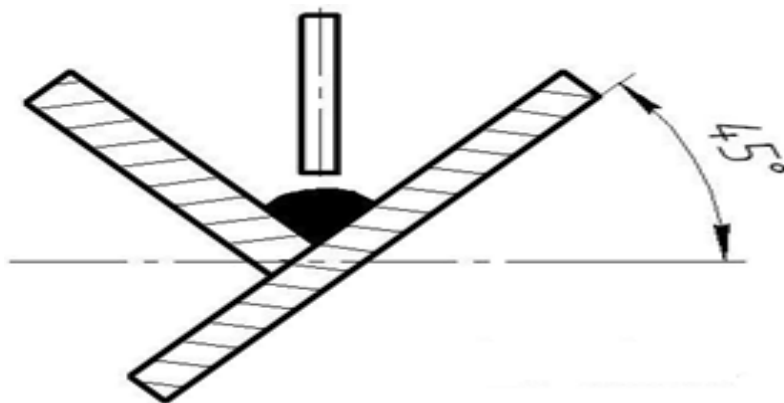


Рисунок 1.8 – Угловые швы тавровых соединений

1.3 Условия появления и виды механической неоднородности сварных соединений

Процесс сварки (пайки) сопровождается существенными структурными и химическими изменениями, которые совместно с технологическими особенностями изготовления сварных соединений, приводят к появлению в них участков с различными механическими свойствами. Вследствие этого большинству сварных и паяных соединений присуща механическая неоднородность. Участки, металл которых имеет пониженные прочностные характеристики по сравнению с основным металлом (ст, св, НВ и др.), принято называть мягкими прослойками, участки с повышенными прочностными характеристиками называют твердыми прослойками. Как уже указывалось во введении, наибольший интерес с точки зрения теоретического и экспериментального анализа имеют мягкие прослойки поскольку они лимитируют прочностные и пластические свойства сварных соединений. Таким прослойкам в литературе уделяется значительное внимание [2,3, 10, 20 и др.]. В

связи с этим, кратко остановимся на условиях появления мягких прослоек в сварных соединениях. Применение термоупрочненных сталей и высокопрочных материалов и сплавов для изготовления химической и нефтехимической аппаратуры неизбежно порождает в сварных соединениях разупрочненные участки [21, 22, 23], которые можно считать мягкими прослойками. Аналогичное явление возникает при сварке термообработанных алюминиевых сплавов [23, 24], а также при сварке нагартованных высокопрочных материалов [21, 27]. В ряде случаев мягкая прослойка может иметь место при диффузионной сварке, сварке взрывом металлов с резко отличающимися свойствами через промежуточные вставки из меди, ванадия, ниобия [25, 26]. Диффузионные явления, происходящие в зоне термического влияния, также способствуют образованию мягких прослоек. Например, при сварке разнородных сталей [24] в зоне сплавления образуются мягкие прослойки из-за диффузии углерода из зоны сплавления в сварной шов. Образование мягких прослоек в сварных соединениях может произойти из-за того, что ГОСТы ограничивают лишь нижние значения прочностных свойств поставляемых материалов, а верхние значения не ограничиваются и могут превышать минимально нормативные в 1,1...1,7 раза [28]. В результате этого может оказаться, что прочностные свойства шва находятся на минимальном уровне, а основного металла - на более высоком. В ряде случаев при сварке металлов с повышенным содержанием элементов, способствующих образованию в шве хрупких структур, для обеспечения технологической прочности преднамеренно выполняют сварной шов из более пластичного, но менее прочного металла [29]. Из-за миграции легирующих элементов из основного металла в металл шва сварной шов может получиться неоднородным [130]. Металл шва может быть менее прочным, чем основной металл, при сварке малоуглеродистой стали неплавящимся угольным электродом в среде углекислого газа, при электрошлаковой сварке среднеуглеродистых и среднелегированных сталей. Существенная механическая неоднородность имеет место в судостроении [35]. Тонкие мягкие прослойки образуются в соединениях при пайке мягкими припоями [36]. Из вышеизложенного следует, что в зависимости от химического

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

состава и механических свойств основного и присадочного металлов, самого процесса сварки механические свойства различных участков могут изменяться в широких пределах. Приведенные примеры показывают широкое распространение механически неоднородных сварных соединений, поэтому проблема их рационального конструктивно-технологического проектирования стоит достаточно остро. Существующие методы расчетной оценки геометрических параметров и механических свойств металла сварного шва по режиму сварки [37, 38, 31 и др.] позволяют оценить расчетным путем вид и степень механической неоднородности соединений в целом.

1.4 Основные теоретические представления о работоспособности механически неоднородных стыковых сварных соединений при изгибе

Учет влияния механической неоднородности на прочность сварных соединений. Потребность современной техники в сварных соединениях из высокопрочных сталей, из металлов с различными физико-механическими свойствами, наконец, из биметаллов и полиметаллов выдвинуло проблемы механической неоднородности в число важнейших. Решению этой проблемы привлечено пристальное внимание как отечественных, так и зарубежных исследователей. Достигнутые результаты надежно закрепляют отечественный научный приоритет в этой области. Исследования, проведенные профессором Бакши О.А. и его учениками, позволили получить оценку влияния механической неоднородности на работоспособность сварных соединений, вскрыть внутренние соотношения и общие закономерности процессов деформирования таких соединений. В данных исследованиях было показано, что механическое поведение рассматриваемых соединений имеет общую особенность при различных условиях и видах нагружения (растяжение, сжатие, кручение, сдвиг, изгиб) [3, 6, 7,9, 20 и др.]. Общая особенность заключается в контактном упрочнении мягкой прослойки. Было установлено, что механическое поведение сварных соединений, имеющих в своем составе мягкую прослойку (рис. 1.1), существенно

зависит от ее относительной толщины $s = h/V$. Отметим некоторые общие закономерности изменения механических свойств таких соединений в зависимости от относительной толщины мягкой прослойки (см. рис. 1.2).

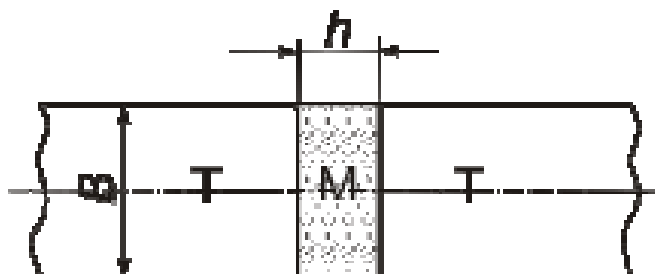


Рисунок 1.9 – Схема сварного соединения с мягкой прослойкой

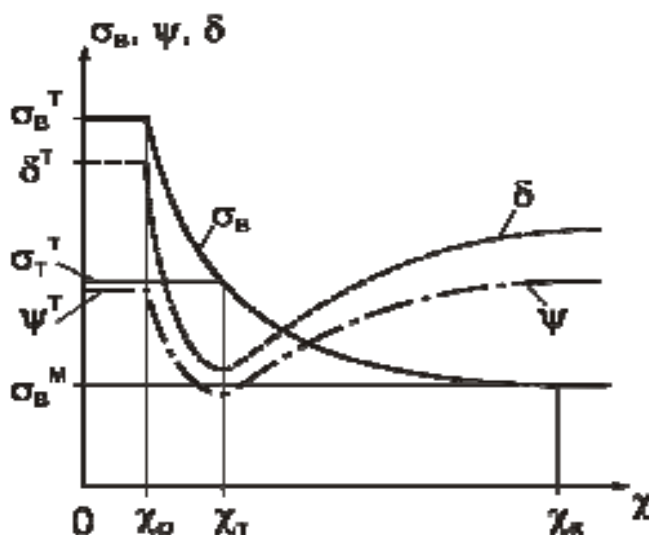


Рисунок 1.10 – Общий характер зависимости основных характеристик сварного соединения (s_B, d, y) от относительной толщины мягкой прослойки

При больших значениях относительной толщины прослойки ($\chi > \chi_k$) контактно е упрочнение не проявляется. Прочностные свойства соединения практически полностью определяются металлом мягкой прослойки. С уменьшением относительной толщины прослойки ($\chi > \chi_k$) эффект контактного упрочнения становится заметным, прочность прослойки становится выше, чем прочность металла прослойки в условиях свободного деформирования. При значениях

относительной толщины прослойки меньше X_T происходит вовлечение основного металла в пластическую деформацию и наблюдается рост прочностных характеристик. При значениях $\chi < \chi_p$ свойства сварного соединения полностью определяются свойствами основного металла в условиях общей текучести. Отмеченные закономерности механического поведения сварных соединений с мягкой прослойкой наиболее полно изучены при статическом растяжении (сжатии) распространены с некоторыми поправками на другие виды и условия нагружения.

Теоретические исследования напряженного состояния мягкой прослойки, позволили создать расчетную оценку несущей способности механически неоднородных сварных соединений. Статическая прочность данных соединений при одноосном растяжении, согласно результатам вышеперечисленных работ, определяется по формуле (1)

$$\sigma_{cp} = \sigma_B \cdot K_\chi, \quad (1)$$

где: σ_B^M - временное сопротивление мягкого металла; K_χ - коэффициент контактного упрочнения, величина которого зависит от геометрических параметров мягкой прослойки, степени механической неоднородности и т.д.

Для сварных соединений компактного поперечного сечения параметр K_χ рассчитывается по формуле (2)

$$K_\chi = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}\chi} \quad (2)$$

Для плоской деформации, когда прослойка находится в составе сварной пластины (3)

$$K_\chi = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\pi}{4} + \frac{1}{4\chi} \right] \quad (3)$$

										Лист
										19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2017.251.00 ПЗ					

Аналогичный характер механического поведения сварных соединений с мягкой прослойкой в зависимости от ее толщины имеет место и при статическом изгибе [6, 7]. Предельный изгибающий момент, отвечающий началу развития пластических деформаций в прослойке представлен в виде (4)

$$M = \frac{2}{\sqrt{3}} M_m \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{8\chi} \right), \quad (4)$$

где M_m - предельный момент металла мягкой прослойки. Помимо расчетной оценки прочности и деформационной способности, характеризуемой остаточным относительным удлинением δ_p , в работе [6] используют характеристики энергоемкости соединения при изгибе. Энергоемкость соединения рассматривалась на примере чистого изгиба образца с X-образной разделкой кромок. Энергию, поглощаемую до появления трещины, рассчитывали путем интегрирования по объему образца работы внутренних сил, затрачиваемой на упругую и пластическую деформацию. Формула для определения энергоемкости сварного образца имеет вид (5)

$$A = \frac{(S^3)^2 BT}{48E_m} \left\{ \begin{aligned} & 24\mu(m + c_1 \cdot \operatorname{tg}\alpha) \left[\frac{1}{c_1} - 1 \right] + \\ & + \left[9\omega + 4\mu \left(\frac{4}{c_1} - 9 \right) \right] \cdot \operatorname{tg}\alpha + 6\omega [n + 2u - 3(m + \operatorname{tg}\alpha)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где: S - эквивалентный предел текучести;

B, T, α, a, l, k, t - геометрические параметры сварного соединения образца;

E_m, E_{am} - модули упругости соответственно металла шва и основного металла;

$$\mu = \frac{S_m}{S^2}; m = \frac{2a}{T}; n = \frac{2l}{T}; u = \frac{2k}{T}; \omega = \frac{E_m}{E_{am}}; c_1 = \frac{n_1}{t} = \frac{S_m}{E_m} \frac{1}{\delta_p}$$

коэффициенты:

σ_m – предел текучести металла шва. Как следует из полученного выражения, энергоёмкость сварных соединений с увеличением χ возрастает. Это возрастание определяется в основном увеличением деформационной способности мягкого шва. Формулы, приведенные выше, получены при условии, что вся пластическая деформация локализуется в мягкой прослойке, а основной металл деформируется упруго. При небольшом отличии прочностных характеристик, которое характерно для большинства сварных соединений, наблюдается вовлечение основного металла в пластическую деформацию. Это приводит к смягчению жесткости напряженного состояния в приконтактных областях металла. Пренебрежение этим фактором может привести к значительным погрешностям. В настоящее время имеется несколько подходов и расчетных методик по оценке несущей способности сварных конструкций с мягкими прослойками, учитывающих неполную реализацию контактного упрочнения [3, 39, 10, 11 и др.]. Эффект смягчения напряженного состояния металла, прилегающего к мягкой прослойке, предложено учитывать введением в соответствующие расчетные формулы коэффициента реализации контактного упрочнения K_p [9]. Этот коэффициент реализации контактного упрочнения представляет собой отношение фактической прочности к расчетной. С учетом этого формула для оценки вязкой прочности мягкой прослойки представляется в виде (6)

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_b^M \cdot K_{\chi} \cdot K_p \quad (6)$$

Минимальное значение K_p^{min} коэффициента реализации имеет место при χ , близких к χ_p , когда прочность прослойки приближается к уровню временного сопротивления основного металла σ_b^T . Для приближенного расчета вязкой прочности необходимо знать толщину прослойки χ_i , начиная с которой ($\chi < \chi_i$) проявляется неполная реализация контактного упрочнения, а также знать минимальное K_p^{min} . На основе статистической обработки экспериментальных данных (7-8)

										Лист
										21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2017.251.00 ПЗ					

$$\chi_i = \frac{0,12K_B + 0,08}{0,32K_B - 0,27} \quad (7)$$

$$K_p^{min} = 1,246 - 0,246K_B, \quad (8)$$

Где $K_B = \frac{\sigma_B^T}{\sigma_B^M}$ - степень механической неоднородности сварных соединений.

Этот подход учета неполной реализации контактного упрочнения мягкой прослойки не отражает физическую природу механического поведения сварных соединений. Из формулы (47) следует, что с увеличением степени механической неоднородности K_B коэффициент реализации контактного упрочнения K_p^{min} снижается, что противоречит известным физическим представлениям. К тому же, этот метод разрабатывался для углеродистых и низколегированных сталей. Возможность его применения для других сталей требует дополнительно проведения большого объема экспериментальных работ. Для плоской деформации известно решение, выполненное для малоциклового нагружения, в котором учитывается эффект вовлечения основного металла в пластическую деформацию [12]. Согласно данной работе коэффициент контактного упрочнения определяется выражением (9)

$$K_\chi = \frac{1}{1 - \frac{\psi_o(1 - E_M'/E_T')}{\psi(\chi) + \psi(\chi_{кр})E_M'/E_T'}} \quad (9)$$

где: $\psi(\eta)$ - некоторая функция распределения нормальных напряжений sx , вычисленная при $\eta = y/s = 0$ (y и s - геометрические параметры сварного соединения), $\eta = \chi$ и $\eta = \chi_{кр}$; E_M' , E_T' - секущие модули упругости. Данная

функция должна удовлетворять граничным условиям [12]. Для определения секущих модулей E_m' и E_T' необходимо знать диаграмму деформирования мягкого и твердого металлов. То есть в работе [12] предлагается один из путей решения поставленной задачи, но не дается приемлемой для практики расчетной оценки. В работе [11] на основе математической обработки экспериментальных данных получена зависимость, учитывающая вовлечение основного металла в пластическую деформацию, механические свойства основного и мягкого металлов, а также степень наклепываемости металла прослойки (10)

$$\sigma_B^{sp} = \sigma_B^T - K \cdot \delta_m \cdot \gamma_m \cdot \chi \cdot 10^2, \quad (10)$$

где: K - коэффициент, зависящий от параметра наклепываемости прослойки;
 δ_m - относительное удлинение металла мягкой прослойки; $\chi_m = \sigma_B^M / \sigma_T^M$.

Данной проблеме также посвящена работа [32], в которой теоретический анализ был проведен с применением метода верхней оценки (рис. 1.3). В результате этого получены выражения для расчета прочности сварных соединений в условиях плоской деформации с учетом неполной реализации контактного упрочнения мягкой прослойки (12).

$$\sigma_{\varphi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_B^M \left[\frac{K_B}{\sin(2\alpha)} - \frac{\chi(K_B - 1)}{2\sin^2(\alpha)} \right] \quad (12)$$

Очаг деформации принимали в виде двух треугольников. Угол при вершине этих треугольников 2α определялся из экстремальных принципов теории пластичности, согласно которым верхняя предельная нагрузка сообщает энергии максимальное значение.

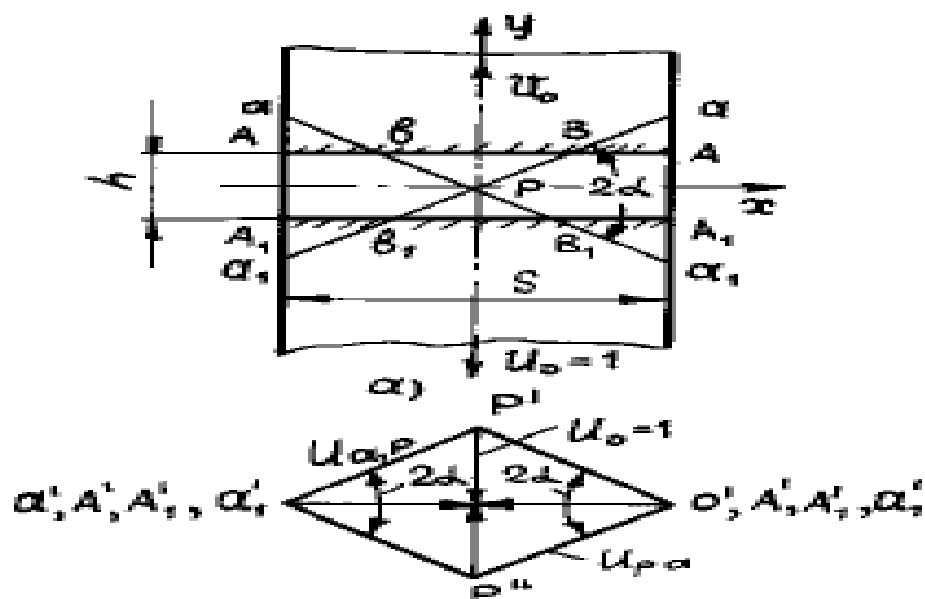


Рисунок 1.11 – Расчетная схема очага деформации сварного соединения с мягкой прослойкой при растяжении

Имеются и другие рекомендации для учета эффекта вовлечения основного металла в пластическую деформацию, такие, как в работе [10], но они не основаны на теоретическом анализе и требуют большого объема экспериментальных работ, не отражают физическую природу механического поведения сварных соединений и т.д.

Заслуживают внимание работы [14, 39], в которых учет влияния механической неоднородности на прочность сварных соединений при растяжении предлагается решать методом линий скольжения. Поле линии скольжения с учетом и без учета вовлечения основного металла в пластическую деформацию представлено на (рис.1.11). Для сварных соединений было получено выражение для определения предельного напряжения в мягкой прослойке, учитывающее вовлечение основного металла в пластическую деформацию (13)

$$\sigma_{\varphi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_B \left[\frac{1}{K_B} + \left(\frac{K_B - 1}{K_B} \right) K_{\lambda} \right] \quad (13)$$

где K_x - коэффициент контактного упрочнения мягкой прослойки в условиях его реализации $(K_x = \frac{1}{2} + \frac{1}{4\chi} + \frac{\chi}{4})$ - для соединений с тонкой мягкой прослойкой;
 $K_x = \frac{1}{3\chi} + \chi - \frac{\chi^2}{3}$ - для соединений с толстой мягкой прослойкой).

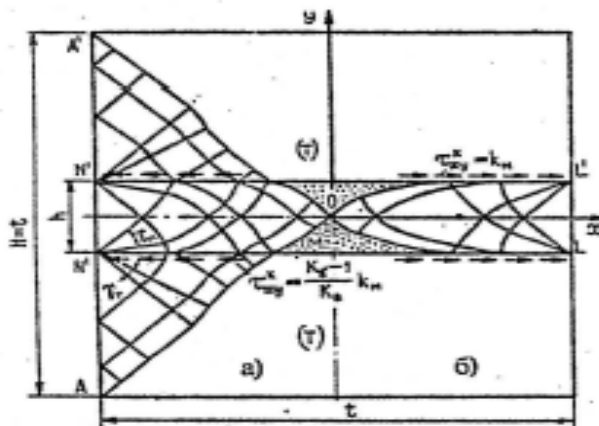


Рисунок 1.12 – Поле линий скольжения для сварных соединений с мягкой прослойкой с учетом (а) и без учета (б) вовлечения основного металла в пластическую деформацию (при растяжении) [14]

Как утверждают авторы, полученное решение для сварных соединений с тонкими прослойками можно распространить на весь диапазон относительных толщин $\chi_p \leq \chi \leq 1$. На (рис.1.12) представлена зависимость статической прочности сварных соединений от относительной толщины χ при различной степени механической неоднородности K_B . Значение χ_p , соответствующее достижению равнопрочности сварного соединения основному металлу, определяется выражением (14)

$$\chi_p = (2K_B + 1) - \sqrt{(2K_B + 1)^2 - 1} \quad (14)$$

Предлагаемый подход учета влияния степени механической неоднородности сварных соединений на их напряженное состояние и несущую способность при растяжении, основанный на использовании метода линий скольжения, отличается простотой и удобством применения по сравнению с предыдущими подходами.

При его использовании нет необходимости в получении предварительной экспериментальной информации о механическом поведении сварных соединений.



Рисунок 1.13 – Зависимость статической прочности сварных соединений от степени механической неоднородности и относительной толщины мягкой прослойки χ

Влиянию механической неоднородности сварных стыковых соединений на характер деформирования их при статическом изгибе посвящена работа [8]. В ней экспериментально, используя тензодатчики, исследовали фибровые деформации различных сечений сварного соединения при нагружении изгибом. При этом рассматривались вопросы, связанные с влиянием соотношения пределов текучести металлов шва и основного металла, геометрической неоднородности на характер их деформирования. Автором замечено, что деформации концентрируются в мягкой сварном шве. При этом коэффициент концентрации этих деформаций резко возрастает по сравнению с коэффициентом концентрации деформаций для стержня из однородного материала.

Вопрос о прочности мягких прослоек при чистом изгибе в условиях плоского напряженного состояния рассматривался в работе [33]. Для исследования влияния механической неоднородности использовали метод фотоупругих покрытий. В

работе рассмотрено напряженно-деформированное состояние образцов из термоупрочненной стали 19Г с механической неоднородностью.

Результаты данных экспериментальных работ [8, 33] не позволяют применять их для практических инженерных расчетов в силу того, что они приведены на конкретных материалах и дают лишь качественную оценку некоторым особенностям поведения мягких сварных швов при изгибе. Настоящий обзор охватывает далеко не все исследования, проведенные в области прочности механически неоднородных сварных соединений. Данный вопрос неоднократно рассматривался в работах российских и зарубежных ученых. Но большинство рассмотренных работ посвящено работоспособности механически неоднородных сварных соединений при растяжении, и лишь отдельные при изгибе. Напряженно-деформированное состояние в механически неоднородных сварных соединений при изгибе имеет свои особенности, поэтому в большинстве случаев использование расчетных зависимостей, полученных для случая растяжения (сжатия) может привести к значительным погрешностям при оценке несущей способности в рассматриваемых соединениях. Кроме того, в литературе не имеется сведений о работоспособности сварных соединений с учетом неполной реализации контактного упрочнения при статическом изгибе.

При определении числа твердости учитывали, что при $HV < 4500$ справедливо приближенное равенство $HV \approx HB$.

В качестве примера на рис 1.14 приведены графики распределения твердости для образцов с мягкими и твердыми прослойками.

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

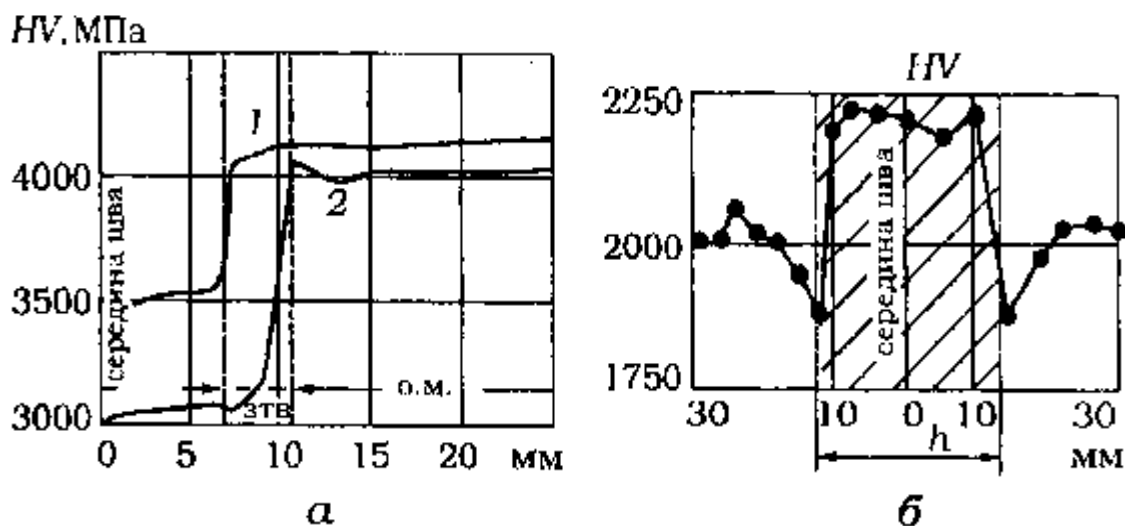


Рисунок 1.14 – Распределение твердости для сварных соединений с мягкими и твердыми прослойками,

где: а-ЭП-678+ЭП-659(1-зак+св+ст;2-зак+ст+св),

б-17Г1С+Св08ХМ

Экспериментальную проверку предложенных в предыдущих разделах расчетных методик по оценке прочности сварных соединений с плоскостными дефектами проводили на разрывной машине ЦДМ-200 Пу с фиксацией картин муаровых полос (на плоских образцах) и с записью диаграммы $\sigma_{ср} - \psi$ ($\sigma_{ср}$ – средняя удельная нагрузка, ψ – относительное сужение) на цилиндрических образцах. В последнем случае по ослабленному сечению прослойки устанавливали специальный электромеханический датчик перемещений, позволяющий с помощью металлической струны следить за изменением поперечного сужения образца (рис. 1.14) Величина усилия снималась специальным электромеханическим датчиком с силоизмерителя машины. Запись диаграммы осуществляли с помощью двухкоординатного самописца ПДП 4-002 в координатах $P-u$ (усилие-перемещение) с последующим пересчетом на нагрузку-сужение (15)

$$\sigma_{ср} = \frac{4P}{\pi d^2} \text{ и } \psi = \frac{4u}{\pi d} \left(1 - \frac{u}{\pi d}\right) \quad (15)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Особенностью напряженно деформированного состояния твердых прослоек является реализация в них эффекта контактного разупрочнения, заключающегося в возникновении благоприятной мягкой схемы напряженного состояния и приводящей к улучшению деформационных характеристик сварного соединения (удлинения, сужения, трещиностойкости и др.) - На основе установленных закономерностей изменения касательных напряжений на контактной плоскости твердой прослойки, при которой ее металл полностью перейдет в пластическое состояние, получены уточненные формулы [40].

Низкая пластичность и вязкость твердых прослоек ставят проблему облагораживания их свойств в составе сварных соединений. Отметим, что последнее направление сопряжено с большими трудностями технико-экономического характера. Здесь приведены лишь некоторые случаи образования твердых и мягких прослоек. Более подробные сведения о причинах появления и видах механической неоднородности сварных соединений приведены в работах О. А. Бакши и его учеников. [41]. Испытания при циклическом нагружении образцов с твердыми прослойками, не имеющими концентраторов напряжений, показывают, что разрушение, как правило, происходит не по твердой прослойке, а по мягкому основному металлу в определенном отдалении от контактной поверхности, там, где отсутствует упрочнение мягкого металла за счет усложнения его напряженного состояния. [42].

С целью исключения образования технологических трещин и твердых прослоек обычно рекомендуют предварительный подогрев труб в месте выполнения сварного соединения. Предварительный подогрев удорожает ремонтно-сварочные работы. В ряде случаев способствует реализации дополнительных термических напряжений, что повышает вероятность разгерметизации труб. Кроме того, термические операции в целом снижают характеристики безопасности ведения ремонтных работ на нефтепродуктопроводах. В работе, с целью повышения технологической прочности (свариваемости) трубных сталей в напряженном состоянии,

									Лист
									29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2017.251.00 ПЗ				

предлагается применять комбинированные швы, корень которых выполняется электродами с повышенными характеристиками пластичности и трещиностойкости, а остальные слои - электродами повышенной прочности. В результате этого сварные соединения приобретают механическую неоднородность[43].

1.5 Несущая способность сварных соединений с плоскостными дефектами в твердых прослойках.

В качестве твердых прослоек могут выступать сварной шов, зона термического влияния, промежуточная наплавка при сварке разнородных металлов и т. д. Ранее соединениям, имеющим в своем составе твердые прослойки с удовлетворительной деформационной способностью, уделялось мало внимания. Последнее связано с тем, что прочность рассматриваемых соединений лимитировалось механическими свойствами основного более мягкого металла М, а сама твердая прослойка в процессе нагружения либо работала упруго, либо незначительно вовлекалась в пластическую деформацию. Интерес к анализу предельного состояния соединений с твердыми прослойками возникает с появлением в них плоскостных дефектов, которые являются причиной разрушения конструкций по твердой прослойке.

Следует отметить, что как и в соединении с мягкими прослойками, в рассматриваемых соединениях анализ напряженного состояния обусловлен эффектами совместного пластического деформирования металлов М и Т. При этом анализ также будет строиться на применении метода линий скольжения при удовлетворении статическим и кинематическим условиям задач.

Для соединений с дефектами в срединной плоскости твердых прослоек, исходя из экстремальных принципов теории пластичности и особенностей пластического течения, сетки линий скольжения в ослабленном нетто-сечении можно представить прямыми линиями, выходящими из вершины дефекта под углом (рис.

									Лист
									30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2017.251.00 ПЗ				

1.15, а, б). При этом для плоской деформации $\epsilon = 45^\circ$. Данные сетки линий скольжения с учетом минимума работы, совершаемой при деформации вдоль данных линий, приводят к следующим выражениям:

при дефекте в центре твердой прослойке (16).

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{\text{н}}^{\text{М}} \left[\left(1 - \frac{l}{\text{H}} \right) + (K_{\text{н}} - 1) \frac{e}{2} \right]. \quad (16)$$

При краевом дефекте (17)

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{\text{н}}^{\text{М}} \left[\left(1 - \frac{l}{\text{H}} \right) + (K_{\text{н}} - 1) \frac{e}{2} \right]. \quad (17)$$

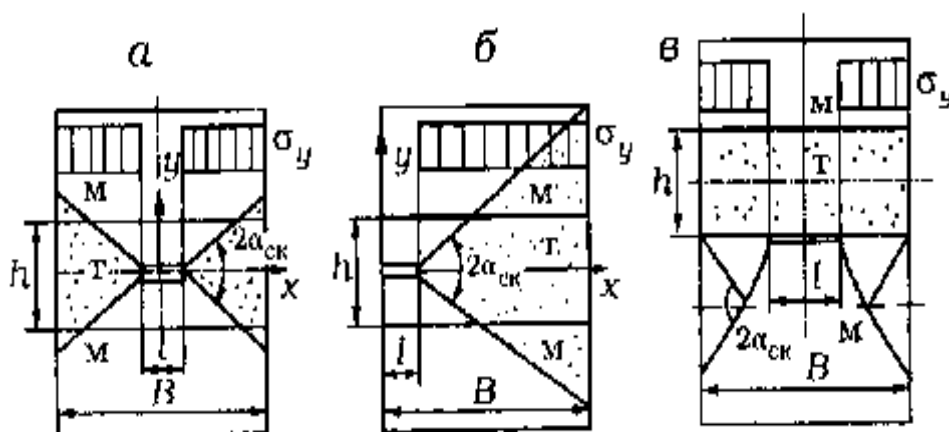


Рисунок 1.15 – Сетки линий скольжения с дефектами в твердых прослойках: а- в центральной части, б- в краевой зоне, в- на границе твердой прослойки и мягкого основного металла.

Здесь $ae = h/B$ – относительная толщина твердой прослойки.

Получение соотношения справедливы в диапазоне относительных толщин $ae \leq ae_{\text{к}}$, при которых имеет место совместное деформирование мягкого и твердого металлов. Для рассматриваемых случаев, представленных на рис.1.6. а,б, значения $ae_{\text{к}}$ соответственно равны (18-19).

$$ae_K = 1 - \frac{L}{B}, \quad (18)$$

$$ae_K = 2\left(1 - \frac{L}{B}\right), \quad (19)$$

При $ae \geq ae_K$ в обоих случаях очаг пластической деформации реализуется только в твердой прослойке и прочность сварных соединений определяется следующим выражением (20).

$$\sigma_{ср} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_n^M K_B \left(1 - \frac{l}{B}\right). \quad (20)$$

Сетка линий скольжения для случая расположения дефекта на контактной границе твердой прослойке и мягкого основного металла (см. рис.1.6. в) приводит к следующей формуле для оценки статической прочности рассматриваемых соединений (21).

$$\sigma_{ср} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_n^M \left(1 - \frac{l}{B}\right) \left[\frac{1}{K_B} + \frac{K_n - 1}{K_n} \left(\frac{\pi}{4} + 0.5 \right) \right] \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_B^M. \quad (21)$$

Здесь принято, что $\sigma_i = \sigma_B^M$, так как показатель напряженного состояния П близок к единице. Кроме того развитие деформаций сдерживается металлом Т в вершине дефекта. Выражение номер (21) совпадет с формулой номер (9) Это означает что при расположении дефекта на границе мягкой прослойки и твердого основного металла при $ae \geq ae_K$ имеет место идентичность их механического поведения. Величина относительного размера дефекта L/B не снижающего прочность соединения с твердой прослойки, может быть найдена из условия (22-23).

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{\text{в}}^{\text{М}} \quad (22)$$

При этом

$$\left(\frac{l}{B}\right)_{*} = 1 - \frac{K_{\text{в}}}{1 + (K_{\text{в}} - 1)(\pi/4 + 0.5)} \quad (23)$$

На рис.1.6 приведена зависимость размеров дефектов (L/B) от степени механической неоднородности $K_{\text{в}}$. Видно, что с увеличением $K_{\text{в}}$ имеет рост диапазона равнопрочных дефектов (L/B) что обусловлено подкрепляющим действием твердой прослойки.

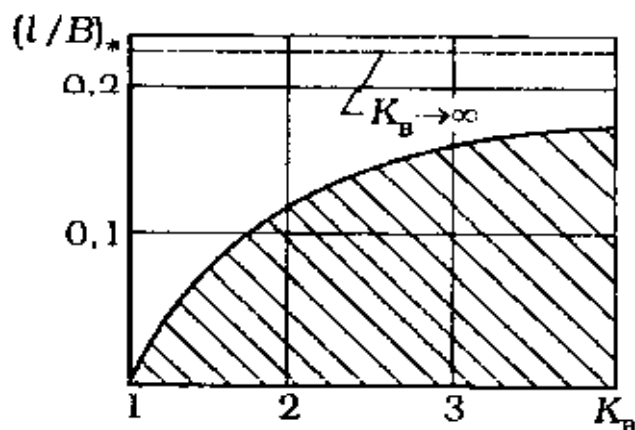


Рисунок 1.6 – Диапазон дефектов (L/B) расположенных на границе твердой прослойки и мягкого основного металла, не снижающих статической прочности соединения.

Для соединений цилиндрических деталей с дефектом на контакте твердой прослойки и мягкого основного металла (в условиях осесимметричной деформации) и для случая, когда дефект расположен на границе мягкой

прослойки (при $a_e > 1/\sqrt{2}$ и твердого основного металла статическая прочность определяется следующим выражением (24)

$$\sigma_{cp} = \sigma_B^M \left(\frac{1}{K_b} + 1,53 \frac{K_b - 1}{K_n} \right) \left(1 - \frac{l}{d} \right). \quad (24)$$

Для расчета диапазона дефектов l/d , не снижающих статическую прочность, сварного соединения, вследствие подкрепляющего действия твердого металла можно воспользоваться формулой (1.1), в которой необходимо принять коэффициент контактного упрочнения мягкой прослойки в условиях осесимметричной деформации $K_{ae}=1$.

1.6 Учет влияния дефектов щелевидной формы на несущую способность однородных и механически неоднородных сварных соединений

Дефекты типа непроваров, подрезов часто относят к числу недопустимых. Это объясняется тем, что такие дефекты могут существенно влиять на прочность сварных соединений. Изучению влияния щелевидных дефектов на прочность стыковых сварных соединений также посвящено множество работ [1, 14, 16, 17, 15 и др.]. В работах Качанова Л. М. [71] и Малинина Н. Н. [34] рассмотрены задачи о чистом изгибе полосы, ослабленной вырезами различной формы. При этом авторы принимали, что пластическая область захватывает наиболее ослабленное сечение, что справедливо при достаточно глубоких вырезах. Для решения поставленных задач использовался метод линий скольжения. Остановимся подробнее на острых поверхностных вырезах щелевидной формы (рис. 1.17).

						Лист
					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

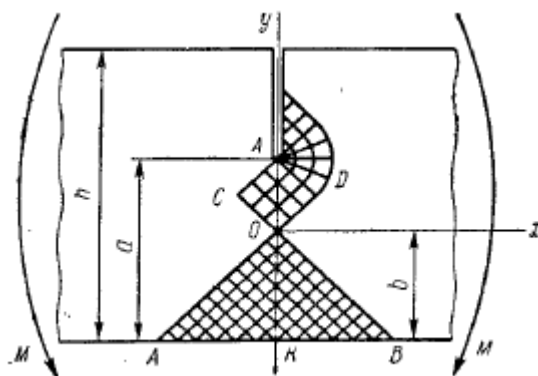


Рисунок 1.17 – Плита, ослабленная односторонним щелевым глубоким вырезом, изогнута моментом М

В случае чистого изгиба полосы, предельный изгибающий момент, определенный статическим методом равен (25).

$$M = \frac{\tau_T a^2}{2} \quad (25)$$

В зоне вершины концентраторов при изгибе имеет место перенапряжение, связанное со стеснением в данной зоне пластической деформаций.

Величина предельного изгибающего момента, найденного кинематическим Методом (26)

$$M = \tau_T (\pi + 2) \frac{(a - b)^2}{2} + 2\tau_T \frac{b^2}{2}, \quad (26)$$

где $b = \frac{\pi + 2}{\pi + 4} a$.

Подставляя в соотношение (26) величину b, была получена формула (27).

$$M = \frac{\pi + 2}{\pi + 4} \tau_T a^2 = 0,72 \tau_T a^2 \quad (27)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Предельный изгибающий момент, найденный кинематическим методом, несколько выше, чем найденный статическим методом. Это объясняется тем, что в зоне вершины концентратора при изгибе имеет место перенапряжение, связанное со стеснением в данной зоне пластических деформаций. Как утверждают авторы действительное значение изгибающего момента, лежит в интервале между величинами, определенными статическим и кинематическим методами. Приведенное решение справедливо при достаточно глубоких надрезах, т.е. при условии, что $h - a > a - b$. Стоит заметить, что изгиб пластины (бруса) с центральным щелевидным дефектом для условия вязкого разрушения в литературе практически не рассматривается. Вероятной причиной этому является высокая чувствительность прочности деталей, нагруженных изгибом, к поверхностным дефектам. Влияние же внутренних дефектов, в отличие от случая растяжения, значительно меньше и зависит от их расположения относительно нейтральной оси изделия и относительных размеров. Так или иначе, распространение решений, полученных

для однородной пластины с различными типами вырезов, работающей в условиях изгибных нагрузок, на механически неоднородные сварные (паяные) соединения, может привести к значительным погрешностям. Об этом свидетельствуют многочисленные работы [14, 15, 17, 18 и др.], посвященные исследованиям работоспособности механически неоднородных сварных соединений с различными типами дефектов при растяжении. Ими доказано, что неучет контактных эффектов, имеющих место в механически неоднородных соединениях, может привести к неправильной расчетной оценке прочности соединений с технологическими дефектами.

В частности, в работе [39] рассмотрена задача оценки несущей способности растягиваемых стыковых сварных соединений с щелевидными дефектами, расположенными в различных частях мягкого шва. Для центрального расположения дефекта при условии вязкого разрушения здесь получено решение с учетом вовлечения в пластическую деформацию основного

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

металла. На рис.1.16 для сравнения представлены поля линий скольжения и соответствующие эпюры напряжений с учетом и без учета вовлечения основного металла в пластическую деформацию.

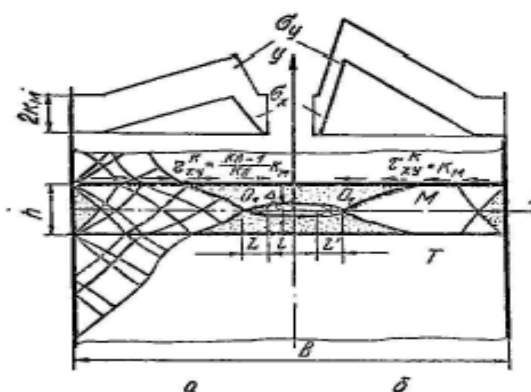


Рисунок 1.18 – Поле линий скольжения и эпюры напряжений (в плоскости дефекта) для сварных соединений с центральным дефектом в мягкой прослойке с учетом (а) и без учета (б) вовлечения основного металла в пластическую деформацию

Выражение для оценки средних предельных напряжений данных сварных соединений с дефектом в центре мягкого шва выглядит следующим образом (28).

$$\sigma_{\varphi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{\text{н}} \left[\frac{(1-l/B)}{K_{\text{н}}} + \frac{(K_{\text{н}}-1)}{K_{\text{н}}} \cdot K_{\chi}^l \right], \quad (28)$$

Где K_{χ}^l - коэффициент контактного упрочнения мягкой прослойки (шва) при наличии трещиноподобного дефекта в ее центральной части (29).

$$K_{\chi}^l = \frac{1}{2} (1-l/B) + \frac{(1-l/B)}{4\chi} + \frac{\chi}{4}. \quad (29)$$

Согласно (28) и (29) прочность сварных соединений с дефектом в центре мягкого шва изменяется в пределах от прочности однородных соединений из мягкого металла с дефектом до прочности соединений из основного металла, определенной с учетом нетто-сечения в диапазоне относительных размеров мягкого шва $\chi_p \leq \chi \leq \chi_k$. Здесь $\chi_k = 1 - l/B$ – относительная толщина шва, начиная с которой в последнем проявляется эффект контактного упрочнения. Значение χ_p , соответствующее достижению равнопрочности сварного соединения основному металлу, определяется выражением (30).

$$\chi_p = \left[(2K_B + 1) - \sqrt{(2K_B + 1)^2 - 1} \right] (1 - l/B). \quad (30)$$

Аналогичное решение в [137] получено для дефекта с краевым расположением в мягкой прослойке. Однако для определения коэффициента контактного упрочнения ограничились случаем, когда основной металл не вовлекается в пластическую деформацию ($K_B \geq 4$). Соответствующие поля линий скольжения и эпюры напряжений представлены на (рис. 2.0).

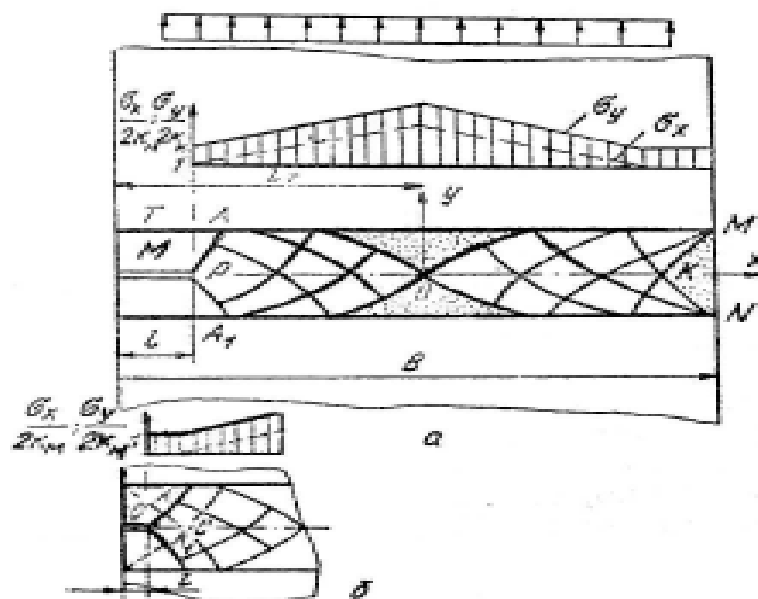


Рисунок 1.19 – Поля линий скольжения и эпюры напряжений (в плоскости дефекта) в сварных соединениях с односторонним дефектом в мягком шве:

$$a - l/B \geq \chi/2; \quad b - l/B < \chi/2 \quad [137]$$

Для оценки несущей способности соединений с краевым дефектом используется формула (56). Но при этом коэффициент контактного упрочнения прослойки K_{χ} определяется из следующего выражения (31).

$$K_{\chi}^{12} = K_{\chi}^1 + \psi_{\chi}(\chi, l/B) \quad (31)$$

Здесь $\psi_{\chi}, l/B$ - поправочная функция на местоположение дефекта (32)

$$\begin{aligned} l/B \geq \chi/2; \quad \psi_{\chi}(\chi, l/B) &= \frac{1}{4} \left(1 - \frac{l}{B} \right) - \frac{3}{16} \chi; \\ l/B < \chi/2; \quad \psi_{\chi}(\chi, l/B) &= \frac{l}{4\chi B} \left(2 - \frac{l}{B} \right) - \frac{l}{2B}. \end{aligned} \quad (32)$$

Очевидно, что применение данных решений для оценки несущей способности сварных соединений, нагруженных изгибающими нагрузками, неизбежно приведет к значительным погрешностям результатов. Однако в литературе вопрос о работоспособности механически неоднородных сварных соединений с дефектами при статическом изгибе практически не изучен, хотя изгибным нагрузкам в реальных условиях эксплуатации подвергается значительная часть сварных конструкций.

В рамках обзора, приведенного в настоящем разделе, установлено:

- в литературе отсутствуют четко сформулированные данные о оценке механической неоднородности угловых соединений работающих на растяжение и изгиб;
- отсутствуют данные о том какая из прослоек лучше работает на растяжение и изгиб;

1.7 Пояснения решения о выборе темы данной работы.

В первой главе рассмотрены существующие инженерные методики расчета тавровых угловых соединений с механической неоднородности, а также теоретические и экспериментальные научные исследования, выполненные в данном направлении. Обзор выполнен на основе действующих отечественных и зарубежных нормативно-технических документов, работ Шахматов, М.В. В.В. Ерофеев Л.И. Хмарова, А.А. Остсемин, и других. Практически все рассмотренные инженерные методики разработаны для соединений с механически неоднородной сварной мягкой прослойкой и, зачастую, не учитывают твердую прослойку в механически неоднородном соединении. Чаще всего за расчетное принимается мягкая прослойка сварного соединения углового шва, что не всегда оправдано. Большинство из рассмотренных научных исследований носят либо экспериментально-рекомендательный характер, либо требуют дополнительной проработки вопроса. Отдельное внимание в главе уделено прочности

									Лист
									40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

15.04.01.2017.251.00 ПЗ

механически неоднородных стыковых сварных соединений при изгибе и растяжение. Рассмотрены условия появления и виды механической неоднородности, а также выполнен обзор основных теоретических и экспериментальных представлений о работоспособности данных соединений с дефектами и без дефектов. В рамках обзора были проанализированы работы О.А. Бакши, Р.З. Шрона, Б.Г. Кульневич, Т.В. Кульневич, М.В. Шахматова, В.В. Ерофеева, Л. М. Качанова, Н. Н. Малинина, Т.И. Ивановой и других. В результате установлено, что большинство исследований посвящено работоспособности механически неоднородных сварных соединений при растяжении, и лишь отдельные – при изгибе. В последних не рассматривается влияние твердой прослойки в сварном соединении. На основании анализа, выполненного в первой главе, обоснована цель настоящей работы и поставлены соответствующие задачи. Вторая глава посвящена разработке расчетных методов.

2 ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В УГЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ И ИЗГИБ

2.1 Конструкция сварного соединения.

Тавровое соединение представляет собой сварное соединение, в котором торец одного элемента примыкает под углом и приварен к боковой поверхности другого элемента (рисунок 2.1). (Рисунок 2.1) тавровое соединение выполнено без катетов и с полным проплавлением, (Рис 2.2) соединение выполнено с катетами под углом 45° и непроваром шириной 10мм. Основной металл сварного соединения выполнены из стали Стали 20 по ГОСТ 1050-88 толщиной 20 мм.

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

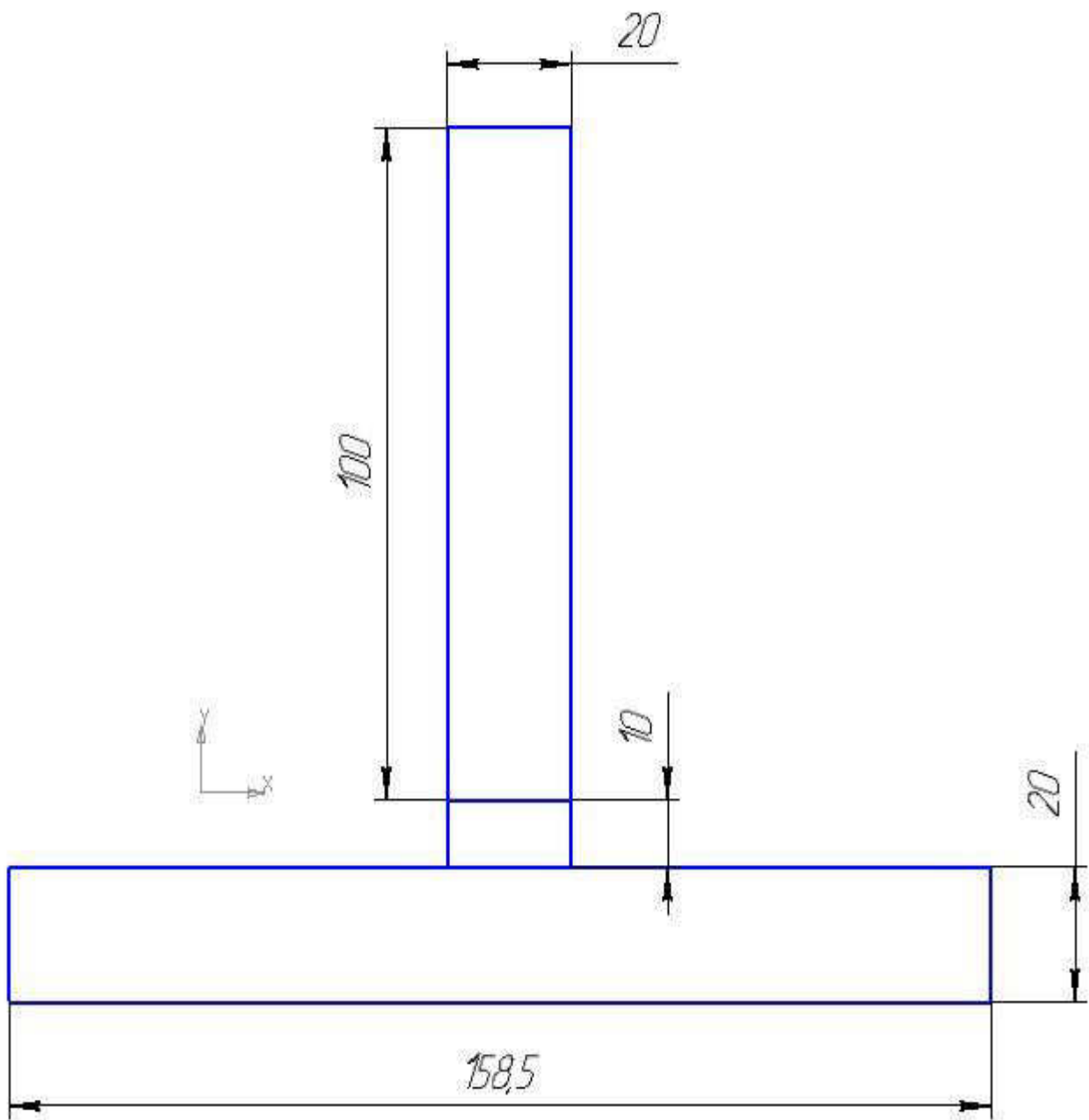


Рисунок 2.1 – схема сварного таврового соединения без катетов

На рисунке 2.1 показана схема сварного соединения без катетов где указаны габаритные размеры.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.251.00 ПЗ

Лист

42

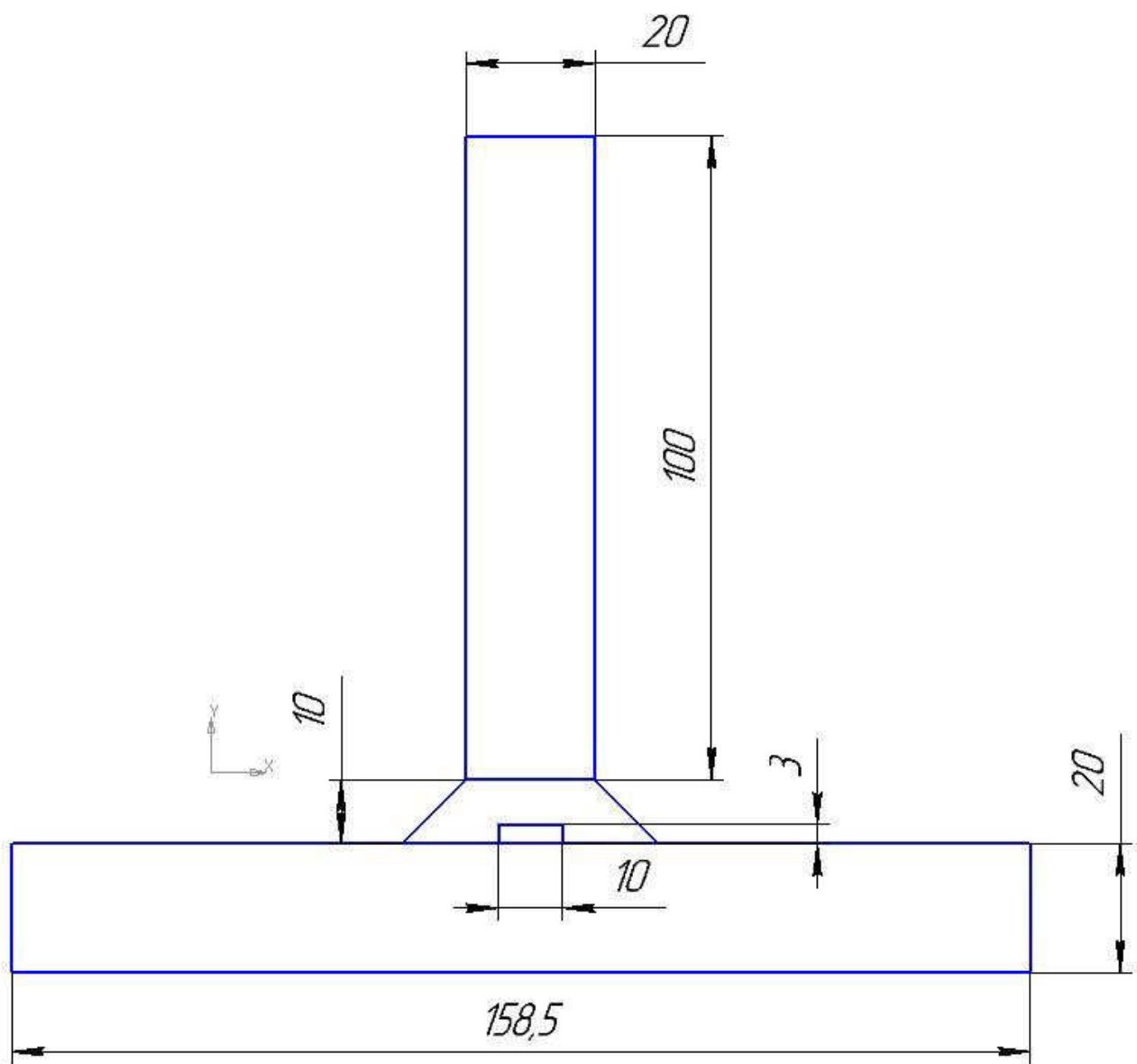


Рисунок 2.2 – схема сварного таврового соединения с катетом и непроваром

На рисунке 2.2 показана схема сварного соединения с усилением шва и технологическим непроваром где указаны габаритные размеры.

2.2 Метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS R17.2

Для начала объясним, что такое метод конечных элементов (МКЭ) – это метод приближённого численного решения физических задач. В его основе лежат две

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций. [43]

МКЭ-наиболее распространен и наиболее авторитетен.

2.3. Создание расчетной модели

Выбор типа элемента таврового сварного соединения Элемент PLANE 183 является двухмерным (2D) элементом порядка с восемью узлами.

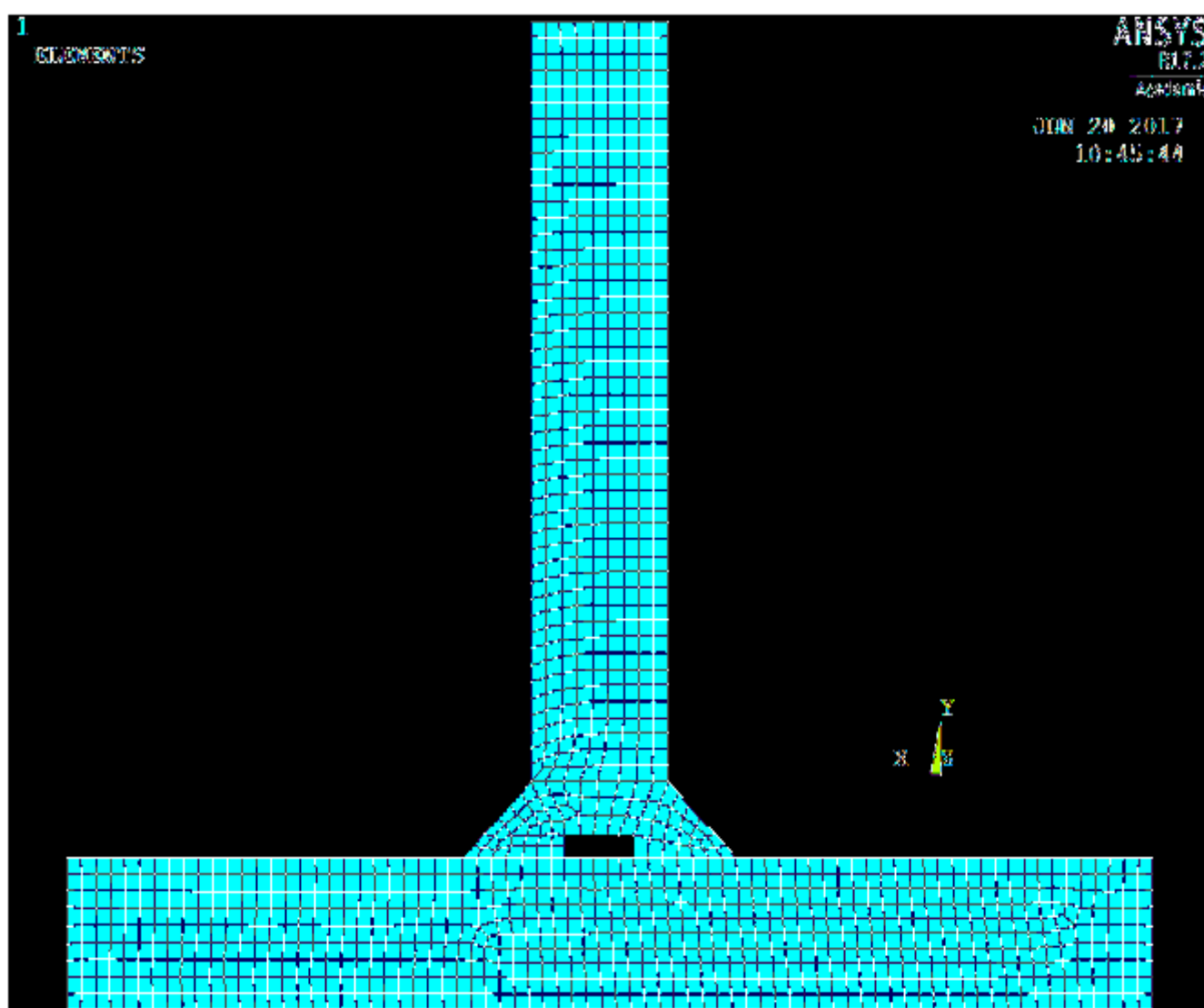


Рисунок 2.3 – Модель таврового соединения

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

На рисунке 2.3 показана смоделированная в программе ANSYS кристаллическая решетка сварного соединения.

Моделирование таврового соединения осуществлялось PLANE 183. рекомендован разработчиками программного обеспечения ANSYS элемент имеет квадратичное представление перемещений и пригоден для моделирования нерегулярных сеток (например, создаваемых на основе моделей, импортированных из различных комплексов CAD). Элемент определяется восемью узлами, имеющими две степени свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X и Y узловой системы координат. Элемент может использоваться для моделирования плоского деформированного, обобщенного и плоского деформированного и плоского напряженного состояний (то есть может рассматриваться в виде плоского), или для моделирования осесимметричного напряженного состояния. Элемент также имеет свойства пластичности, гиперупругости, ползучести, увеличения жесткости при наличии нагрузок, больших перемещений и больших деформаций. Для моделирования почасты несжимаемых упругопластичных материалов и полностью несжимаемых гиперупругих материалов элемент имеет 29 смешанную формулировку для точности расчета конструкций.

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
						45
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

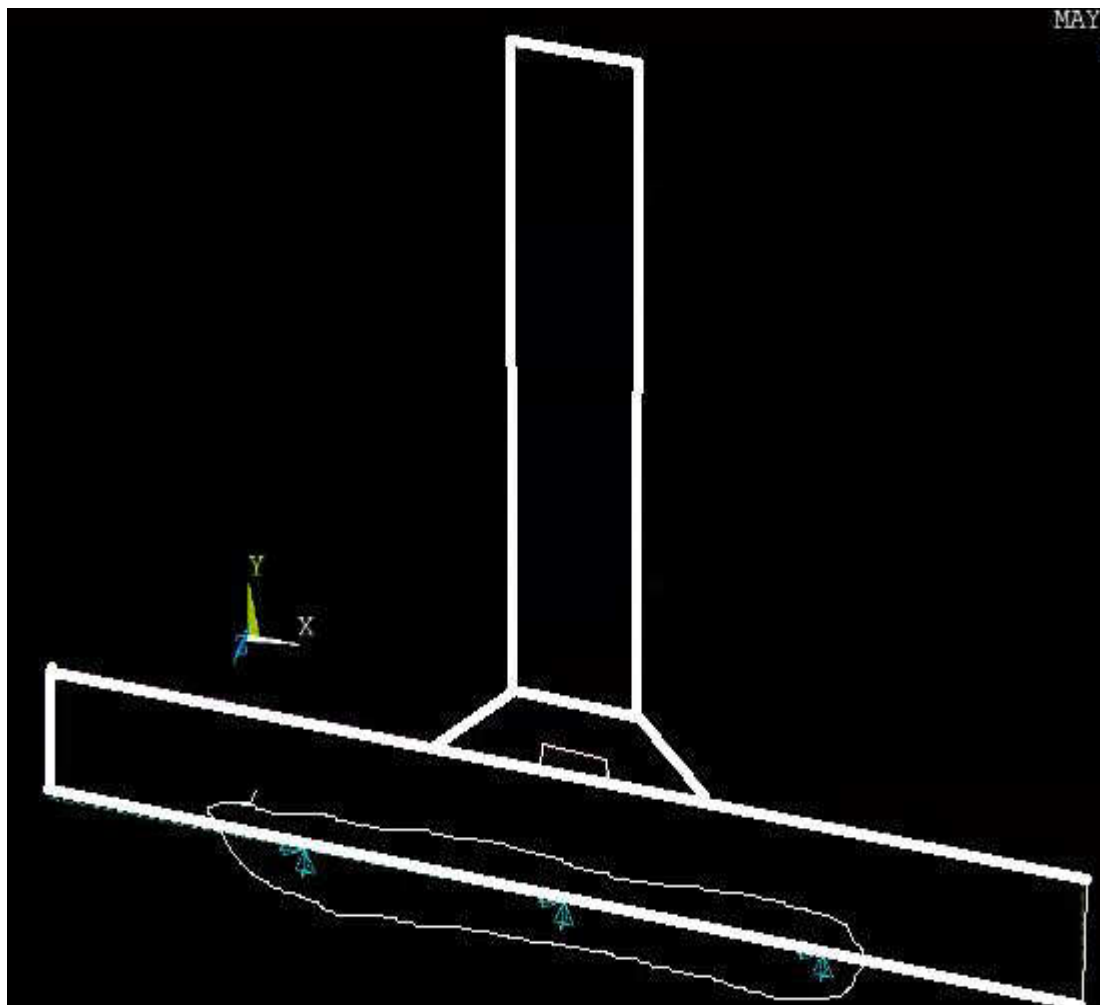


Рисунок 2.4 – Вид закрепления модели таврового соединения где жестко закреплена нижняя часть сварного соединения

На рисунке 2.4 показана закрепление сварного образца по нижней части сварного соединения. Перемещения в нижней части сварного соединения равны нулю.

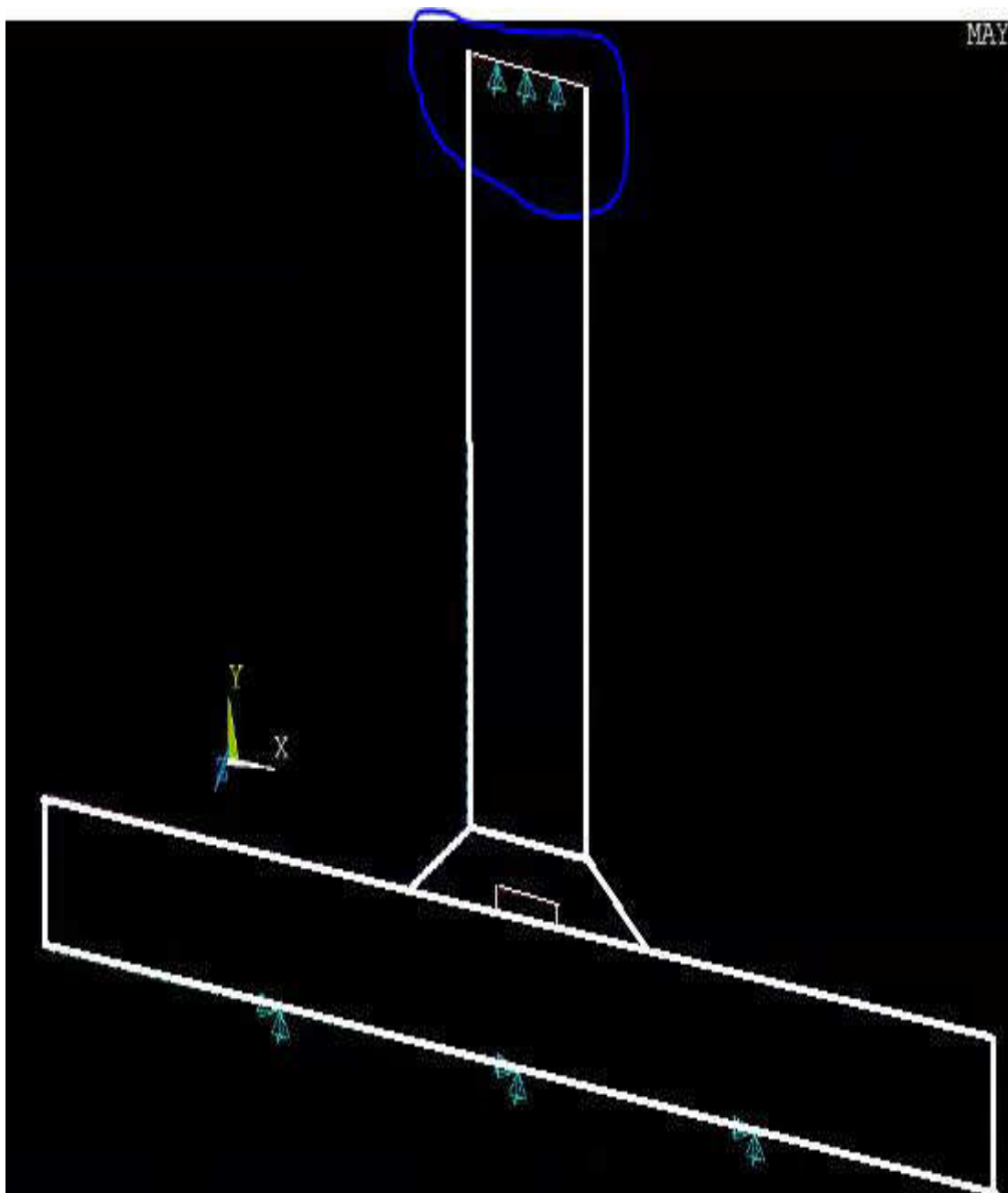


Рисунок 2.5 – Вид закрепления модели таврового соединения где задано перемещение по оси UY

На рисунке 2.5 видно закрепление по нижней части сварного соединения и еще приложена нагрузка перемещение на растяжение данного образца.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.251.00 ПЗ

Лист

47

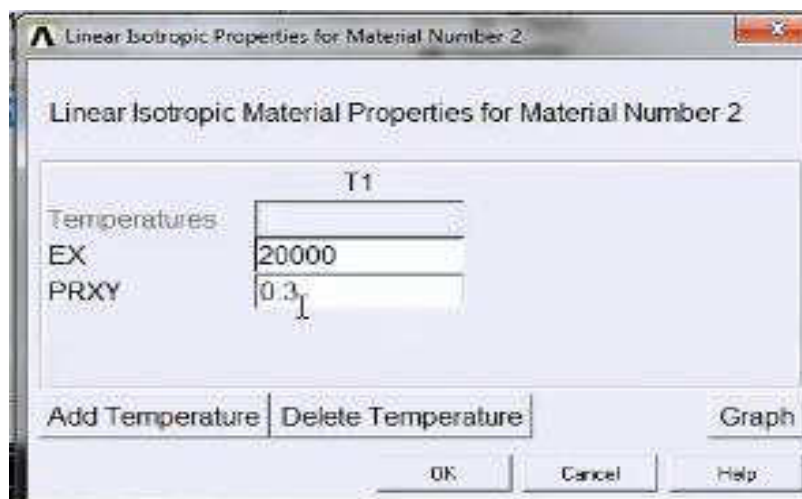


Рисунок 2.6 – задаем модуль упругости(модуль Юнга кг/мм) и коэф. Пуансона

На рисунке 2.6 показаны задаваемые значения программного обеспечения ANSYS а именно модуль Юнга и коэф. Пуансона

Прикладываем нагрузку к элементам сварной конструкции в программе ANSYS:

- 1) Нагрузка перемещением 10мм изгибающим момент по оси X;
- 2) Нагрузка перемещением 2мм растяжением по оси Y;
- 3) Предел текучести шва будет меняться от до в ходе эксперимента.
- 4) Рассмотрены два вида тавровых соединения с катетами и непроваром, без катетов с полным проплавлением.

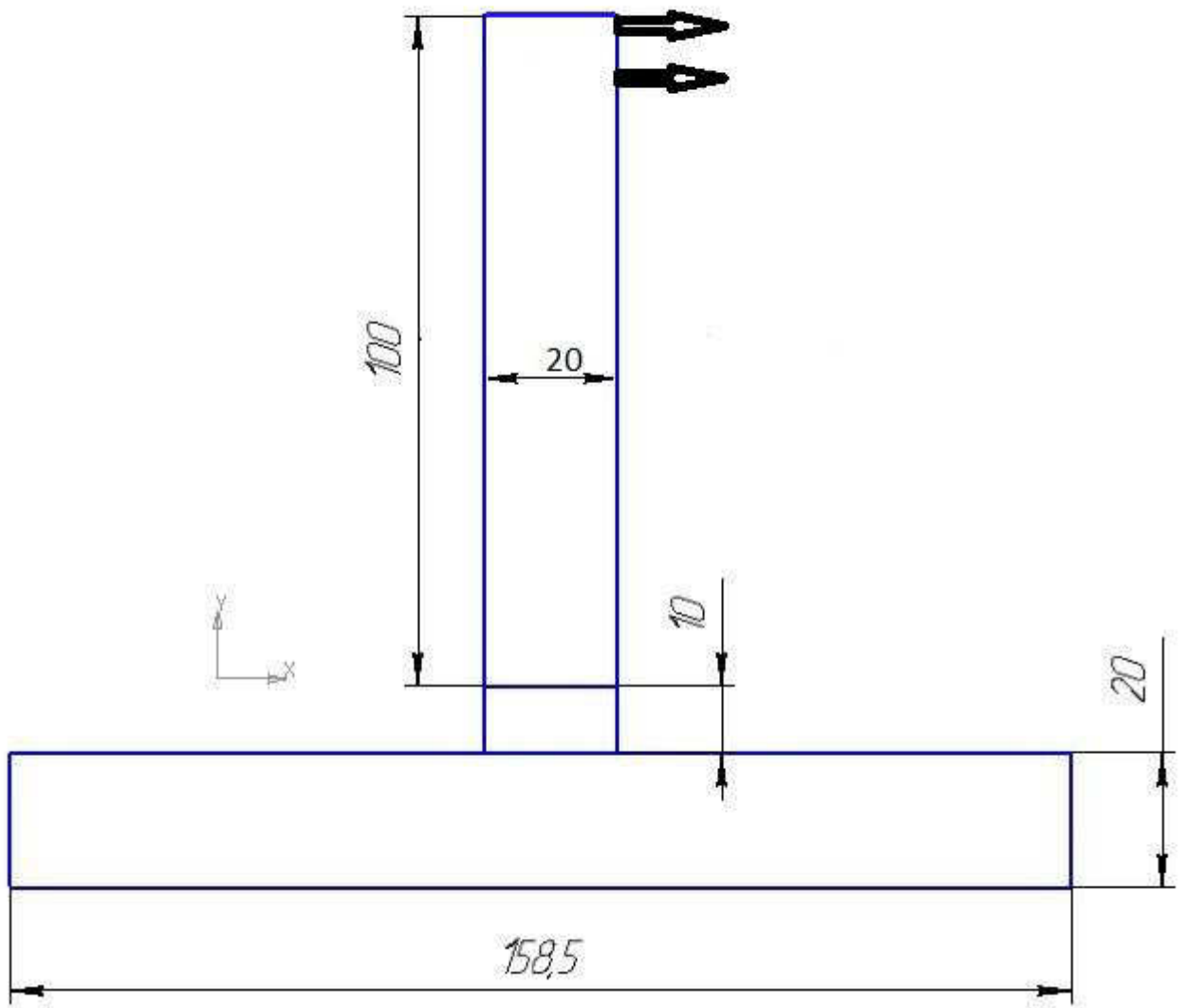


Рисунок 2.7 – задаем нагрузку изгибающего момента перемещением по оси X для таврового соединения без катетов на расстояние 10мм

На рисунке 2.7 показана нагрузка сварного соединения.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.251.00 ПЗ

Лист

49

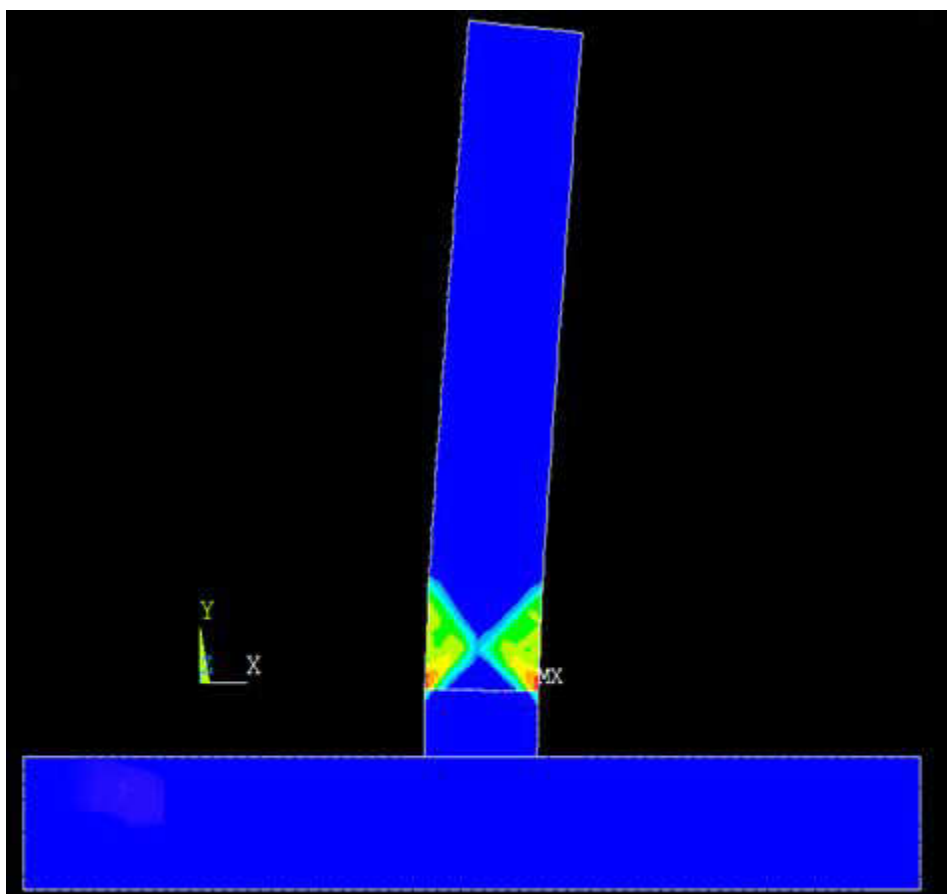


Рисунок 2.8– Экспериментальные данные изгибающего момента сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T=70\text{кгс/мм}^2$$

В результате расчета получены следующие (рисунок 2.8) было испытано тавровое соединения без катетов на изгиб по оси X. В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T=25\text{кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T=70\text{кгс/мм}^2$. Проводился расчёт программном обеспечении ANSYS. Был выявлен очаг пластической деформации находившейся в околошовной зоне, очаг максимальных деформации сконцентрирован на границе сварного шва и основного металла.

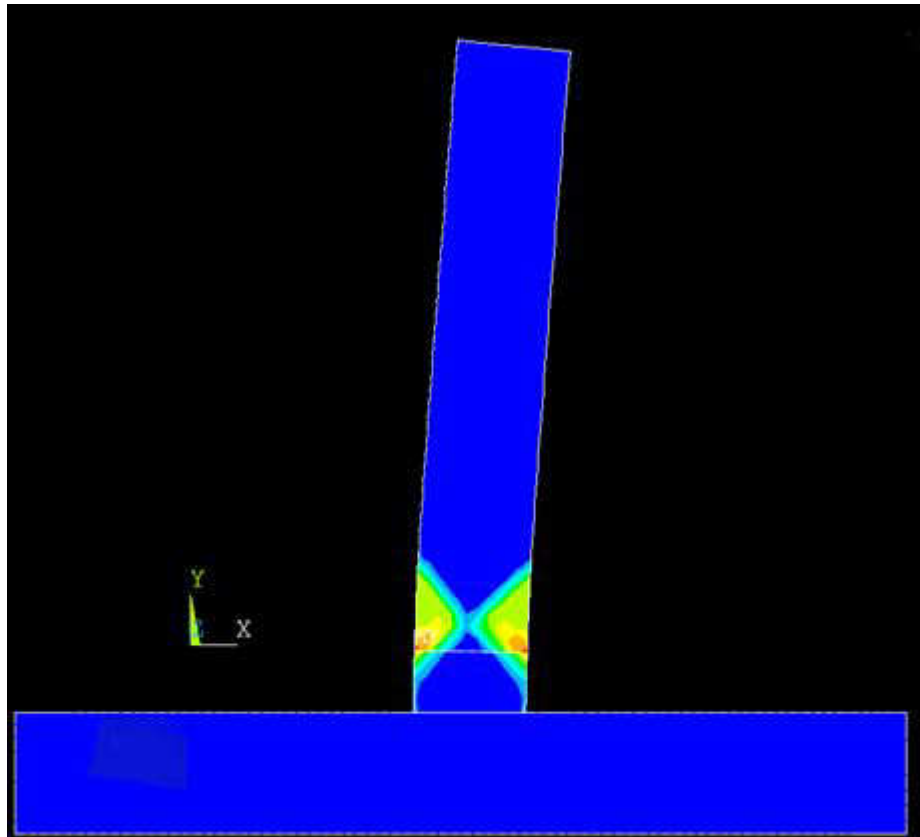


Рисунок 2.9 – Экспериментальные данные изгибающего момента сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=35 \text{ кгс/мм}^2$

В результате данного расчета было получено следующие, (рисунок 2.9) испытанию подверглось тавровое соединения без катетов на изгиб по оси X. В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T=25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T=35 \text{ кгс/мм}^2$. Проводился расчёт программном обеспечении ANSYS. Был выявлен очаг пластической деформации находившейся в околошовной зоне, переходящей в сварной шов. Очаг максимальной деформации сконцентрирован на границе сварного шва и основного металла.

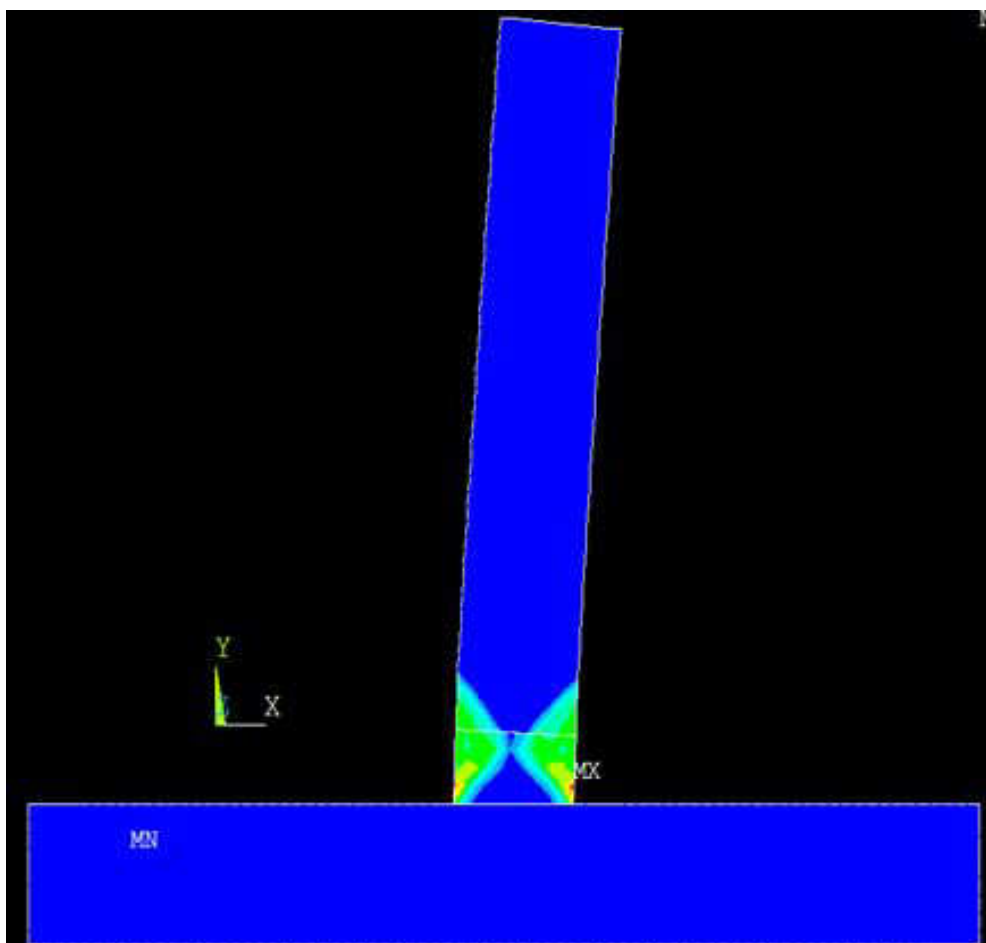


Рисунок 2.10 – Экспериментальные данные изгибающего момента сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$$

В результате данного расчета было получено следующие, (рисунок 2.10) испытанию подверглось тавровое соединения без катетов на изгиб по оси X. В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$. Проводился расчёт в программном обеспечении ANSYS. Был выявлен очаг пластической деформации находившейся по всей площади шва и перешел в основной металл. Очаг максимальной деформации сконцентрирован в сварном шве.

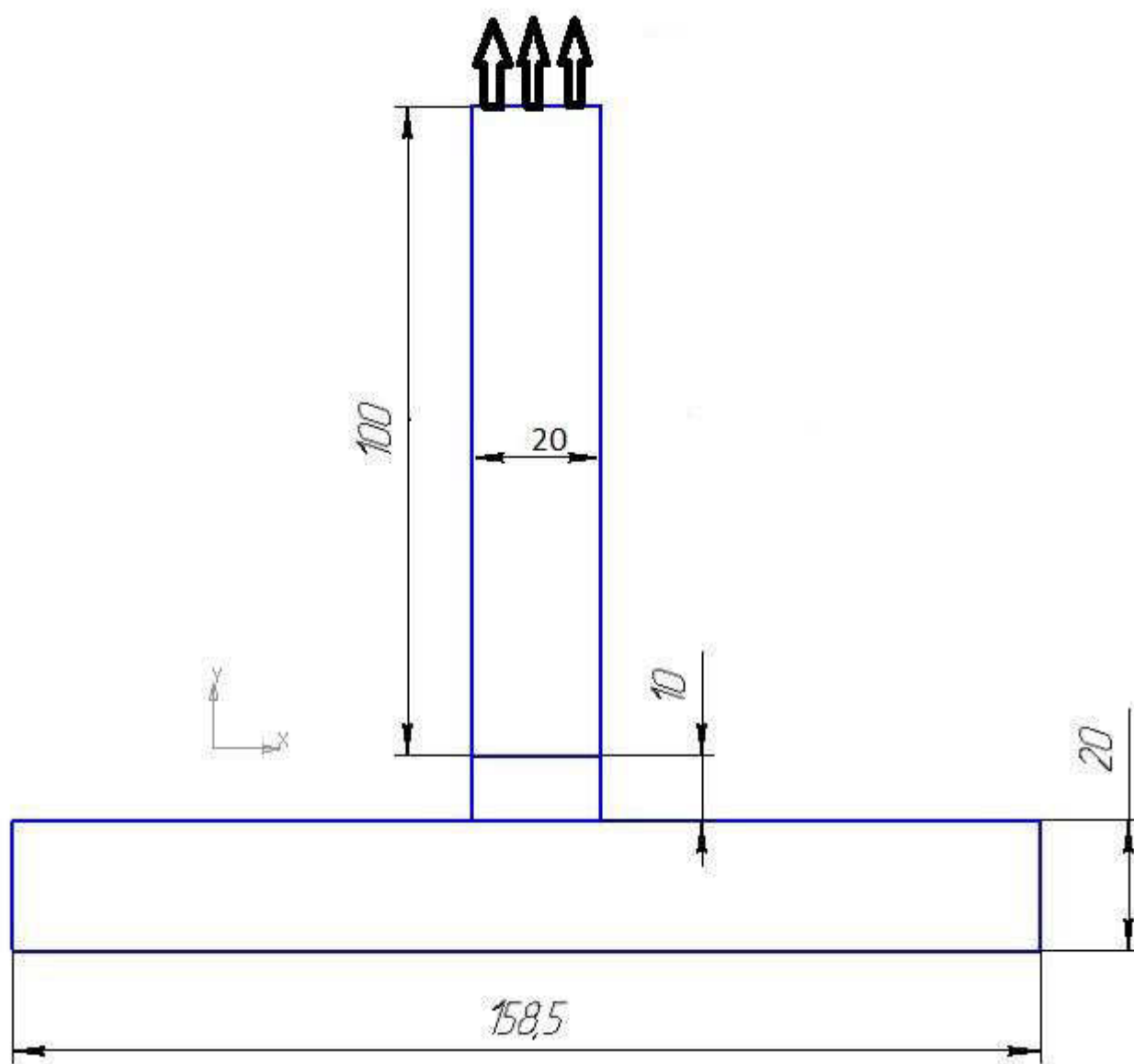


Рисунок 2.11 – задаем нагрузку растяжением перемещением по оси Y для таврового соединения без катетов на расстояние 10мм

На рисунке 2.11 показана нагрузка на растяжение .

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.251.00 ПЗ

Лист

53

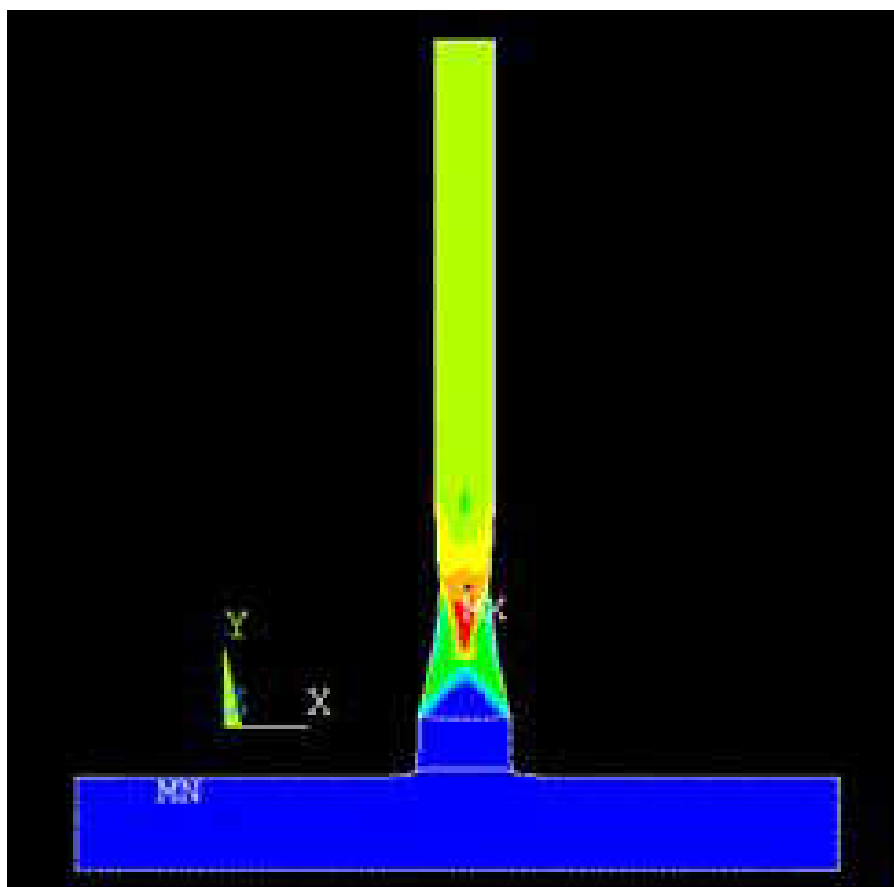


Рисунок 2.12 – Экспериментальные данные изгибающего момента сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 70 \text{ кгс/мм}^2$$

В результате данного расчета было получено следующие, (рисунок 2.12) испытанию подверглось тавровое соединения без катетов на растяжение по оси Y. В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T = 70 \text{ кгс/мм}^2$. Проводился расчёт в программном обеспечении ANSYS. Был выявлен очаг пластической деформации находившейся в основном металле. Очаг максимальных деформации сконцентрирован в основном металле.

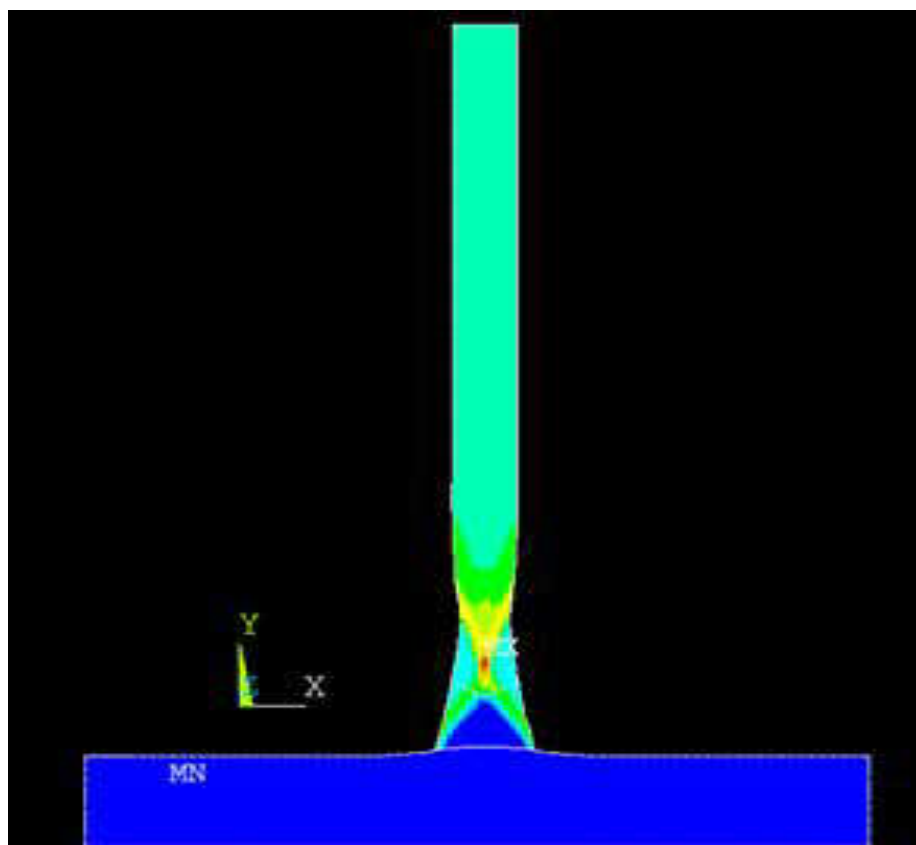


Рисунок 2.13 – Экспериментальные данные изгибающего момента сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчета было получено равнопрочное соединение, (рисунок 2.1 3) испытанию подверглось тавровое соединения без катетов на растяжение по ос и Y. В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг пластической деформации находившейся в основном металле, и в сварном шве. Очаг максимальной деформации сконцентрирован в основном металле.

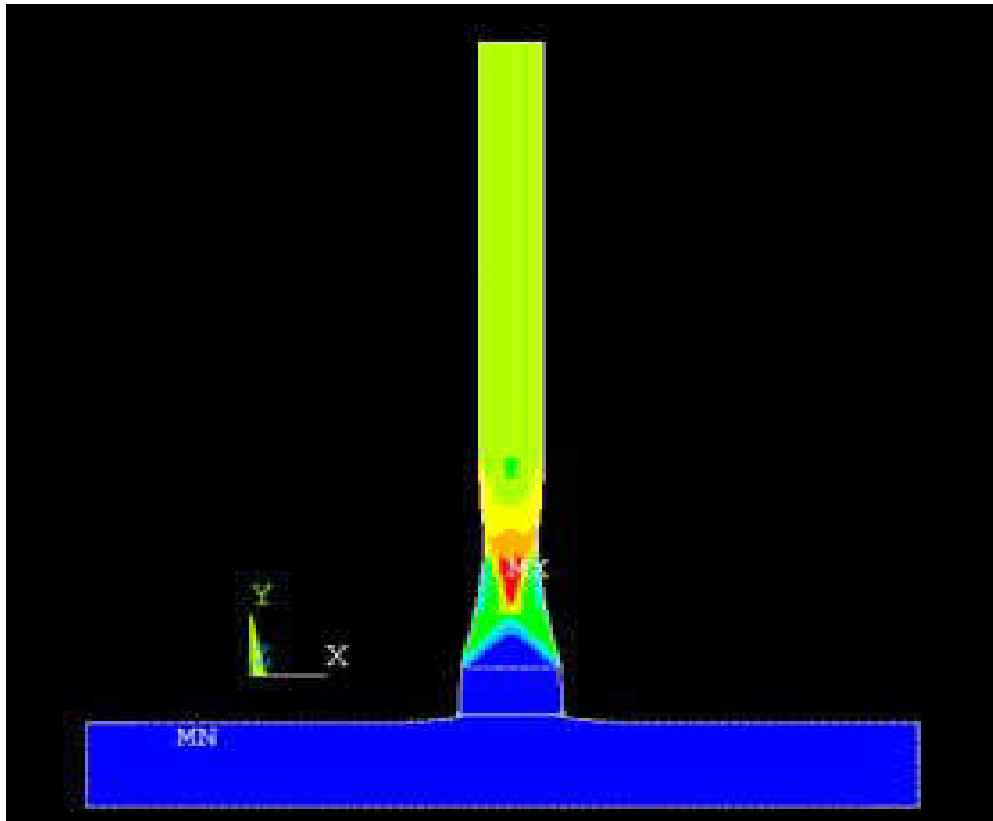


Рисунок 2.14 – Экспериментальные данные изгибающего момента сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T=50 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчета было получено наглядная картина деформации(рисунок 2.14) испытанию подверглось тавровое соединения без катетов на растяжение по оси Y. В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T=25\text{кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T=50\text{кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг пластической деформации находившейся в основном металле. Очаг максимальных деформации сконцентрирован в основном металле.

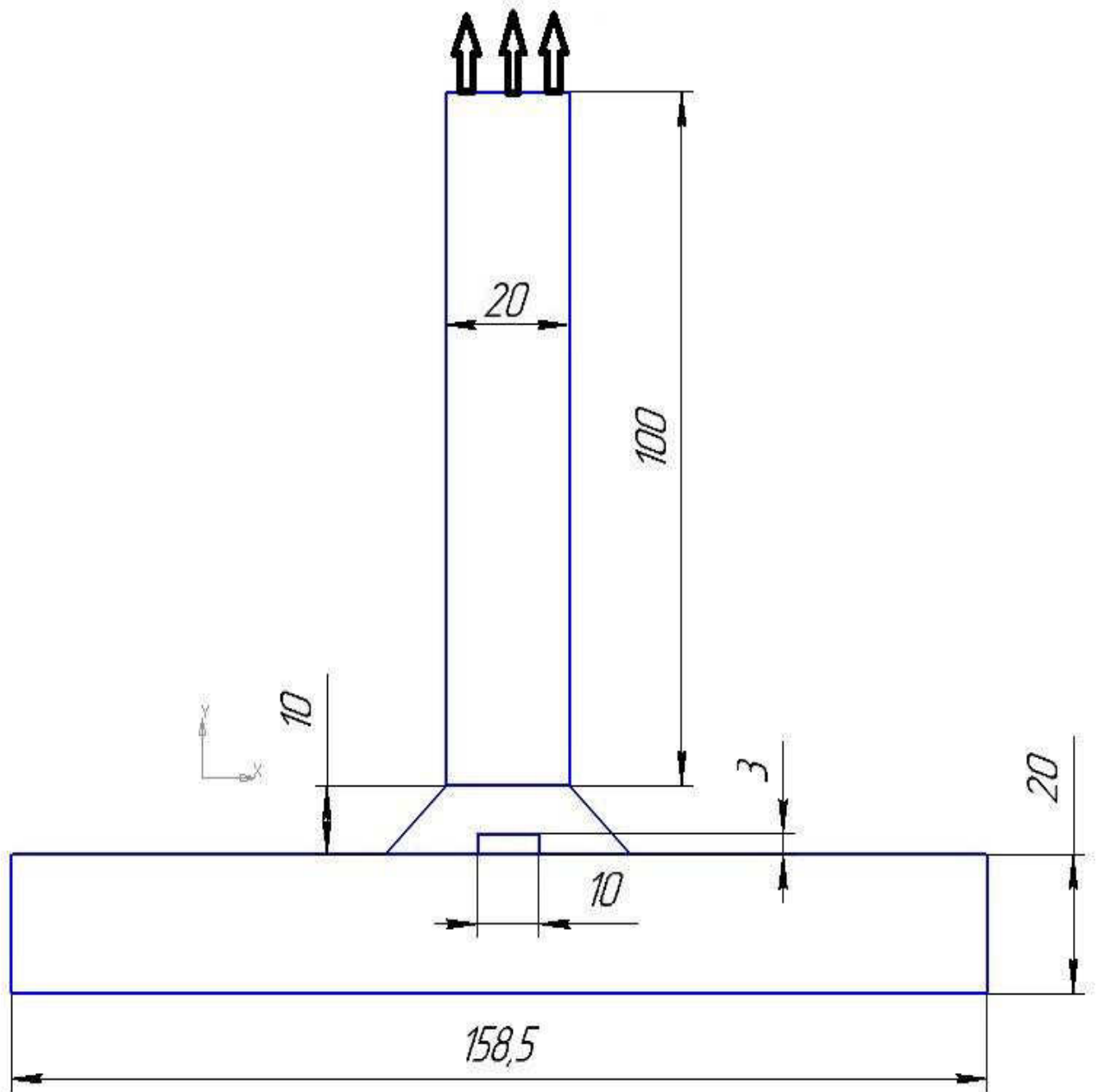


Рисунок 2.15 – задаем нагрузку растяжение перемещением по оси Y для таврового соединения с катетами и непроваром на расстояние 10мм

На рисунке 2.15 показано сварное соединение с усилением шва и технологическим непроваром где задана нагрузка на растяжение.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.251.00 ПЗ

Лист

57

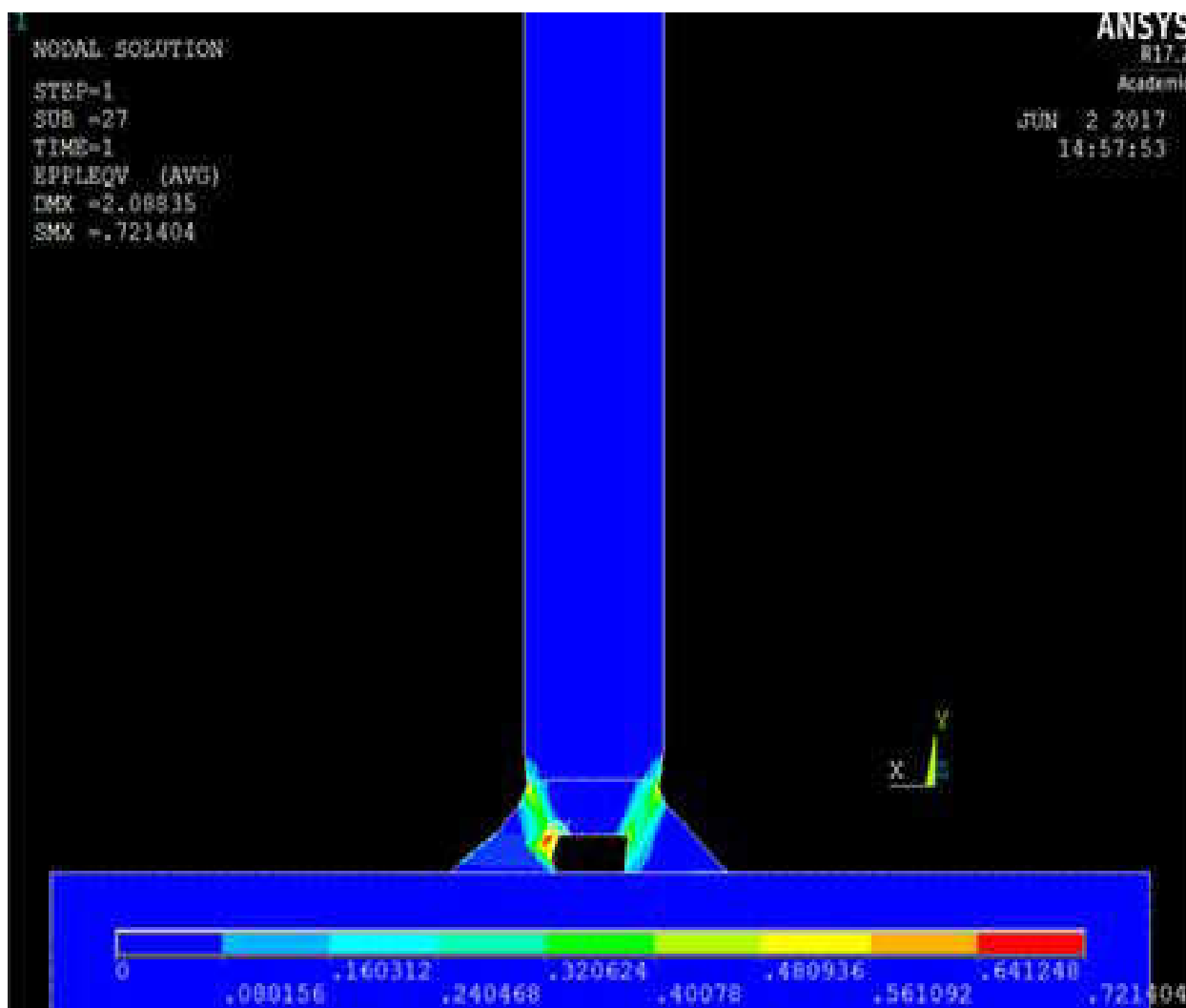


Рисунок 2.16 – Экспериментальные данные растяжения сварного равнопрочного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T=25 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчета было получено наглядная картина деформации(рисунку 2.16) испытанию на растяжение по оси Y подверглось тавровое равнопрочное с соединения с катетами и непроваром в сварном шве . В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T=25\text{кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T=25\text{кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг пластической деформации находившейся в сварном шве и переходящий в основной метал. Очаг максимальных деформации сконцентрирован в сварном шве в зоне расположения непровара.

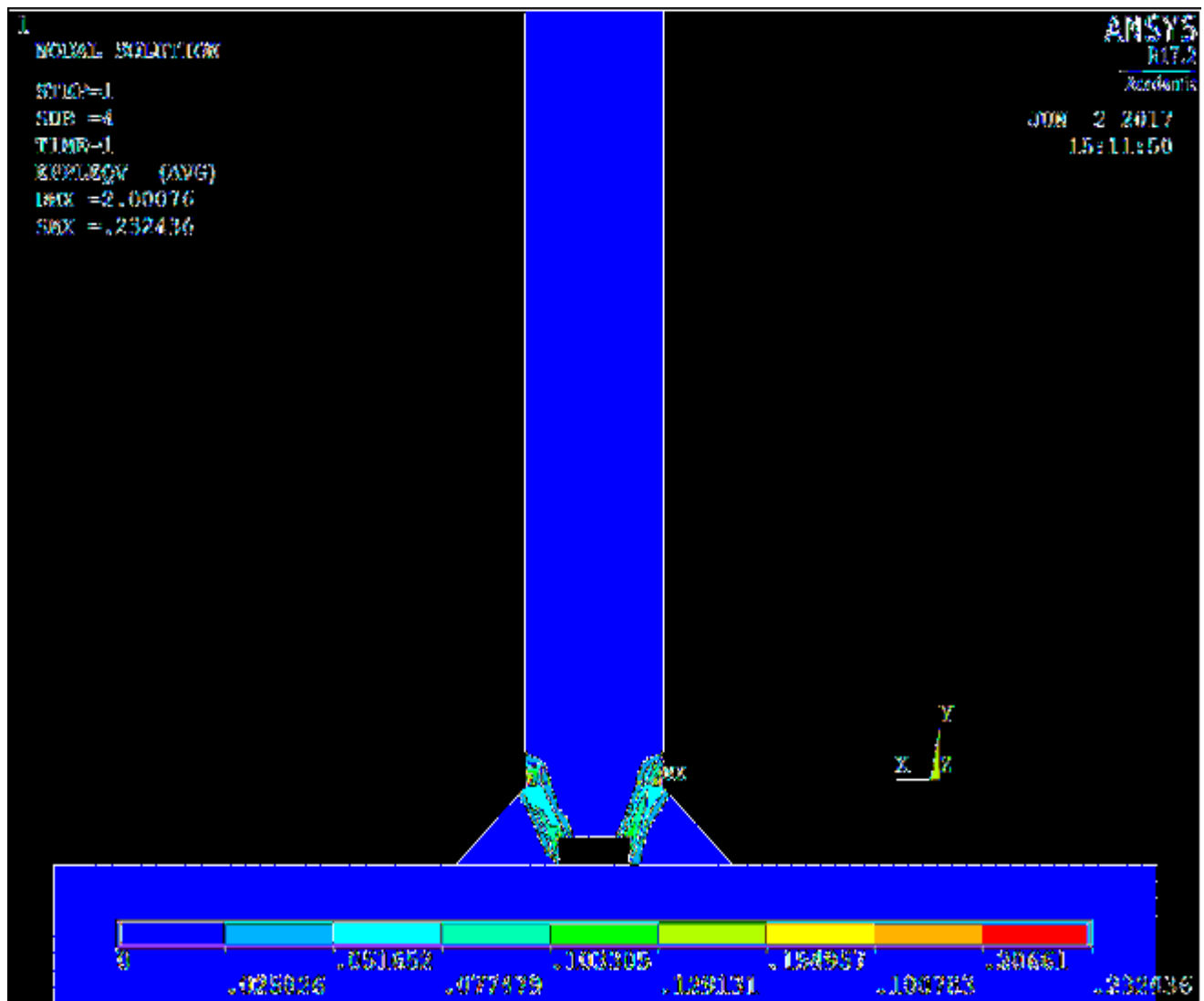


Рисунок 2.17 – Экспериментальные данные растяжения сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=30$ кгс/мм²

В ходе данного расчета было получено наглядная картина деформации(рисунок 2.17) испытанию на растяжение по оси Y подверглось тавровое соединения с катетами и непроваром в сварном шве . В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T=25$ кгс/мм² , предел текучести сварного шва $\sigma_T=30$ кгс/мм². Был выявлен очаг пластической деформации находившейся в сварном шве и переходящий в основной металл. Очаг максимальных деформации сконцентрирован на границе сварного шва и основного металла.

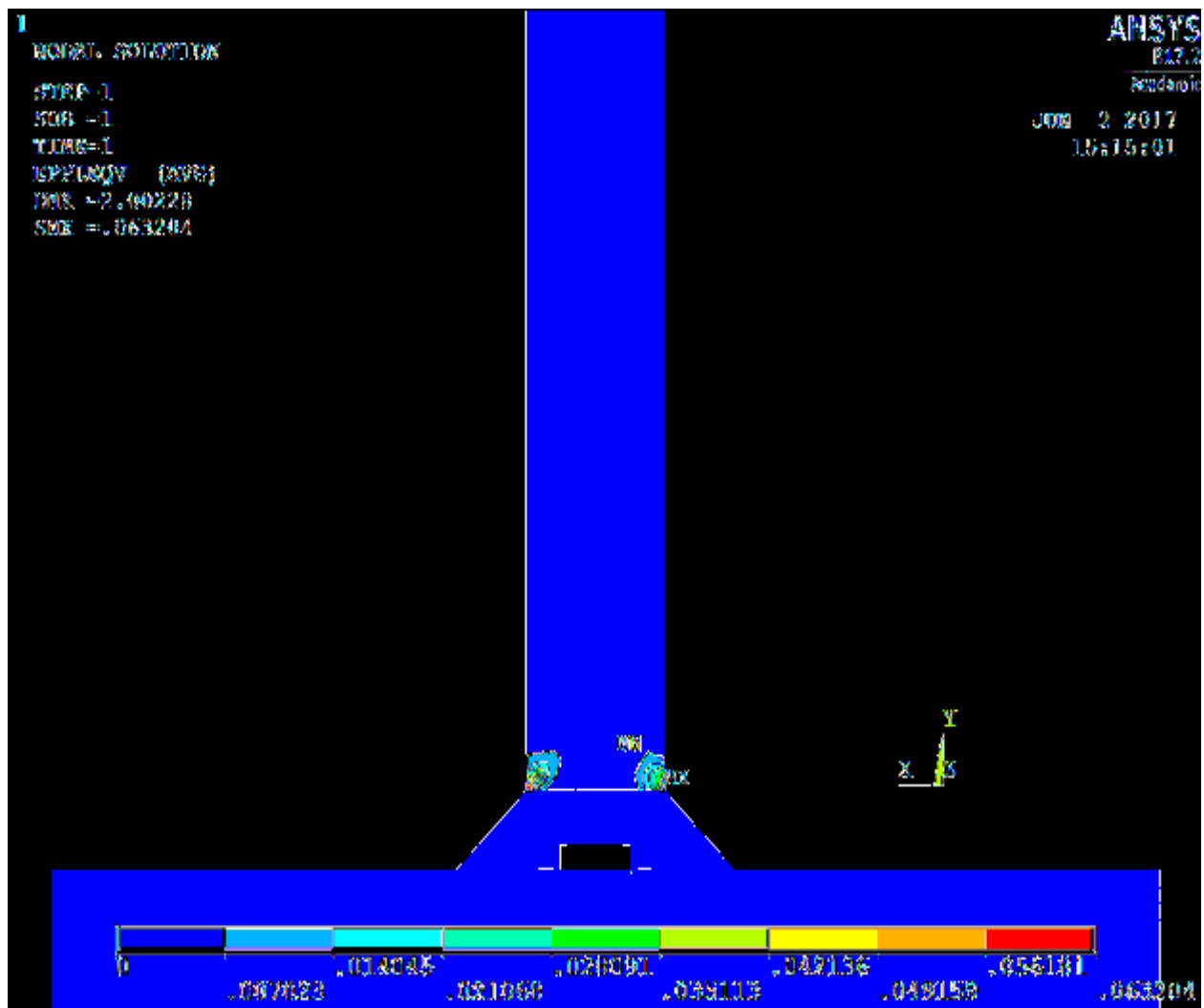


Рисунок 2.18 – Экспериментальные данные растяжения сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=50 \text{ кгс/мм}^2$

В ходе данного расчета было получено наглядная картина деформации(рисунок 2.18) испытанию на растяжение по оси Y подверглось тавровое соединения с катетами и непроваром в сварном шве . В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T=25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T=50 \text{ кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг пластической деформации находившейся в основном металле. Очаг максимальной деформации сконцентрирован на границе сварного шва и основного металла. Наличие непровара не влияет на деформацию сварного соединения.

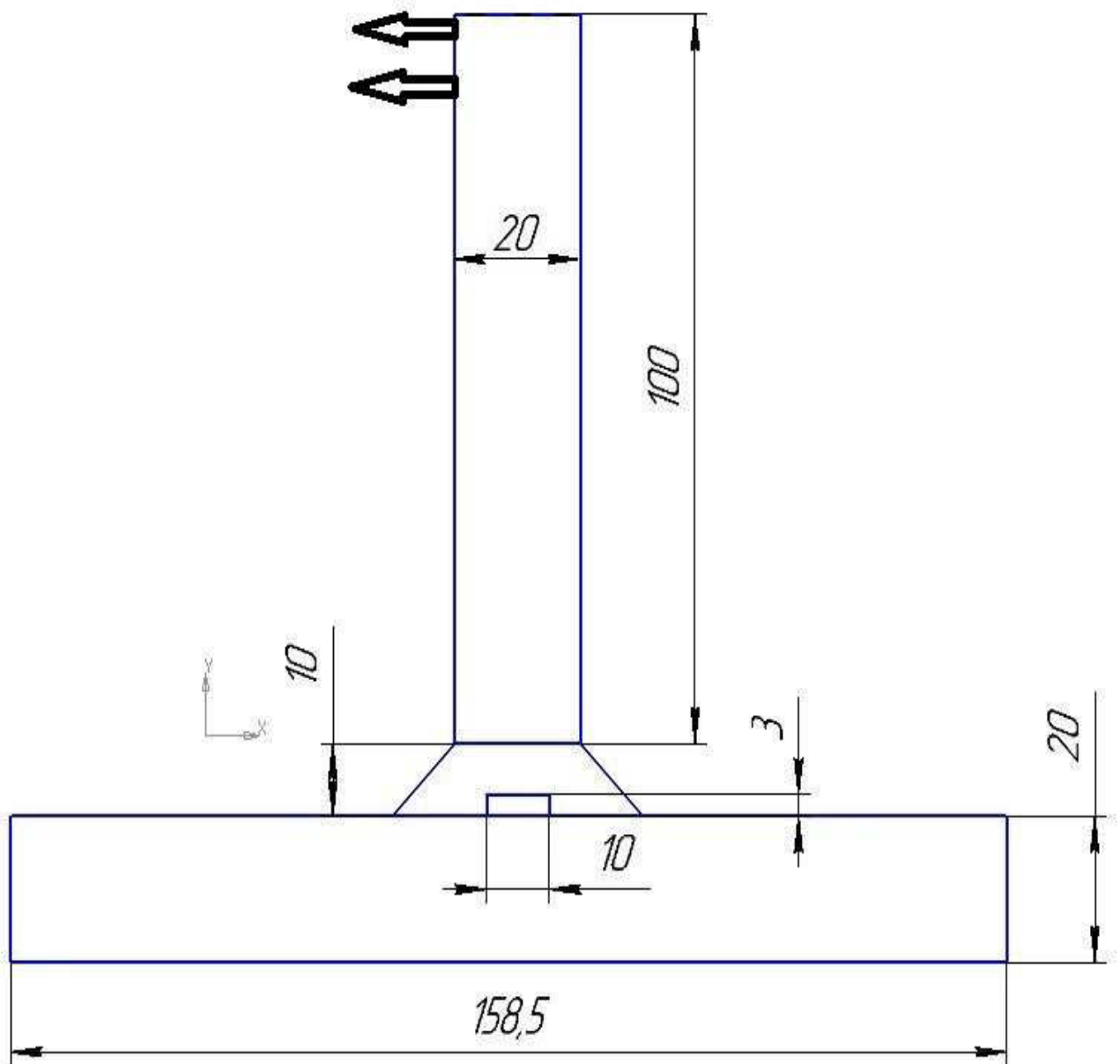


Рисунок 2.19 – задаем нагрузку изгибающего момента перемещением по оси X для таврового соединения с катетами и непроваром на расстояние 10мм

На рисунке 2.19 показано сварное соединение выполненное с усилением шва и технологическим непроваром и приложена нагрузка на изгиб.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.251.00 ПЗ

Лист

61

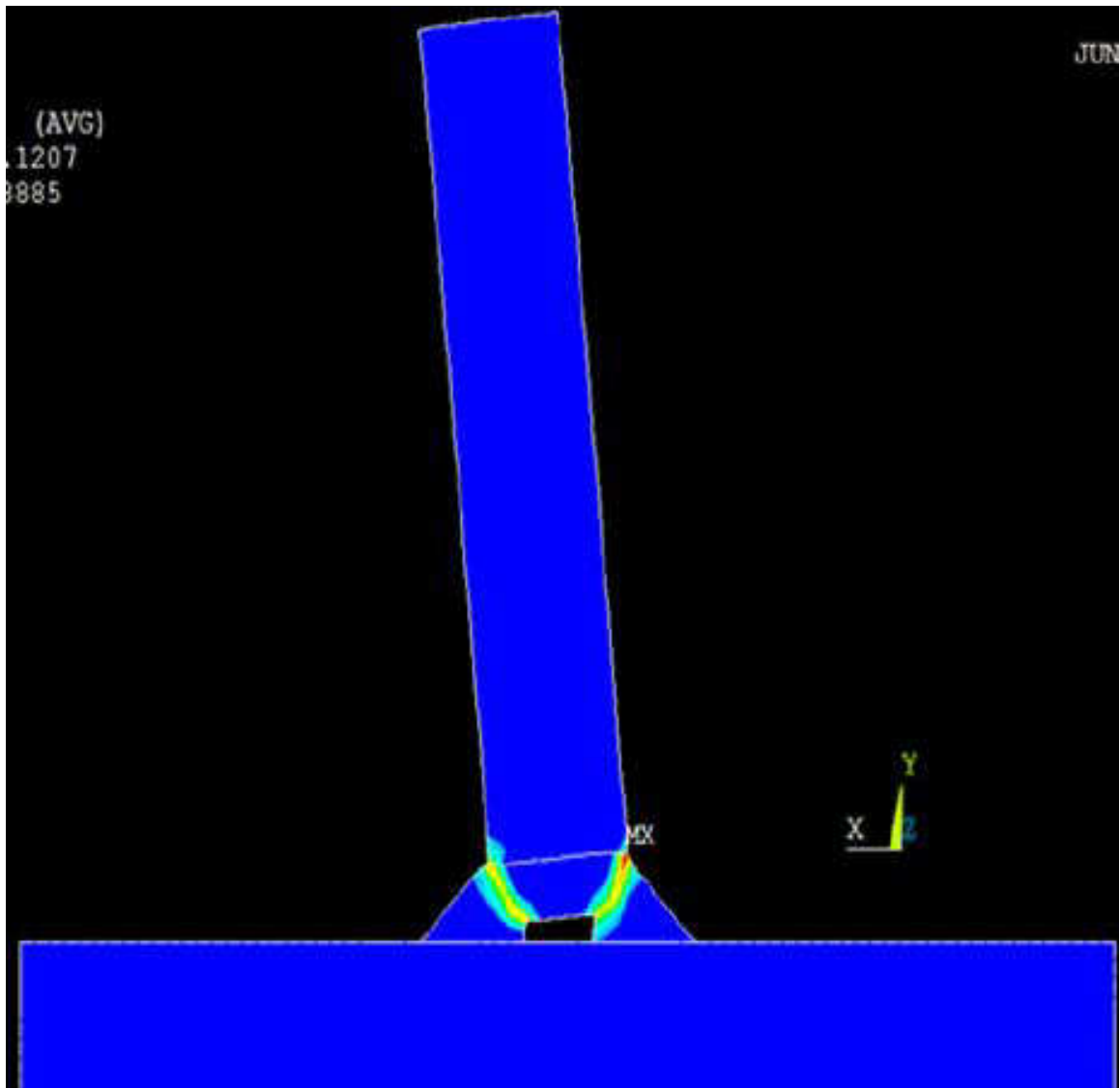


Рисунок 2.20 – Экспериментальные данные изгибающего момента сварного равнопрочного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=25 \text{ кгс/мм}^2$

В ходе данного расчета было получено наглядная картина деформации(рисунку 2.20) испытанию на изгиб по оси X. подверглось тавровое соединения с катетам и и непроваром в сварном шве . В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T=25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T=25 \text{ кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг пластической деформации находившейся в сварном шве. Очаг максимальных деформации сконцентрирован в сварном шве.

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

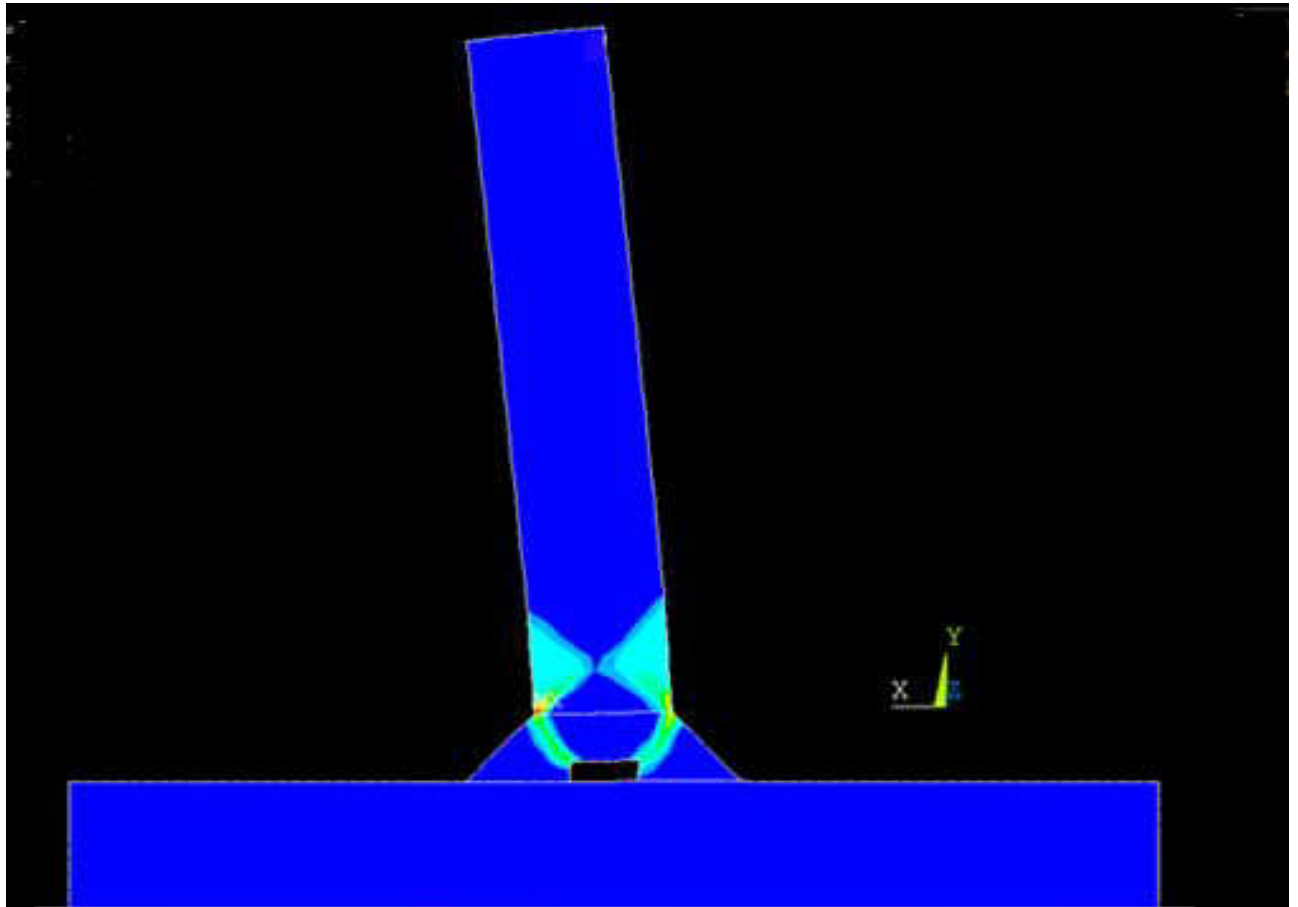


Рисунок 2.21 – Экспериментальные данные изгибающего момента сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T=26 \text{ кгс/мм}^2.$$

В ходе данного расчета было получено наглядная картина деформации(рисунок 2. 21) испытанию на изгиб по оси X. подверглось тавровое соединения с катетами и непроваром в сварном шве . В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T=25\text{кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T=27\text{кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг пластической деформации

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

(эффект шарнира) находившейся в сварном шве и основном металле. Очаг максимальных деформации сконцентрирован на границе сварного соединения.

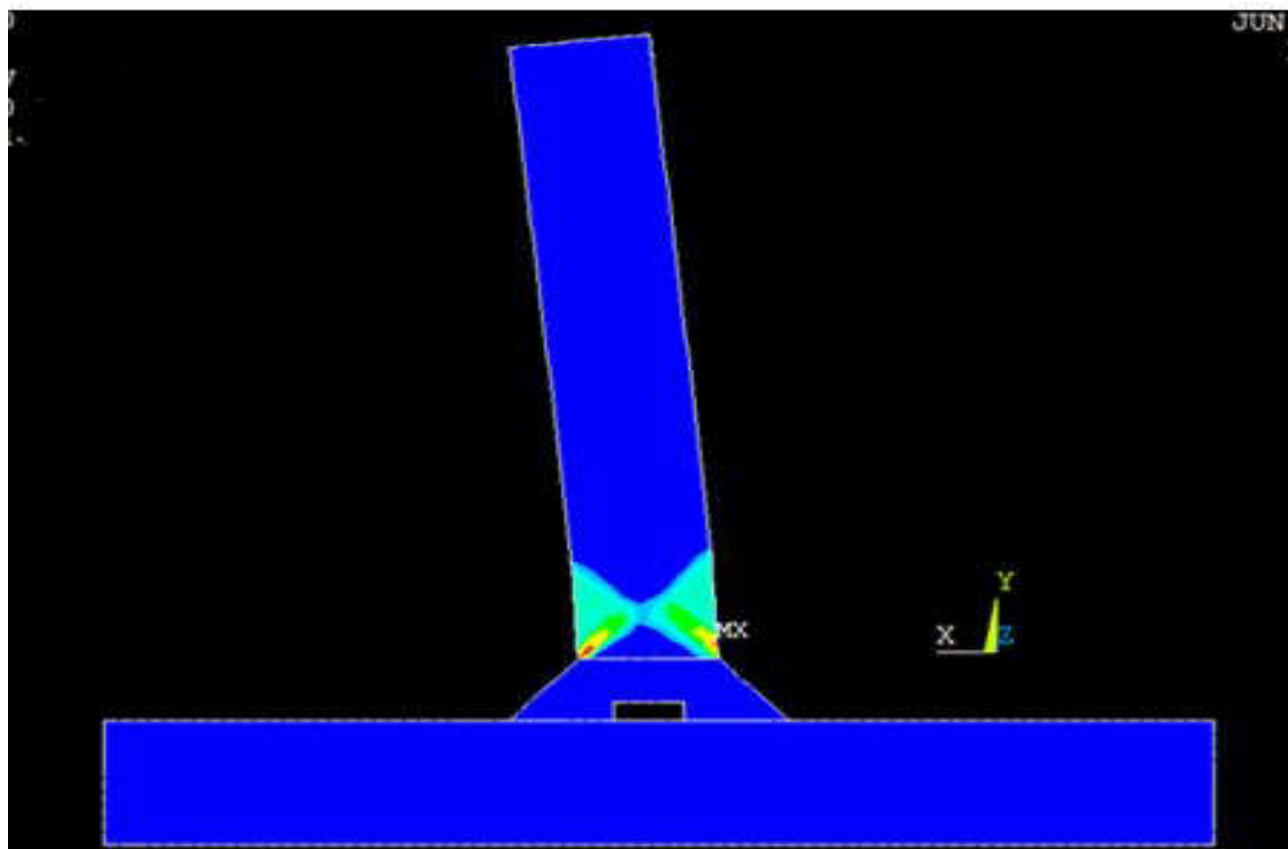


Рисунок 2.22 – Экспериментальные данные изгибающего момента сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T=40 \text{ кгс/мм}^2.$$

В ходе данного расчета было получено наглядная картина деформации(рисунку 2.22) испытанию на изгиб по оси X. подверглось тавровое соединения с катетам и и непроваром в сварном шве . В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T=25\text{кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T=40\text{кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг пластической деформации

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

ции находившейся в с основным металле. Очаг максимальной деформации сконце нтрирован на границе сварного соединения.

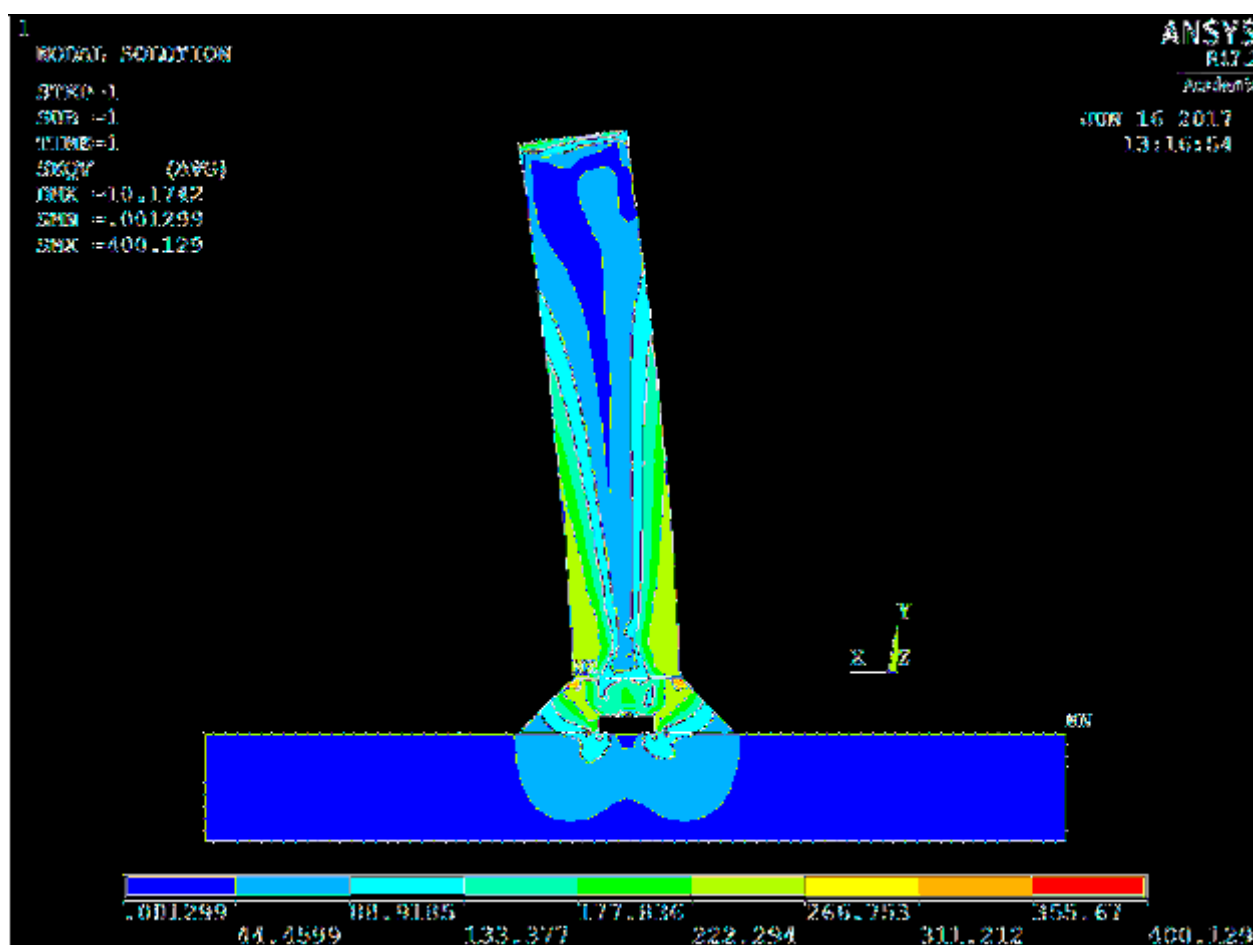


Рисунок 2.23 – Экспериментальные данные изгибающего момента сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 50 \text{ кгс/мм}^2. \text{ Напряжение}$$

На рисунке 2.23 показаны эквивалентные напряжения при изгибе.

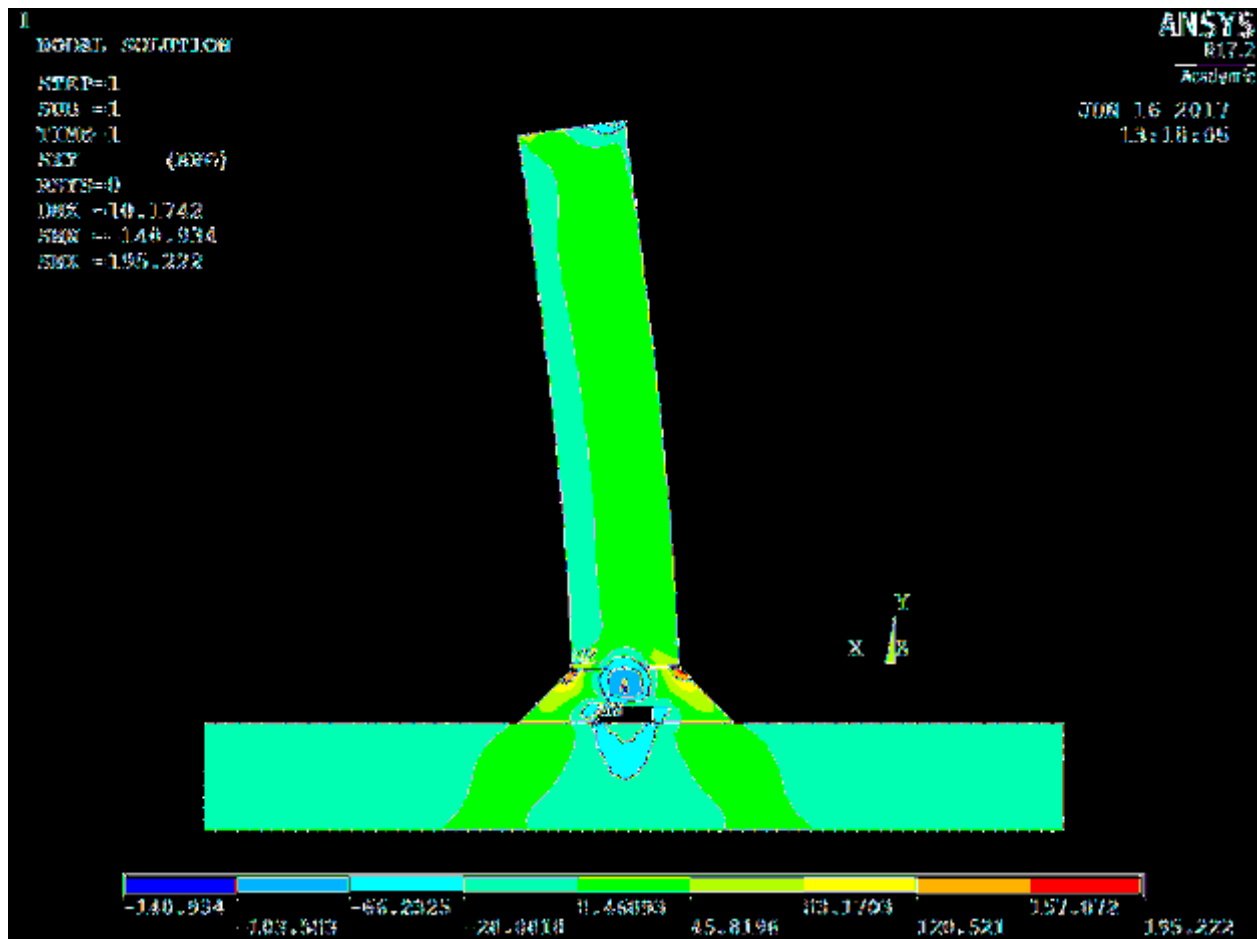


Рисунок 2.24 – Экспериментальные данные изгибающего момента сварного соединения полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 50 \text{ кгс/мм}^2.$$

Дополнительно рассмотрено напряженное деформируемое состояние в результате установлено в ходе данного расчета было получено наглядная картина напряжений (рисунок 2.23) (рисунок 2.24) испытанию на изгиб по оси X. подверглось тавровое соединения с катетами и непроваром в сварном шве. В программу ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T = 50 \text{ кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг напряжений находившейся в с сварном шве. Очаг максимальных эквивалентных напряжений сконцентрирован на границе сварного шва. Одной из установленных причин является высокий уровень касательных напряжений на границе раздела

твёрдого и мягкого металлов. Из этого следует что чрезмерное увеличение прочности сварного шва может привести к негативным последствиям а именно снижению несущей способности сварного соединения.

2.4 Вывод в рамках исследования деформированного состояние сварного соединения.

В результате исследований, проведенных в рамках данной главы диссертации, установлено следующее:

1. В первом опыте тавровое сварное соединение выполненное без усиления шва работающее на растяжение и изгиб показала следующие результаты: (рисунки 2.8, 2.9, 2.10, 2.12, 2.13, 2.14).

В ходе испытаний на изгиб и растяжение таврового сварного соединения был выявлен очагэквивалентных деформации находившейся в с сварном шве. Очаг максимальных эквивалентных деформаций варьируется, от сварного шва в основной металл. Способствует этому изменение твердости шва.

2. Во втором опыте тавровое сварное соединение выполненное с усилением шва и технологически неповаром работающее на растяжение и изгиб показала следующие результаты:

(рисунки 2.16, 2.17, 2.18, 2.20, 2.21, 2.22).

Для каждой серии испытаний, характеризуемой одинаковыми размерами конструкций, предел текучести сварного шва изменяли от 250 до 400.

Установлено, что основное влияние на расположение эквивалентных деформаций в сварном соединений здесь оказывает изменяемый предел текучести сварного шва. Из этого следует что при увеличений твердости шва эквивалентные деформации переходят от сварного соединения в основной металл.

3. Дополнительно рассмотрено напряженное деформируемое состояние сварного соединения. Где сварной шов играл роль твердой прослойки в результате установлено в ходе данного расчета было получено наглядная картина напряжений(рисунок 2.23)(рисунок 2.24) .

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

Очаг максимальных эквивалентных напряжений сконцентрирован на границе сварного шва. Одной из установленных причин является высокий уровень касательных напряжений на границе раздела твердого и мягкого металлов. Из этого следует что чрезмерное увеличение прочности сварного шва может привести к негативным последствиям а именно снижению несущей способности сварного соединения.

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, проведенных в рамках данной главы диссертации, установлено следующее:

1. В первом опыте тавровое сварное соединение выполненное без усиления шва работающее на растяжение и изгиб показала следующие результаты: (рисунки 2.8, 2.9, 2.10, 2.12, 2.13, 2.14).

В ходе испытаний на изгиб и растяжение таврового сварного соединения был выявлен очагэквивалентных деформации находившейся в с сварном шве. Очаг максимальных эквивалентных деформаций варьируется, от сварного шва в основной металл. Способствует этому изменение твердости шва.

2. Во втором опыте тавровое сварное соединение выполненное с усилением шва и технологически непроваром работающее на растяжение и изгиб показала следующие результаты:

(рисунки 2.16, 2.17, 2.18, 2.20, 2.21, 2.22).

Для каждой серии испытаний, характеризуемой одинаковыми размерами конструкций, предел текучести сварного шва изменяли от 250 до 400.

Установлено, что основное влияние на расположение эквивалентных деформаций в сварном соединении здесь оказывает изменяемый предел текучести сварного шва. Из этого следует что при увеличений твердости шва эквивалентные деформации переходят от сварного соединения в основной металл.

3. Дополнительно рассмотрено напряженное деформируемое состояние сварного соединения. Где сварной шов играл роль твердой прослойки в результате установлено в ходе данного расчета было получено наглядная картина напряжений (рисунок 2.23)(рисунок 2.24) .

Очаг максимальных эквивалентных напряжений сконцентрирован на границе сварного шва. Одной из установленных причин является высокий уровень касательных напряжений на границе раздела твердого и мягкого металлов. Из этого следует что чрезмерное увеличение прочности сварного шва может привести к негативным последствиям а именно снижению несущей способности сварного соединения.

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев, Г.А. Влияние дефектов сварки на механические свойства сварных соединений / Г.А. Николаев, С.В. Румянцев // Вопросы прочности металлов и конструкций: Темат. сб. научн. тр.-М: АН СССР, 1959.- С.82-91.

2. Шахматов, М.В. Напряженное состояние и прочность сварных соединений с двухсторонней наружной трещиной в мягкой прослойке / М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев// Темат. сб. научн. тр.: Вопросы сварочного производства.- Челябинск: ЧПИ.- 1983.-С.11-20.

3. Клыков, Н.А. Прочность сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью / Н.А. Клыков, А.Л. Решетов // Автоматическая сварка. 1979. - №12. - С.29-32.

4. Шахматов, М.В. Исследование влияния конструктивных и геометрических параметров стыковых биметаллических швов на работоспособность сварных соединений: автореф дис. канд. техн. наук / М.В. Шахматов. -М.: МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1979. 16 с.

5. Бакши, О.А. Расчетная оценка прочности и энергоемкости сварных стыковых соединений при изгибе / О.А. Бакши, Б.Г. Кульневич // Автоматическая сварка.- 1965.-№7.-С.46-51.

6. Качанов, Л.М. Изгиб упругопластической прослойки / Л.М. Качанов // Тр. Ленинградского государственного университета: Исследования по упругости и пластичности.- 1964.-Вып.3.-С.52-61.

7. Иванова, Т.И. Влияние неоднородности сварных стыковых соединений на характер деформирования их при статическом изгибе / Т.И. Иванова // Сварочное производство.-1957.-№12.- С.17-21.

8. Бакши, О.А. Влияние степени механической неоднородности на вязкую прочность сварных соединений при растяжении / О.А. Бакши,

9. Т.В. Кульневич // Физика и химия обработки материалов. 1973. - №1. -С.23-27.

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

10. Гурьев, А.В. К вопросу о расчетной прочности сварных образцов с мягкой прослойкой при статическом растяжении / А.В. Гурьев, В.П. Багмутов, Ю.Д. Хесин // Проблемы прочности. 1973. - №1. - С.9-13.

11. Харченко, Г.К. Прочность соединений с тонкой мягкой прослойкой / Г.К. Харченко, А.И. Игнатенко // Автоматическая сварка. — 1968.-№5. — С. 31-22.

12. Браженис, А.П. Исследование перераспределения деформаций в неоднородном сварном соединении при малоцикловом нагружении /

13. Шахматов, М.В. Оценка несущей- способности тавровых сварных соединений с непроварами в условиях вязкого разрушения при изгибе / М.В. Шахматов, С.Ф. Айметов, Ф.Г. Айметов // Сварочное производство. — 2008.-№4.- С. 11-16.

14. Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В.Соколовский // ГИТТЛ. -М.-Л.-1969.

15. Когут, Н.С. Несущая способность сварных соединений / Н.С. Когут, М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев. Львов: Свит, 1991. - 184 с.

16. Бут, В.С. Повышение работоспособности нахлесточных сварных соединений / В.С. Бут, А.Е. Аснис, Г.А. Иващенко // Автоматическая сварка. — 1986.- №9. — С.35-37.

17. Механика разрушения и прочность материалов: Справ: пособие: В 4 т.Том 1 / под ред. В.В. Пкнасюка. Киев: Наукова думка. - 1988,;

18. Ярославцев, С.И. Методика расчетной оценки прочности стыковыхпаяных соединений трубопроводов: автореф. дис. канд: техн. наук /

19. С.И. Ярославцев. Челябинск: ЧПИ, 1986. - 18 с.

20. Сварка> и свариваемые материалы: Справочник в 3-х т. Том 1 / под. . ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991. - 528 с.

21. Котельников, А.А.Структура и свойства переходной зоны при диффузионной сварке стали 15 со сплавом АМц и алюминием АД2 через никелевую прослойку / А.А. Котельников, С.Е. Ушаков, В.И. Ильченко7// Автоматическая сварка. 1970.-№11.-С.27-29.

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

22. Кусков, Ю.И. Прочность сваренных взрывом титаново-алюминиевых соединений и ее расчетная оценка / Ю.И. Кусков, В.С. Седых, Ю.П. Трыков // Сварочное производство.- 1975.-№9.-С.11-13.

23. Лаптев, А.А. Некоторые прочностные характеристики сварных соединений из высокопрочных нержавеющей сталей ВСН2 и ВСН5 / А.А. Лаптев, П.М. Любалин, И.Н. Белолетов // Сварочное производство.-1972.-№6.-С.29-31.

24. Бельчук, Г.А. О соотношениях показателей сопротивления деформации металла в сварных соединениях / Г.А. Бельчук // Тр. Ленинградского политехнического института. 1964 г. — Вып. 12. Сварочное производство. — С. 25-30.

25. Касаткин, Б.С. Применение низколегированных высокопрочных сталей для сварных конструкций / Б.С. Касаткин, В.Ф. Мусленченко. М.: Техника, 1972. - 37 с.

26. Окерблом, Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н.О. Окерблом. М.- Л.: Машиностроение, 1964. -800 с.

27. Руссо, В.Л. Полуавтоматическая сварка стыковых соединений титановых сплавов больших толщин без разделки кромок / В.Л. Руссо, Б.В. Кудояров, А.А. Николаев // Сварочное производство. — 1971. №10. -С.20-21.

28. Лашко, С. В. Пайка металлов / С.В. Лашко, Н.Ф. Лашко. М.: Машиностроение, 1988. - 376 с.

29. Прохоров, Н.Н. Расчет процессов разупрочнения термически упрочненных сплавов вследствие коагуляции твердых частиц при сварке / Н.Н. Прохоров, Н.П. Шабалина, Ф.Ф. Волков// Сварочное производство. — 1975. -№9.-С.3-5.

30. Лебедев, Б.Д. Расчетное определение твердости зоны термического влияния / Б.Д. Лебедев, О.И. Дукельская, Е.А. Дашевская // Автоматическая сварка. 1975.-№3. - С.12-13.

31. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. -М.: Машиностроение, 1975. 400 с.

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

32. Шрон, Р.З. Оценка прочности сварных соединений с учетом их механической неоднородности / Р.З.Шрон. Челябинск: Юж. Ур. Кн. изд-во,1963.- 22 с.

33. Ерофеев, В.П. Напряженно-деформированное состояние сварных соединений с щелевой разделкой кромок / В.П.Ерофеев, М.В.Шахматов // Автоматическая сварка. 1979.- №4 - С. 13-16.

34. Ерофеев, М.В. Оценка несущей способности цилиндрических толстостенных оболочек давления с кольцевой мягкой прослойкой / М.В. Ерофеев, В.В. Ерофеев, М.В. Шахматов // Известия вузов. Машиностроение. — 1993. -№1. С. 40-46.

35. Бельчук, Г.А. О приближенном расчете механических свойств свойств металла шва / Г.А. Бельчук // Сварочное производство. 1961. - №1. - С.18-22.

36. Шахматов, М.В. Прочность механически неоднородных сварных соединений / М.В. Шахматов, Д.М. Шахматов. Челябинск: ООО «Абрис-Принт». - 2008. - 223 с.

37. Степанов, Г.А. Влияние дефектов сварки на работоспособность сварных соединений из алюминиевых сплавов. Обзорная информация / Г.А. Степанов, Р.Л. Ибатуллин, А.П. Калинина и др. М.: ЦИНТИ. — Химнефтемаш. -Сер. ХМ-9, 1980.-69 с.

38. Маковецкий, В.А. Исследование напряженного состояния мягкой прослойки сварного соединения при изгибе методом фотоупругих покрытий / В.А. Маковецкий, Л.Л. Ситников // Сварочное производство.- 1970. №7 -С.9-11.

39. Кузнецов, А.И. Предельное состояние фигурной прослойки при растяжении и изгибе / А.И. Кузнецов // Сб. Научных трудов Ленинградского государственного университета: Исследования по упругости и пластичности. — 1964. — Вып. 3. — С. 15-23.

40. Халимов А. Г., Зайнуллин Р. С., Халимов А. А. Техническая диагностика и оценка ресурса аппаратов. Уфа. УГНТУ. 2001г. 408 с.

41. Название: Зайнуллин Р.С. Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости Год: 1997

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

42. Р.С. Зайнуллин, О.А. Бакши, Р.С. Абдуллин А. Г. Вахитов
ресурс нефтехимического оборудования с механической неоднородностью
Москва ОАО "Издательство "Недра" 1998

43- Учеб. пособие / В.Г. Фокин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 131 с.:
ил

					15.04.01.2017.251.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74