

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

« ____ » _____ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ М.А. Иванов

« ____ » _____ 2018 г.

Моделирование дефектов сварных соединений угловых швов при аттестации сварной
конструкции

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ)

Руководитель ВКР

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

« ____ » _____ 2018 г.

Автор ВКР

магистрант группы П-246

_____ Зарипов Артем

Раисович

« ____ » _____ 2018 г.

Нормоконтролёр

преподаватель

_____ Ю.В. Безганс

« ____ » _____ 2018 г.

Челябинск, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	
1.1 Сварные швы и соединения, их назначение, классификация и общие сведения	8
1.2 Виды разрушений	16
1.3 Дефекты в угловых швах	26
1.4 Основные представления о влиянии трещиноподобных несплошностей на прочность сварных соединений с угловыми швами.	32
1.5 Вывод по первой главе	51
2 ИСЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ В ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ РАСТЯЖЕНИЕ	
2.1 Конструкция сварного соединения	53
2.2 Создание расчётной модели	57
2.3 Проведение эксперимента на растяжение.....	62
2.4 Вывод по второй главе	76
3 ИСЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ В ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ ИЗГИБЕ	
3.1 Проведение эксперимента на изгиб.....	77
3.2 Вывод по третьей главе.....	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	90
ПРИЛОЖЕНИЯ	98

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений развития сварочного производства является повышение надежности сварных конструкций и улучшение норм их проектирования. Очень большую роль на надежность сварной конструкции оказывают дефекты которые возникают при сварке. При изготовлении сварных конструкций возможность возникновения дефектов достаточно высока. Дефекты в сварном шве играют роль концентраторов при нагружении сварной конструкции. Чаще всего разрушение сварных соединений происходит по сечению в котором имеются дефекты сварки. В данное время установлены очень жесткие нормы на возможные дефекты, размеры которых, зачастую, выбраны как минимально возможные. За частую как показывает практика по эксплуатации сварных конструкций, наличие недопустимых дефектов по ГОСТу не всегда являются очагом максимальных напряжений. Во внимание всегда нужно брать факторы от которых зависит напряжения в сварной конструкции, такие как геометрия формы шва, размеры дефектов, предел текучести металла шва и основного металла. Так дефекты зачастую бывают трудно выявляемыми после проведение контроля, даже если такие дефекты обнаружены их устранение влечет за собой большую затрату времени и денег. Чаще всего такими дефектами являются внутренние дефекты которые не выходят на поверхность сварного шва (трещиноподобные дефекты такие как поры, подрезы и непровары). Кроме дефектов на прочность сварных конструкций влияет механическая неоднородность. На основе этого были сформулированы задачи для данной работы: изучить существующие методы оценки влияния трещиноподобных дефектов на прочность сварных соединений с угловыми швами. Моделирование и качественная оценка прочности сварного соединения с угловыми швами. Механическая неоднородность в определенной степени присуща всем сварным и паяным соединениям. Она появляется из-за различия свойств основного и присадочного металлов, различия в термических циклах. Участки соединений, где механические свойства примерно одинаковы, располагаются параллельно оси шва в виде прослоек. Свойства металла шва в значительной степени зависят от

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

химического состава и свойств присадочного металла, а также режимов сварки, определяющих долю участия металла присадки в основном металле. В околошовной зоне материал претерпевает структурные превращения и у ряда сталей может иметь повышенную твердость и прочность. Зона термического влияния – зона высокого отпуска, у термически обработанных сталей металл в данном месте характеризуется пониженной прочностью и твердостью в результате сварочного нагрева. Основной металл, нагревавшийся до более низких температур, по-разному меняет свои свойства, в зависимости от марки стали или сплава. На основе этого были сформулированы задачи для данной работы: изучить существующие методы оценки влияния трещиноподобных дефектов на прочность сварных соединений с угловыми швами. Моделирование и качественная оценка прочности сварного соединения с угловыми швами, и оценка механической неоднородности.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Сварные швы и соединения, их назначение, классификация и общие сведения.

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



Рисунок 1.1 – Угловые соединения

Тавровые соединения это соединения, в котором к боковой поверхности одного элемента примыкает под углом и приварен торцом другой элемент. (Рисунок 1.2)

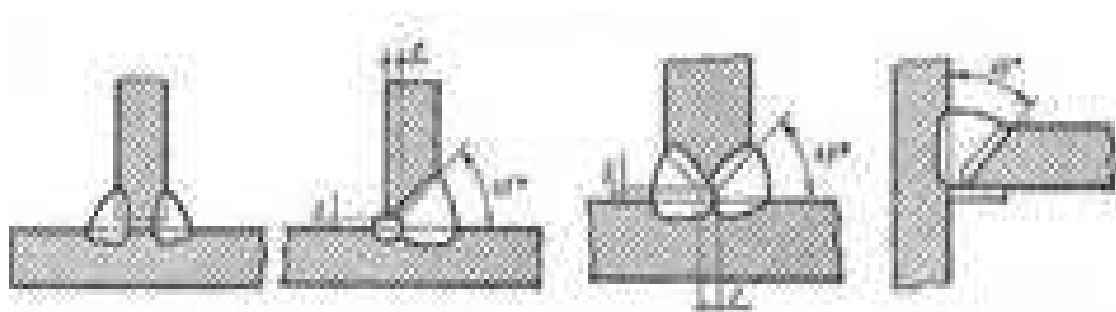


Рисунок 1.2 – Тавровые соединения

Нахлесточное сварное соединение это соединение, в котором сваренные элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга. (Рисунок 1.3)

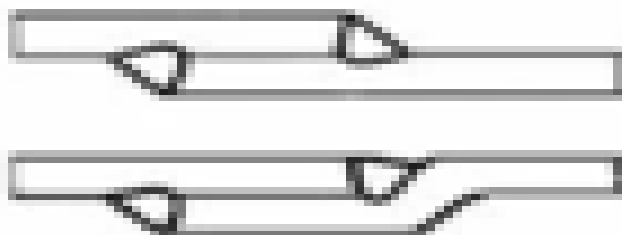


Рисунок 1.3 – Нахлесточные соединения

Торцовое соединение это соединение, при котором угол между поверхностями двух деталей в месте примыкания кромок составляет от 0° до 30° . (Рисунок 1.4)

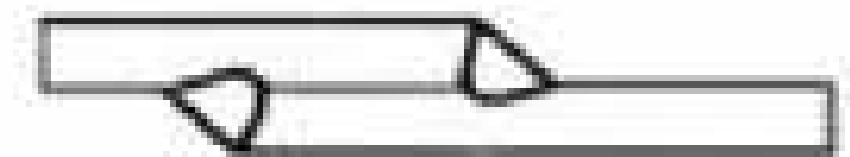


Рисунок 1.4 – Торцовое соединение

Все выше представленные соединения могут быть сварены угловыми швами.

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.

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

По типу сварные швы разделяются на угловые и стыковые. Разновидностями этих сварных швов являются пробочные и прорезные швы.

Угловой шов это сварной шов углового, нахлесточного или таврового соединений.

Основными геометрическими характеристиками углового шва являются (Рисунок 1.5):

q - Выпуклость шва, определяемая расстоянием между плоскостью, проходящей через видимые линии границы сварного шва с основным металлом и поверхностью сварного шва, измеренным в месте наибольшей выпуклости. Для угловых швов более благоприятна вогнутая форма поверхности шва с плавным переходом к основному металлу.

k - Катет углового шва, кратчайшее расстояние от поверхности одной из свариваемых частей до границы углового шва на поверхности второй свариваемой части.

r - Расчетная высота углового шва, длина перпендикуляра, опущенного из точки максимального проплавления в месте сопряжения свариваемых частей на

гипотенузу наибольшего вписанного во внешнюю часть углового шва прямоугольного треугольника

а - Толщина углового шва, наибольшее расстояние от поверхности углового шва до точки максимального противления основного металла.

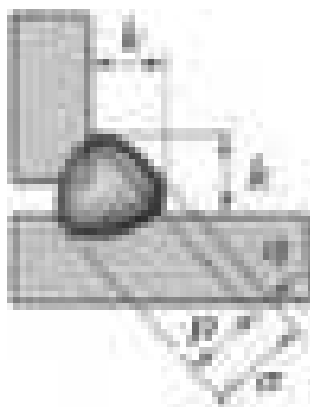


Рисунок 1.5 – Геометрические параметры сварного углового шва

В зависимости от протяженности сварные швы могут различаться, стыковые швы чаще всего делают непрерывными, а угловые швы могут быть выполнены пятью способами

- непрерывными (Рисунок 1.6, а);
- односторонними прерывистыми (Рисунок 1.6, б);
- двусторонними цепными (Рисунок 1.6, в);
- двусторонними шахматными (Рисунок 1.6, г);
- точечными. (Рисунок 1.6, д)

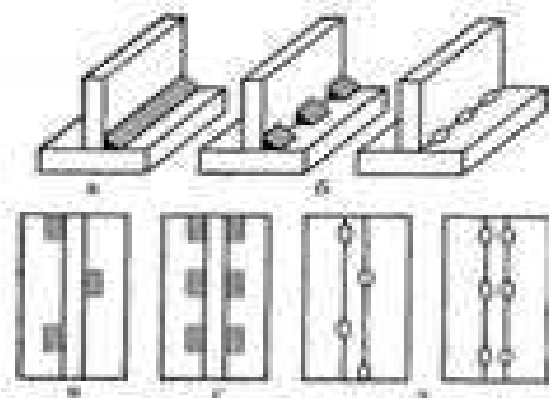


Рисунок 1.6 – Угловые швы тавровых соединений

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 1.7). 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.

МКЭ (метод конечных элементов) используется при выполнении проверочного расчета. Для проведения необходимо знать геометрию соединения и приблизительные линейные размеры. С этой целью в качестве первого приближения для выполнения расчета можно использовать традиционные методы расчета, реализованные в системе АРМ 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.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

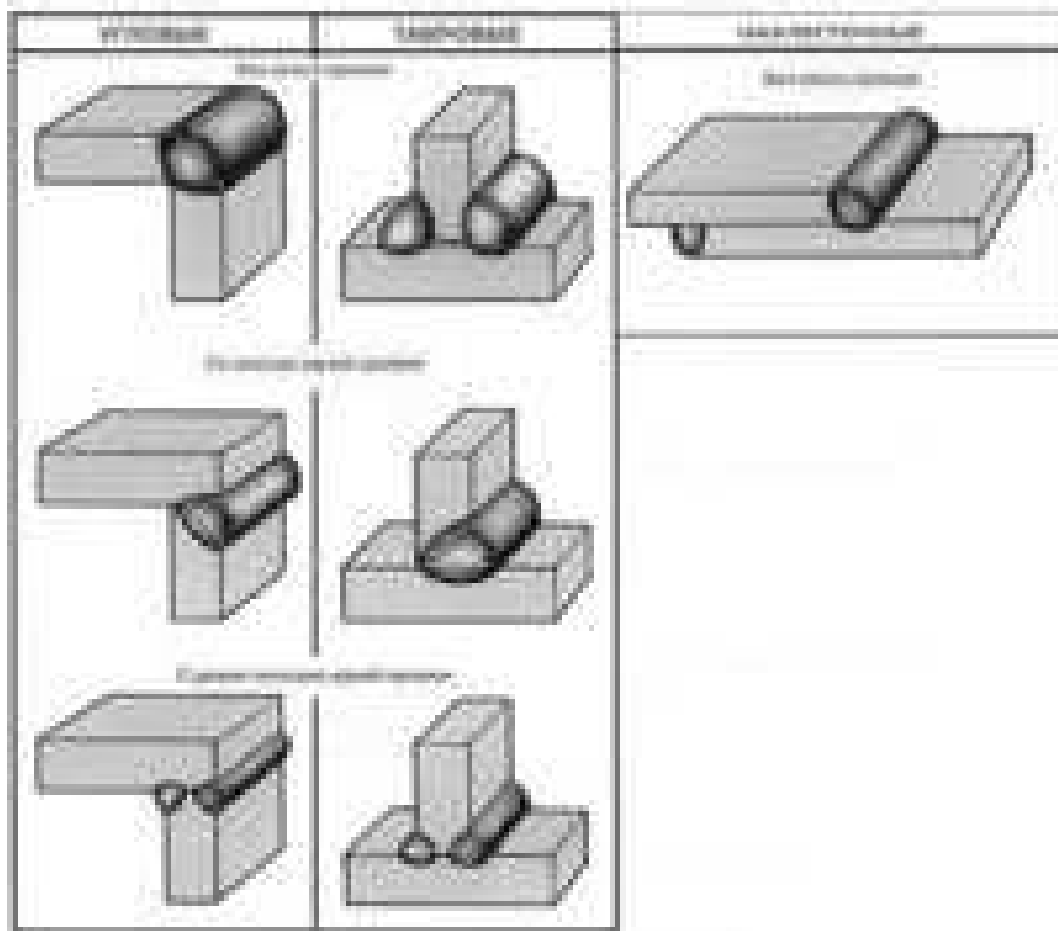


Рисунок 1.7 – Типы сварных соединений с угловыми швами

Для каждого конкретного случая создания сварного шва подбирается свой тип соединения, учитывающий необходимые параметры прочности и конструктивные особенности изделия. Тавровое сварное соединение активно используется при создании металлоконструкций, где комплектующие должны соприкасаться под прямым углом. Главной особенностью данной разновидности является то, что детали соединяются в форме буквы «Т», где одна часть располагается перпендикулярно другой. Площадь такого соприкосновения, как правило, становится не очень большой, поэтому приходится конструктивно усиливать изделия и обваривать соединение с нескольких сторон.

Тавровые соединения сварных швов обладают хорошей прочностью, но если на этот участок планируется высокий уровень нагрузки, то следует сделать так, чтобы второй конец детали, отходящей по перпендикуляру от основной части,

также был приварен к основе. Это поможет зафиксировать все и избежать деформации.

Благодаря своей распространенности встречаются разные классификации тавровых сварных соединений по ГОСТ. Это зависит от особенностей их исполнения, но сама суть от этого никак не меняется. Они в любом случае остаются обыкновенными перпендикулярно расположенными друг к другу сваренными деталями. Выделяют следующие разновидности классификаций:

- Сварной шов Т1 по ГОСТ 5264 80 относится к классификации сварных соединений, которые выполнены при помощи ручной дуговой сварки;
- По ГОСТ 14771-76 классифицируются швы, которые были сделаны при помощи сварки в защитных газах;
- ГОСТ 14806-80 включает в себя соединения без скоса кромок, которые также создавались в защитных газах.

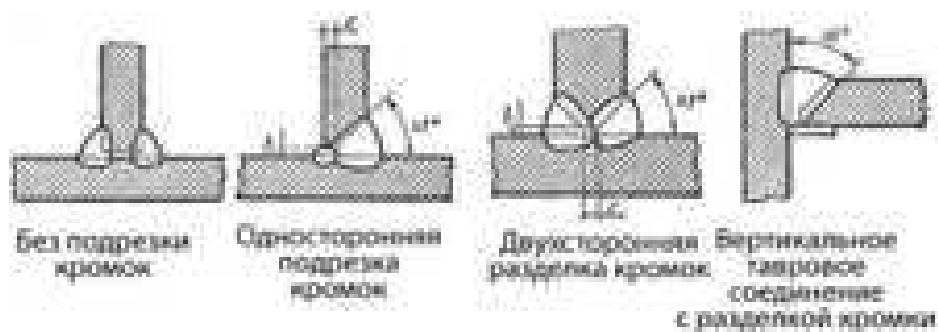


Рисунок 1.8 – Типы тавровых соединений

Тавровые соединения применяют во многих областях. Их применяют в машиностроении, в автомобилестроении, в различных конструкциях (фермы, опоры, колонны, стойки), мосты и путепроводы, металлическая мебель, газопроводы, нефтепроводы, системы водоснабжения, теплоснабжения зданий и сооружений. Тавровые соединения широко применяются как в профессиональной

деятельности, так и в бытовой деятельности, потому что даже со средним опытом сможет сделать вполне качественное соединение.

Тавровое соединение самое распространенное, одно из самых прочных. Данное соединение позволяет получать изделия и конструкции сложной формы. Расположение деталей буквой «Г» обеспечивает дополнительную жесткость конструкции. Качественно выполненная работа гарантирует практичность и надежность. Как у любого другого соединения здесь есть набор положительных моментов, которые делают его более востребованным в определенных областях. К основным преимуществам соединения относятся следующие:

- Позволяет обеспечивать соединение в труднодоступных местах, которое невозможно было бы выполнить другими способами;
- Есть возможность обварить участок соприкосновения с двух сторон, что повысит прочность;
- Может применяться для соединения как толстых, так и тонких деталей;
- Не нужно использовать дополнительные накладки, так как при наличии надежной фиксации шов можно сделать просто встык;
- Конструкция выдерживает достаточно большие нагрузки после обработки такими соединениями.

Здесь есть и специфические недостатки, которые затрудняют применение швов в определенных областях. К ним относятся:

- Сложность выполнения соединения, так как привариваемую деталь нужно зафиксировать, прежде чем сваривать (если это будет сделано недостаточно надежно, то геометрия конструкции будет нарушена);
- При сваривании детали с одной стороны соединения получается не очень надежным, так как воздействие на противоположную сторону действует как рычаг для излома шва;
- Очень тонкие детали становится сложно сваривать из-за неудобства и высокого риска деформации, особенно при двустороннем шве;

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

- Малая площадь соприкосновения не всегда позволяет обеспечить надежность соединения;

Тавровое соединение позволяет без проблем соединять детали различной толщины, так как при соединении одна деталь служит ровной плоской поверхностью, и ее толщина не имеет особого значения. Но при сваривании все же есть небольшие особенности, приваривается большая часть к меньшей или наоборот. Если приваривается более мелкая деталь, то при сваривании нужно держать электрод под углом в 60 градусов. Если наоборот, то нужно сделать так, чтобы основная масса углубления шла в более толстую часть, поэтому электрод должен находиться под углом более 60 градусов.

Если конструкцию можно поворачивать, то лучше закрепить детали при помощи прихваток и наклонить конструкцию, чтобы сварка шла в нижнем положении «в лодочку» (Рисунок 1.9). Это существенно повысит качество соединения, так что с ним теперь может справиться сварщик даже начальной квалификации.

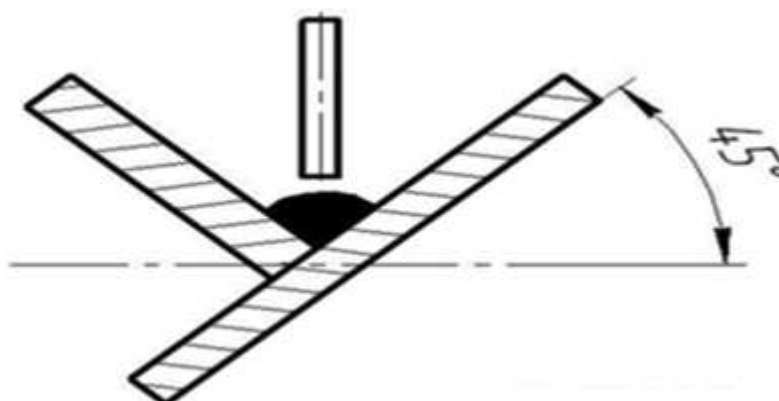


Рисунок 1.9 – Сварка «в лодочку»

Для данной работы мы выбираем тавровое соединение с угловыми швами потому что, тавровое соединение является самым распространённым соединением с угловыми швами во многих сферах деятельности, где используют сварные соединения. Все плюсы такого соединения указаны выше по тексту.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

1.2 Виды разрушений

Разрушение металлов бывает пластичное (вязкое) и хрупкое. Особенностью вязкого(пластичного) разрушения является большая предшествующая пластическая деформация, составляющая десятки и даже сотни процентов относительно поперечного сужения или удлинения. Высокопластичные материалы разрушаются путем среза (соскальзывания) под действием максимальных касательных напряжений (Рисунок 1.10 а), менее пластичные получают разрушение типа «конус-чашечка» (Рисунок 1.10 б). Излом имеет матовый оттенок и волокнистый характер. Пластичное разрушение требует затрат большого количества энергии, поэтому при эксплуатации конструкций случается сравнительно редко.

Хрупкое разрушение происходит при действии средних напряжений, не превышающих предела текучести и не сопровождается заметной пластической макродеформацией. Траектория разрушения близка к прямолинейной, излом нормален к поверхности и имеет кристаллический характер. Хрупкое разрушение, как правило, внутрикристаллическое. Разрушение происходит под действием нормальных напряжений и распространяется вдоль наименее упакованной кристаллографической плоскости, называемой плоскостью скола (отрыва). Хрупкое разрушение при некоторых условиях бывает межкристаллитным (например, при водородной хрупкости). Часто происходит внезапно и распространяется с большой скоростью с малыми затратами энергии. В некоторых случаях оно приводит к катастрофическим разрушениям сварных конструкций в процессе эксплуатации.

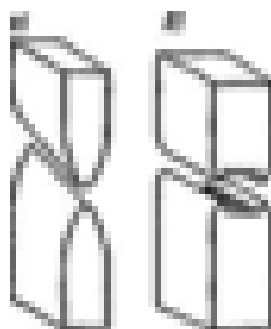


Рисунок 1.10 – Вид пластического разрушения

При наличии острых концентраторов напряжений возникает хрупкие разрушения сварных конструкций, расположенных поперек поля высоких местных растягивающих напряжений. При определенной температуре металл вблизи надреза переходит в хрупкое состояние. Низколегированные стали обладают заметно более высокой склонностью к хрупкому разрушению по сравнению с обычными малоуглеродистыми конструкционными сталями. Также замечено, что элементы больших сечений в большей степени подвержены хрупким разрушениям чем более тонкие. Пластические деформации при сварке, правке, перегрузке конструкции могут значительно увеличить хрупкость металла. Известно, что с понижением температуры как для основного металла, так и для сварных соединений предел текучести, предел пропорциональности, сопротивлению разрыву, твердость, предел усталости повышаются, а остаточное удлинение, поперечное сужение и ударная вязкость повышаются. [1]

Источниками хрупкого разрушения сварных конструкций являются, как правило, различного рода концентраторы напряжений типа трещин. В этой связи большое значение приобретают показатели, характеризующие способность материала препятствовать стабильному и нестабильному распространению трещин. [2] Опасность хрупкого разрушения сварных конструкций возникает в тех случаях, когда в швах образовались очаги хрупкого состояния металла. Факторы, порождающие очаги хрупкого состояния в сварных швах, следующие. [3]

Усталость металла в зоне концентраторов напряжений является распространенной причиной для начало хрупкого разрушения сварных соединений. Для сварных соединений в общем характерны более резкие конструктивные очертания, чем, для литых или для конструкций, которые получены путем механической обработки. В вязком металле образовавшиеся усталостные трещины, распространяются медленно. При низких температурах, когда сталь обладает большей хрупкостью, усталостное разрушение, возникшее от концентратора, может распространиться как хрупкое на значительные расстояния. [4] К хрупким разрушениям сварных соединений приводит образование остаточных напряжений. Вопросы о хрупких разрушениях является

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

одним из наиболее трудны на сегодняшний день. В практике эксплуатации наблюдаются хрупкие разрушения при статических нагрузках. Нередко разрушения происходили при относительно невысоких напряжениях, значительно меньших не только предела текучести, но и допустимых величин.

Надежные методы для определения сопротивляемости к хрупким разрушениям сварных конструкций в процессе эксплуатации еще не отработаны. Процессы, которые происходят в металле сварных соединений, могут привести к хрупким разрушениям. При эксплуатации ответственных металлических конструкций было выявлено, что изготовление сварных узлов в этих конструкциях не имеющие трещин еще не являются гарантией что опасность хрупкого разрушения материалов при работе в условиях сложного напряженного состояния и низких температур исчезнет. [5,6,7] Отрицательное влияние наплава на пластические свойства металла шва аустенитной стали может иметь своим следствием хрупкое разрушение сварных конструкций в процессе гибки, штамповки, прессования. Из-за этого затруднено изготовление фасонных сварных деталей и узлов из аустенитных сталей. [8] При выборе критерия количественной оценки склонности сварных соединений к локальным разрушениям стоит обратить внимание на общие положения теории хрупких разрушений сварных конструкций. Сигма-фаза, вызывает резкое снижение пластических свойств аустенитных сварных швов и может явиться причиной хрупкого разрушения сварных соединений из жаропрочных и окалиностойких сталей. [8,9]

В большом числе случаев надлежащее конструктивное оформление сварных соединений, высокое качество наплавленного металла и технологического процесса сварки могут обеспечивают отсутствие хрупких разрушений сварных конструкций. Современные технологические процессы позволяют получать высокую ударную вязкость металла шва и околошовных зон. В некоторых случаях это достигается дополнительной нормализацией и высоким отпуском сварных конструкций. [4]

При квазихрупкое разрушение предполагается наличие пластической зоны в сварном соединении, которая находится перед краями трещин и наклепанного

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

материала у поверхности трещины. [10] При средних критических напряжениях ниже предела текучести материала шва, квазихрупкие разрушения возможны только при его низкой пластичности. Относительные значения критической интенсивности деформации при этом $\varepsilon_i^{кр} / r_T^1 < 25$, а абсолютные значения $\varepsilon_i^{кр} \leq 3 \dots 5\%$ такие значения характерны для весьма охрупченных сварных швов и является не допустимым.

Пластическая зона значительно больше по величине, чем объем тела находится при этом в упругом состоянии. Предельный случай квазихрупкого разрушение представляет собой пластические деформации в макрообъемах материала, которые ведут к разрушению, становятся очень незначительными - роль ослабления сил сцепления из-за разрыхления сводится к минимуму и можно полагать, что разрушение есть результат действия нормальных напряжений растяжения.

Квазихрупкое разрушение предполагает наличие локальной зоны пластической деформации (пластической зоны) перед краем трещины и наклепанного материала у поверхности трещины. Остальной, и значительно больший по величине, объем тела находится при этом в упругом состоянии. [10,11,12,13] Теория квазихрупкого разрушения принадлежит к числу простейших феноменологических теорий разрушения.

Теория является простой и не следует ожидать от неё универсальности. Она нуждается в развитии так как разрушение различных материалов, находящихся в различных условиях, бывает далеко не всегда квазихрупким. [14] При квазихрупком разрушении в местах с высоким уровнем концентрации напряжений стальных образцов или элементов конструкций, эти напряжения вызваны технологическим или конструктивным надрезом. Шевронный узор заметен на поверхности излома, схема шевронного узора показана на рисунке 1.10. По шевронный узору видно, что движение трещин при разрушении идет с чередованием хрупкого и вязкого разрушений. Вершина этого узора всегда покажет на очаг разрушения. Спускаясь от очага разрушения, можно легко проследить путь магистральной трещины и разрушения которые происходят при

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

ее движении; расстояние между ветвями которые видны на узор косвенно характеризует скорость развития трещины. За частую, при существенном снижении температуры и повышении скорости приложения нагрузки шевронный узор становится менее отчетливым и происходит замена квазихрупкое разрушение на хрупкое разрушение с однородной кристаллической поверхностью излома. Стадия медленного развития трещины существенно сокращается при квазихрупком разрушении. При достижении вязкой трещиной критического размера происходит спонтанное распространение трещины, характеризующееся значительным снижением сопутствующей пластической деформации и работы разрушения. [15,16]

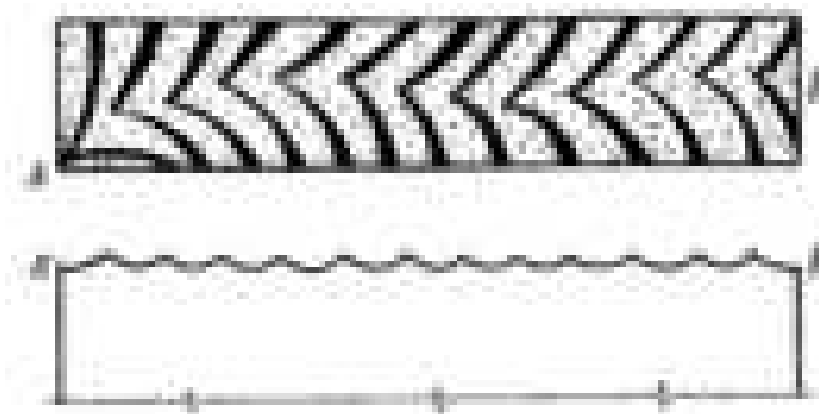


Рисунок 1.11 – Схема шевронного узора на поверхности излома

Согласно работе [17] растянутая площадь с одной трещиной выглядит так как показано на рисунке 1.12. В схеме квазихрупкого разрушения (Орван,Ирвин) принимается , что зона нелинейных эффектов мала по сравнению с длиной трещины . это позволяет считать , что и размер данной зоны , и интенсивности пластической деформации в ней циклом контролируется коэффициентов интенсивности напряжений , пределом текучести и коэффициентом упрочнения , а после напряжения вокруг пластической области описываться асимптотическими формулами. [12]

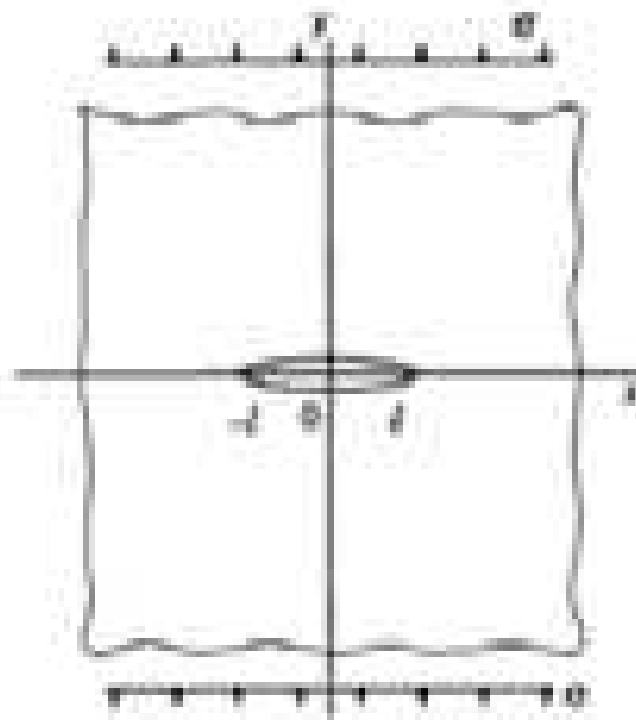


Рисунок 1.12 – Растянутая площадь с одной трещиной

Для оценки квазихрупкого разрушения сварных соединений с концентратором при ненулевом радиусе вершины в работе Винокурова В.Н. предложен критический коэффициент интенсивности деформации V_C (аналог K_C) (1). Этот параметр определяется в момент наступления разрушения и отражает пластические свойства и остроту в вершине концентратора

$$V = \varepsilon_{max} * \sqrt{p} = \varepsilon_{cp} * K_\varepsilon * \sqrt{p} \quad (1)$$

Представления о квазихрупком разрушении значительно расширили область применения теории распространения трещин и послужили толчком к новым исследованиям в этом направлении.

Вязкое разрушение наступает после того, как будет превзойден предел упругости (текучести). В обязательном порядке сопровождается пластической деформацией. При ползучести вязкое разрушение будет происходить при высоких уровнях нагрузок. Снижение нагрузок приводит к развитию меж-зеренного разрушения. Разрушение может происходить по двум типам в зависимости от уровня температур и напряжений разрушение - образование клиновидных трещин

или образование пор. При таком поверхность излома имеет характерную волокнистость и матовую. Длительное действие постоянных нагрузок при изменении температуры, что наблюдается при работе компрессорных станций с охлаждением газа в аппаратах воздушного охлаждения, или неоднократного изменения давления, что возможно при работе нефтепроводов и нефтепродуктопроводов, может вызвать замедленное (усталостное) разрушение. В отдельных случаях замедленное разрушение характеризуется взрывным окончанием процесса. Замедленное разрушение проходит вдоль направления волокон. [18,19,20] Из книги [21] Вязкое разрушение обусловлено малой скоростью распространения трещины. Скорость распространения хрупкой трещины весьма велика. Для стали скорость роста трещины достигает 2500 м / с. Поэтому нередко хрупкое разрушение называют внезапным, или катастрофическим, разрушением.

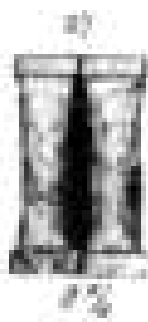


Рисунок 1.13 – Излом стали, а-количество хрупкой составляющей, б-микрофотограмма

Вязкое разрушение, реализуется как правило при напряжениях, больших предела текучести ст. В результате сдвиговых деформаций по плоскостям,

которые направлены под углом, близким к 45° относительно направления действия максимальных главных напряжений. [22] Вязкое разрушение обусловлено малой скоростью распространения трещины. Характерно для поликристаллических материалов при невысоких температурах и больших скоростях деформирования. В условиях однородного линейного напряженного состояния возникают, как правило, при однократных статических испытаниях на растяжение лабораторных цилиндрических или плоских образцов. В соответствии с действующими стандартами при этом определяют характеристики механических свойств. Вязкое разрушение хорошо изучено многими исследователями с помощью опытов по одноосному растяжению. Исследование образцов на разной стадии деформации после образования так называемой шейки показало, что микротрещины образуются в местах расположения посторонних включений в материале. Общее направление развитой трещины относительно образца - поперечное, с зигзагообразным профилем, соответствующим линиям максимальных напряжений сдвига. У краев образца трещина развивается в направлении линий максимальных напряжений сдвига, что приводит к появлению характерного вида излома, похожего на усеченный конус. [21,23,24,25]

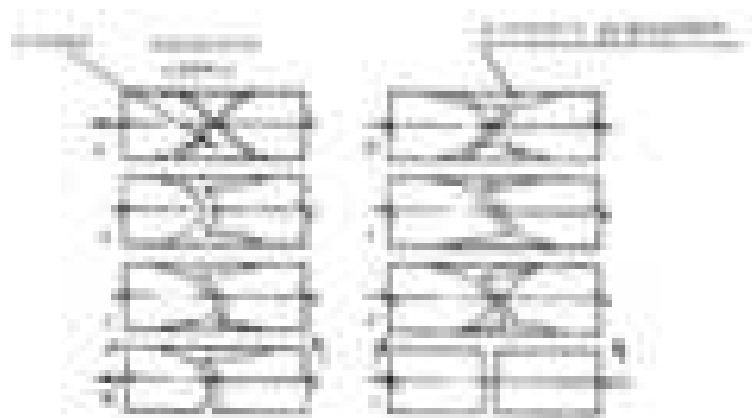


Рисунок 1.14 – Вязкое разрушение

Вязкое разрушение, как правило, реализуется при напряжениях, больших предела текучести в результате развития деформаций сдвига, сопровождаемых значительным (более 15 %) утончением кромок разрыва. Плоскость вязкого разрушения обычно совпадает с плоскостью действия максимальных касательных напряжений. В отличие от хрупкого разрушения, вязкое разрушение менее

опасно, поскольку его начальные стадии бывают хорошо заметны визуально. Например, при вязком разрушении какого-либо сосуда под давлением P в нем появляются выпучины. [26,27]

Соответственно основным видам нагружений сварных соединений существующие виды разрушений можно классифицировать как разрушения при статическом нагружении и разрушения при циклическом нагружении (усталостные). Механизм разрушения, в зависимости от уровня приложенных нагрузок, габаритных размеров и свойств материалов, при статическом нагружении может протекать вязко, хрупко или квазихрупко.

1. В случае если основной и наплавленный металлы имеют достаточно высокую пластичность, то влияние трещиноподобного дефекта сварного соединения становится малозначительными в связи с релаксацией напряжений в его вершине. То в этом сварном соединении будет вязкое разрушение, преимущественно под действием касательных

напряжений. Признаки вязкого разрушения:

- разрушающие напряжения выше предела текучести ($\sigma_p > \sigma_T$);
- как следствие, разрушению предшествуют значительные пластические деформации.

Наиболее удобно в данном случае прочностные расчеты вести по допускаемым напряжениям, основываясь на определении номинальных напряжений в опасном сечении.

2. Хрупкий механизм в конструкциях с трещиноподобными дефектами реализуется при общем уровне разрушающих напряжений в несколько раз ниже предела текучести ($\sigma_p < \sigma_T$) до наступления заметной вязкой деформации в швах. При этом соединение разрушается преимущественно под действием нормальных напряжений (отрыв). Напряженное состояние в опасном сечении – плоская деформация. Предельное состояние при таком разрушении может определяться как вершиной трещиноподобной несплошности, так и несовершенством геометрической формы соединения. Данный вид разрушения в условиях статического нагружения может иметь место при работе конструкции в условиях

										Лист
										24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2018.207.00 ПЗ					

пониженных температурах, при наличии сварных соединений массивных деталей, при использовании материалов повышенной прочности, а также при наличии остrokонечных дефектов. Расчеты на хрупкую прочность, зачастую, ведутся по критериям линейной механики разрушения.

3. Квазихрупкое разрушение также происходит под действием напряжений отрыва, но после более или менее значительной пластической деформации в зоне очага разрушения при сохраняющейся неоднородности напряженного состояния в опасном сечении. Это достаточно распространенный механизм разрушения сварных соединений. Для оценки несущей способности в таких случаях целесообразно применять критерии нелинейной механики разрушения. Отдельную и достаточно обширную группу разрушений представляют собой разрушения от переменных нагрузок. При этом, в зависимости от количества циклов нагружений N в процессе эксплуатации соединений различают разрушения:

- от малоцикловых (повторно-статических) нагрузок (для стальных конструкций N в процессе эксплуатации находится в пределах от 10^3 до $10^4 \dots 10^5$).
- 2) от циклических нагрузок или усталостное разрушение (для стальных конструкций $N \geq 10^5$).

При малоцикловом нагружении с постоянной амплитудой напряжений (мягкое нагружение) наблюдается два типа разрушений:

- от усталости при небольших пластических деформациях
- носящий квазистатический характер при больших пластических деформациях.

Второй тип имеет место преимущественно у материалов, разупрочняющихся при циклических нагрузках и склонных к накоплению пластических деформаций. В условиях жесткого нагружения разрушения имеют только усталостный характер [28]. Причем переход от квазистатических разрушений к усталостным, как правило, сопровождается сменой места разрушения. Усталостные (циклические) разрушения, как правило, возникают в результате инициирования усталостных трещин и последующего их распространения до

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

критических размеров, определяемых условиями эксплуатации и материалом сварного соединения [29, 30]. На уровень разрушающих нагрузок здесь влияют следующие факторы: концентрация напряжений, материал соединения, состояние поверхности, масштабный фактор, наличие остаточных напряжений, а также частота и характер изменения нагрузок во времени.

Учитывая вышесказанное, необходимо отметить, что существующее понимание статичности нагрузок весьма условно. Зачастую, к статически нагруженным относят сварные конструкции, испытывающие в процессе эксплуатации до 10²...10³ циклов. В этом смысле иногда более корректно применять понятие квазистатического нагружения.

Расчеты сварных соединений, испытывающих квазистатические нагрузки, как правило, ведутся по методикам, применяемым для статически нагруженных конструкций и узлов. Поэтому далее по тексту под статическими нагружениями также следует понимать и квазистатические. Расчеты на прочность при переменных нагрузках с предусмотренными несплошностями обычно связаны с оценками ожидаемой долговечности при заданном уровне нагружения и геометрических размерах соединения. С определением предельной несущей способности соединения, исходя из требуемой его долговечности при заданных геометрических размерах, а также с установлением требуемых размеров сварного соединения, обеспечивающих необходимую несущую способность и долговечность сварного соединения. Классические подходы расчета циклической прочности основаны на номинальных напряжениях с использованием сведений по кривым усталости для рассматриваемых классов соединений.

1.3 Дефекты в угловых швах

Трещиноподобные плоскостные дефекты (поры, непровары, подрезы) являются основными дефектами сварной конструкции с угловыми швами [31-34 и др.]

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

В силу достаточной сложности технологического процесса причинами нарушения сплошности металла шва во время сварки могут являться различные факторы технологического, металлургического и организационного характера.

Поскольку в отношении дефектов сварных соединений можно говорить об определенной их неизбежности, в соответствующих нормативных документах установлены допуски на максимальный размер дефектов для различных конструкций. Однако в действительности при диагностическом обследовании уже эксплуатируемых объектов нередко случаи выявления в металле сварного шва несплошностей размерами выше нормативно допустимых. Если данный, формально недопустимый, дефект в силу ряда причин является трудно или дорого устранимым, то весьма актуальным становится вопрос оценки фактической прочности такого сварного соединения.

Для оценки опасности непроваров и подрезов как плоскостных (трещиноподобных) дефектов целесообразно применить метод, использующий аппарат механики разрушения

Таблица 1.1 – Выбор метода обоснования норм допустимости дефектов в зависимости от типов и видов дефектов

Типы дефектов	Виды дефектов	Метод обоснования норм допустимости дефектов
Плоскостные	Непровары, подрезы	Метод, использующий аппарат механики разрушения; метод прямого эксперимента; метод тензометрирования; метод использования апробированных норм
Объемные	Поры	Метод концентрации напряжений; метод прямого эксперимента; метод тензометрирования; метод использования апробированных норм
Сложной формы	Шлаковые включения, свищи, кратеры, прожоги, наплывы	Метод прямого эксперимента; метод тензометрирования; метод использования апробированных норм

Таблица 1.2 – Оценка допустимости пор


Тип шва	Диаметр (длина) поры $d_n = x_n$, мм	Вероятность			Доля брака
		χ	φ_n	П	
Угловой	$d_n = 1,0$	0,18	0,47	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
	$d_n = 1,5$		0,29		$2,1 \cdot 10^{-5}$
	$d_n = 2,0$		0,13		$9,2 \cdot 10^{-6}$
	$d_n = 2,5$		0,03		$2,1 \cdot 10^{-6}$
	Недопустимы цепочки пор	0,36	-	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$

Вероятность потери сварным соединением работоспособности П и ожидаемой доли брака Б для вышеприведенных норм допустимости пор соответствует принятым нормативным значениям: $П < 10^{-5} - 10^{-4}$ и $Б \leq 3 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$. Следует отметить, что угловые деформации и смещения кромок, в том числе и допустимые по ГОСТ 5264-60, ГОСТ 8713-79 и ГОСТ 14771-76, приводят к резкому увеличению концентрации напряжений, вызываемой формой шва, и, следовательно, к уменьшению опасности дефектов.

Таблица 1.3 – Трещиноподобные дефекты [35]

Виды дефектов	Периодичность появления	Методы контроля	Допустимость и недопустимость	Факторы, способствующие появлению дефекта	Методы устранения
Подрезы 	Наиболее распространенный дефект при сварке угловых швов таврового соединения	бываются в основном при визуальном измерительном контроле и капиллярной дефектоскопии, но также могут быть	Могут быть допустимы в зависимости от условий эксплуатации	значительной силы ток и повышенное напряжение дуги; неудобное пространственное положение при сварке; небрежность сварщика.	Зачистить, заварить тонким вальковым швом

Продолжение таблицы – 1.3

		выявлены и другими методами неразрушающего контроля такими как рентгенографический контроль, и ультразвуковой контроль.	Конструкции, регламентируется ГОСТом		
<p>Поры</p> 	<p>Поры являются таким дефектом, который присутствует практически во всех сварных соединениях. Самый часто встречаемый дефект сварного соединения</p>	<p>внешний осмотр, осмотр излома шва; рентгено-и гаммаконтроль, контроль ультразвуком, магнитографический метод контроля и др.</p>	<p>Могут быть допущены в зависимости от условий эксплуатации конструкции, регламентируется ГОСТом</p>	<p>Равномерная пористость возникает при постоянно действующих факторах: загрязненности основного металла по свариваемым поверхностям (ржавчина, масло и т.п.), непостоянной толщине покрытия электродов и т.д. Скопление пор наблюдается при местных загрязнениях, а также при нарушении</p>	<p>Удалить скопление пор, зачистить, подварить. Уплотнить проковкой в процессе сварки</p>

Продолжение таблицы – 1.3

				<p>сплошности покрытия электрода, сварке в начале шва, обрыве дуги или случайных изменениях ее длины. Цепочки пор образуются в условиях, когда газообразные продукты прорываются в металл по оси шва на всем его протяжении (при сварке по ржавчине, подсосе воздуха через зазор между кромками, подварке корня шва некачественными электродами). Одиночные поры возникают за счет действия случайных факторов (колебания напряжения в сети и т.д.).</p>	
--	--	--	--	--	--


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2018.207.00 ПЗ

Лист

30

Окончание Таблицы – 1.3

<p>Непровары</p> 	<p>Не часто встречаемый дефект</p>	<p>методами неразрушающего контроля, такими как ультразвуковой контроль, рентгенографический контроль и другими.</p>	<p>Относятся к недопустимым дефектам и при этом снижают эксплуатационную надежность изделия.</p>	<p>Плохая зачистка кромок свариваемых деталей от загрязнений; магнитное дутьё, особенно при сварке на постоянном токе; электроды из легкоплавких материалов; чрезмерная скорость сварки; значительное смещение электрода в сторону одной из свариваемых кромок; неудовлетворительное качество основного металла, сварочной проволоки, флюсов, электродов и т.д.; плохая работа сварочного оборудования в процессе сварки; низкая квалификация сварщиков.</p>	<p>Полностью удаляют, зачищают и подваривают</p>
--	------------------------------------	--	--	--	--

1.4 Основные представления о влиянии трещиноподобных несплошностей на прочность сварных соединений с угловыми швами.

Существующая методика расчёта на прочность тавровых соединений с угловыми швами разработаны в основном для равнокатетных швов, то есть для частного случая их геометрической формы. Последнее значительно ограничивает использование предлагаемых расчётов методик и не позволяет провести оптимизацию геометрических параметров рассматриваемых соединений с точки зрения обеспечения их максимальной несущей способности при заданном объеме наплавленного металла. [36] В работе [36] можно увидеть комбинированные методики оценки несущей способности угловых швов в условиях вязкого разрушения и их сопротивляемости квазихрупким и хрупким разрушениям с учетом локальных пластических деформаций в окрестности места сопряжения и величины радиуса последнего.

Описание действующих конструкций в которых при диагностическом обследовании обнаружены не допустимы дефекты [37,38,39] Если данный , не допустимый дефект является трудно устранимым по ряду причин то весьма актуальным становится вопрос оценки фактической прочности сварного соединения [40-45] .Работа [46] посвящена реальным расчётом на допустимость и не допустимость дефектов в сварном шве эксплуатирующийся сварных конструкциях. Численное моделирование поведения сварных образцов, содержащих несплошность в виде поры или шлакового включения, при критических нагрузках показало, что данный тип дефектов в нагруженной конструкции не является острым концентратором разрушающих напряжений, а картина НДС в ослабленном сечении имеет вид, характерный для детали с гладким вырезом. В зависимости от величины коэффициента концентрации напряжений и механических характеристик металла сварных соединений на основе соотношений механики разрушения предложена методика расчёта несущей способности угловых сварных соединений закладных изделий арматуры железобетона. [4]

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

Расчёт на прочность угловых фланговых и лобовых швов проводится на срез по сечению, проходящему через биссектрису прямого угла (Рисунок 1.15)
Площадь расчётного сечения принимают (2)

$$F=0.7k_p l \quad (2)$$

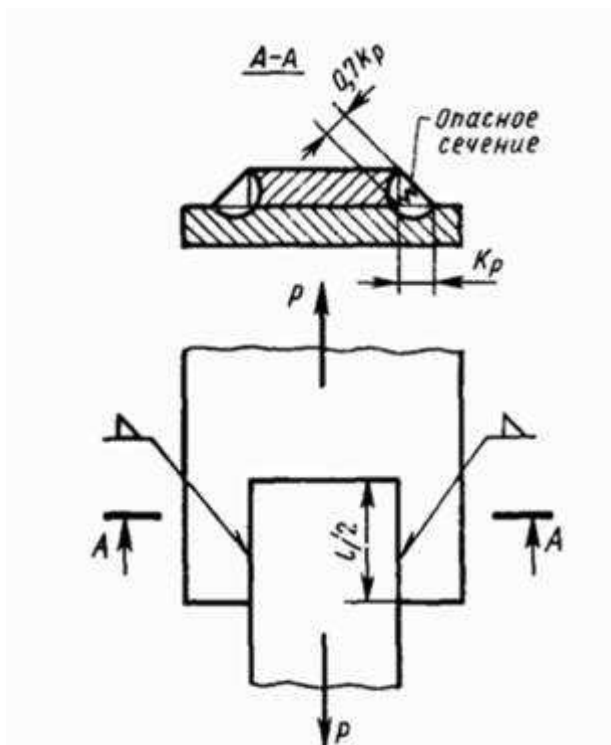


Рисунок 1.15 – К расчёту угловых швов

k_p - расчётный катет углового шва, l - дли шва.

Этот принцип применяется только в упрощенных инженерных расчетах, т.к. такой метод дает большой запас прочности швам. [48]

В процессе эксплуатации тавровых и нахлесточных сварных соединений образуются трещины в месте перехода от шва к основному металлу, так как наблюдается зависимость концентрации напряжений. Для рассмотрения сварных соединений необходимо определить коэффициент концентрации напряжений α_σ , который определяется по формуле (3) [49].

$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{\alpha}{\sqrt{R/h}} \sin\varphi \quad (3)$$

Здесь α - коэффициент , который зависит от соотношения b/B , если соотношение $b/B \leq 3$, то

$$\alpha = \sqrt{\frac{(B/b)-1}{(B/b)^2+1,6}} \quad (4)$$

R- радиус перехода от шва к основному металлу, φ - угол наклона касательной к усилению шва. B- толщина пластины, В- максимальная ширина усиления в центральном сечении если соотношение $b/B > 3$, значит коэффициент принимают как при $b/B = 3$ [49]. Коэффициенты концентрации напряжений рассчитанные по формуле (4), характерны для идеально упругой работы сварных тавровых и нахлесточных соединениях с лобовыми швами. В действительности в области концентраций напряжений имеет место упругое состояние материала, которое, характеризуются коэффициентом концентрации напряжения и коэффициентом концентрации деформации.[47]

Трещиноподобные несплошности часто относят к числу недопустимых. Это объясняется тем, что такие дефекты могут существенно влиять на работоспособность сварных соединений. Как показывает опыт, а также анализ заключений экспертиз промышленной безопасности кранов с отработанным нормативным сроком эксплуатации, выполненных различными диагностическими организациями, трещины в основном возникают в области сварных швов и основной причиной их появления, как правило, являются непровары и подрезы в сварных узлах с угловыми швами.

Изучению влияния щелевидных дефектов на прочность сварных соединений при различных схемах нагружения, посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей. В частности, в работах известных ученых Г.А. Николаева, В.А. Винокурова, С.А. Куркина, И.И. Макарова и др. [50-53] приведены экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что в условиях

статического нагружения при нормальных температурах прочность сварных

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

соединений, близких к однородным, с щелевидными дефектами в корне шва изменяется пропорционально уменьшению площади поперечного сечения. Сварные соединения в данном случае принято называть нечувствительными к дефектам. Под чувствительностью при это понимается степень снижения прочностных характеристик дефектных сварных соединений по сравнению с бездефектными той же площадью поперечного сечения [54]. Коэффициент чувствительности q (5) определяется следующим образом:

$$q = \frac{\sigma_p - \sigma_{cp}}{\sigma_p} \quad (5)$$

где: σ_p – расчетный предел прочности сварного соединения при различной величине (площади) дефекта (6), подсчитанный по формуле:

$$\sigma_p = \sigma_p^{\text{ш}} \left(1 - \frac{F_d}{F_o} \right) \quad (6)$$

σ_{cp} – действительная прочность сварного соединения с дефектом (отношение предельной нагрузки P к площади брутто-сечения F_o); $\sigma_p^{\text{ш}}$ – временное сопротивление металла шва; F_d – площадь дефекта.

В случае, когда $q \leq 0$, соединение считается нечувствительным к дефекту, если же $q > 0$, то имеет место значительное снижение прочности при влиянии дефекта по сравнению с прочностью, определяемой нетто-сечением, а соединение считается чувствительным к плоскостному (трещиноподобному) дефекту.

Однако чувствительность сварных соединений к тем или иным дефектам сварки определяется не только соотношением механических характеристик металла. Немаловажными факторами здесь являются острота дефектов, местоположение в соединении, температура эксплуатации и др.

Существующие в инженерной практике методики расчета на статическую прочность сварных соединений с угловыми швами, выполненных с неполным проплавлением и нагруженных изгибом, в основном основаны на предположении,

что соединяемые детали являются абсолютно жесткими телами, а швы имеют высокую пластичность. Эти методики преимущественно содержат в себе следующие основные элементы:

- определение расчетной схемы;
- выбор опасного сечения;
- расчет номинальных напряжений в опасном сечении σ_N, τ_m, τ_v ;
- расчет эквивалентных напряжений в опасном сечении $\sigma_{\text{ЭКВ}}$;
- выбор значений допускаемых напряжений $[\sigma]$ или расчетных сопротивлений $[R_p]$ для заданного сварного соединения;
- проверка выполнения условий прочности (7)

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq [\sigma] \text{ или } \sigma_{\text{ЭКВ}} \leq R_p \quad (7)$$

В частности, расчет сварных соединений с угловыми швами на действие момента в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения швов регламентируется в СП 16.13330.2011 [55] (Рисунок 1.16) Согласно данному методу расчет ведется по двум сечениям: 1 – сечение по металлу шва (совпадает с минимальным сечением шва); 2 – сечение по металлу границы сплавления. Условия прочности для сечений выглядят следующим образом:

По металлу шва (8):

$$\frac{M}{W_f} \leq R_{wf} * \gamma_{wf} * \gamma_c \quad (8)$$

По металлу границы сплавления (9):

$$\frac{M}{W_z} \leq R_{wz} * \gamma_{wz} * \gamma_c \quad (9)$$

Где: W_f и W_z – моменты сопротивления соответственных расчетных сечений;

R_{wf} R_{wz} – расчетные сопротивления срезу в соответствующих сечениях;

										Лист
										36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2018.207.00 ПЗ					

$\gamma_{wf}, \gamma_{wz}, \gamma_c$ – коэффициенты условий работы шва, принимаемые согласно прил. 4* СП 16.13330.2011 [55] и в зависимости от климатического района

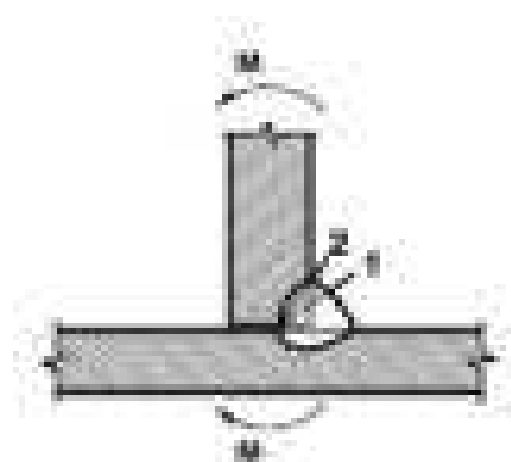


Рисунок 1.16 – Расчетная схема изгиба сварных соединений с угловыми швами согласно СП [55]

Для оценки влияния момента в плоскости расположения угловых швов здесь же представлены выражения, полученные кинематическим методом:

По металлу шва (10):

$$\frac{M}{I_{fx} * I_{fy}} * \sqrt{x^2 * y^2} \leq R_{wf} * \gamma_{wf} * \gamma_c \quad (10)$$

По металлу границы сплавления (11):

$$\frac{M}{I_{zx} * I_{zy}} * \sqrt{x^2 * y^2} \leq R_{wz} * \gamma_{wz} * \gamma_c \quad (11)$$

Где: $I_{fx}, I_{fy}, I_{zx}, I_{zy}$ – моменты инерции соответствующих расчетных сечений относительно его главных осей;

x и y – координаты точки шва, наиболее удаленной от центра тяжести расчетного сечения швов, относительно главных осей сечения.

Рассмотренный подход, как и многие другие [56-58] основаны на результатах анализа разрушений сварных соединений с угловыми швами. Как правило, тавровые соединения разрушаются либо по металлу шва от вершины непровара,

либо по основному металлу в зоне расположения линий сплавления [59] (Рисунок 1.17). Первый тип разрушения согласно работе [60] имеет место, когда отношение величины катета k к толщине стенки присоединяемого ребра B менее 1.2.

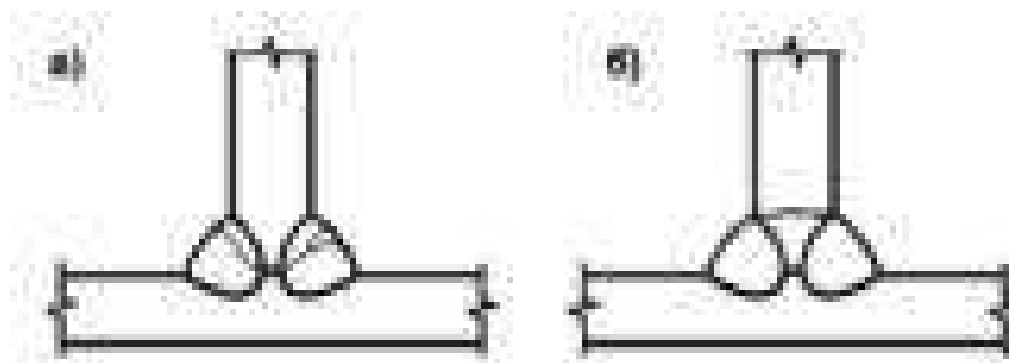


Рисунок 1.17 – Наиболее распространенные разрушения тавровых соединений
а – по сварному шву, б – по зоне сплавления

Рассмотрим тавровое соединение, нагруженное изгибающим моментом M (Рис.1.18). В качестве расчетного (опасного) в большинстве инженерных расчетов принято сечение h_1 по металлу шва (12), совпадающее с высотой шва без учета проплавления, где ответственными за разрушения являются касательные напряжения. Характерный размер этого сечения:

$$h_1 = k * \sqrt{2} \quad (12)$$

где k – катет углового шва.

В немецком стандарте DIN 4100 расчетное сечение h_2 (13) проходит через половину глубины проплавления стенки соединения параллельно h_1 . Размер рассматриваемого сечения определяется следующим выражением:

$$h_2 = h_1 + \frac{H}{2 * \sqrt{2}} \quad (13)$$

Наиболее консервативную оценку можно получить, если расчеты выполнять по сечению h_3 от вершины непровара (14), расположенному параллельно высоте шва. Размер этого сечения можно определить следующим способом:

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

$$h_3 = h_1 + \frac{H}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

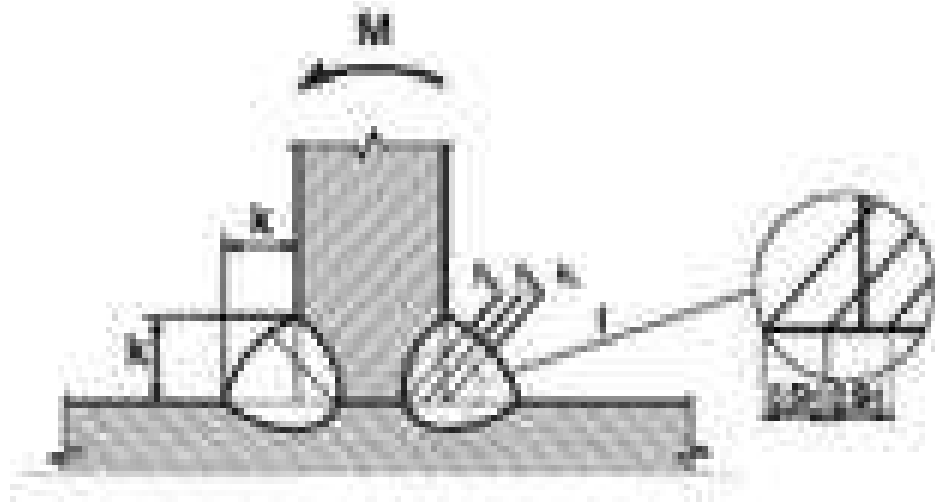


Рисунок 1.18 – Схема таврового соединения с неполным проплавлением, нагруженного изгибающим моментом

Оценку несущей способности соединения ведут по эквивалентным напряжениям, действующим в расчетном сечении, и определяемым действием нормальных и касательных напряжений (15)

$$\sigma_N = \sigma_{hy} * \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad \tau_R = \sigma_{hy} * \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (15)$$

где σ_{hy} – величина среднего напряжения от изгиба, действующего на расчетные сечения (16):

$$\sigma_{hy} = \frac{M}{W_B * 2h_i} \quad (i=1,2,3) \quad (16)$$

Здесь W_B – момент сопротивления привариваемой пластины (ребра). Для определения эквивалентных напряжений по известным номинальным напряжениям существуют следующие выражения:

- По теории максимальных касательных напряжений (III теория прочности) (17)

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_N^2 + 4\tau_T^2} = \tau_{\text{max}} \quad (17)$$

- По теории наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения (IV теория прочности) (18)

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_N^2 + 3\tau_T^2} \quad (18)$$

- По стандарту ISO/R617 (19)

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_N^2 + 1.8\tau_T^2} \quad (19)$$

- Согласно немецкому стандарту DIN 4100 (20)

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_N^2 + \tau_T^2} \quad (20)$$

- По рекомендациям подкомиссии XV-A Международного института сварки [56] (21)

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \beta \sqrt{\sigma_N^2 + 3\tau_T^2} \quad (21)$$

где β – некоторый коэффициент, $\beta = 0.7 + 1.36 * 10^{-3}(\sigma_T - 240)$ для металла шва, у которого $240 \text{ Мпа} \leq \sigma_T \leq 350 \text{ Мпа}$.

Последние рекомендации могут применяться для статически нагруженных сварных соединений из углеродистых и низколегированных сталей с минимальным пределом прочности менее 600Мпа, отношением предела текучести к пределу прочности не более 0.8Мпа и минимальным относительным удлинением при разрушении не менее 0.12, выполненных сваркой покрытыми электродами, в среде защитных газов или под флюсом.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

При нагружении нахлесточных соединений растягивающими усилиями (Рисунок 1.19) угловые швы наряду с напряжениями среза подвергаются действию изгибающего момента, обусловленного эксцентриситетом приложения нагрузок. В зависимости от схемы нагружения и геометрии соединения значение изгибающего момента может изменяться в широких пределах. Например, в работе [61] экспериментально показано, что при растяжении двухстороннего нахлесточного соединения изгибающим моментом можно пренебречь, а при нагружении этого же соединения сжимающими усилиями действие изгибающего момента значительно усиливается.

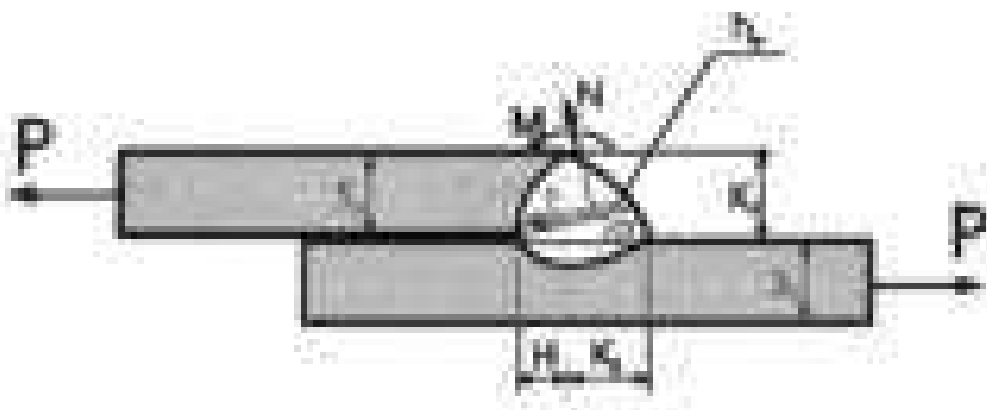


Рисунок 1.19 – Схема усиления в опасном сечении нахлесточного соединения при растяжении

Величина изгибающего момента в опасном сечении лобового шва для случая растяжения одностороннего нахлесточного соединения (Рисунок 1.19) :

$$M = 0.5P(S_1 + h_p * \sin\varphi) \quad (22)$$

Напряжение от изгибающей составляющей в этом случае будет определяться :

$$\sigma_{изг} = \frac{4M}{c * h_p} \quad (23)$$

где $c = 0.75, 1.3$ – коэффициент, учитывающий особенности деформирования при изгибе при наличии острого концентратора [62] .

Отсюда:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{2P(S_1 + h_P \sin \varphi)}{C \cdot h_P} \quad (24)$$

Из последнего выражения следует, что для определения составляющей напряжения от изгибающего момента в нахлесточном соединении требуется найти площадь (длину) опасного сечения h_P , положение которого определяется углом φ (25):

$$h_P = \frac{K_1 \cdot (H + K_2)}{K_1 \cos \varphi + K_2 \sin \varphi} \quad (25)$$

В случае растяжения одностороннего нахлесточного соединения с двумя угловыми швами (Рис.1.20) расчет выглядит несколько сложнее. Здесь основную сложность составляет расчет зависимости распределения усилий от внешней нагрузки между швами соединения.

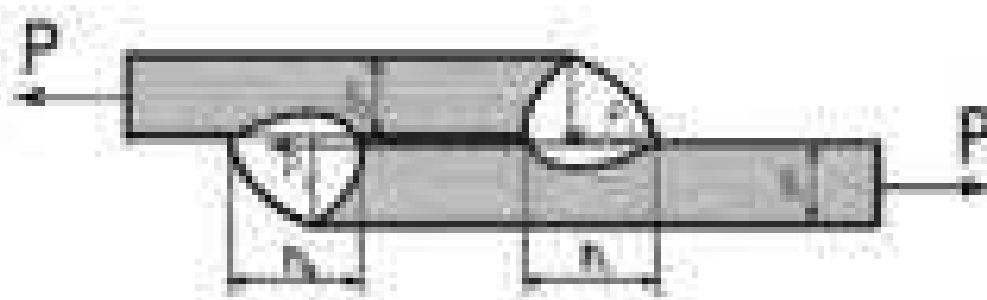


Рисунок 1.20 – Схема к расчёту распределения нагрузок между швами нахлесточного соединения при растяжении

Очевидно, что в нахлесточных соединениях с двумя лобовыми швами усилия между ними распределяются равномерно, если пластины имеют одинаковые толщины, а угловые швы – одинаковые соответствующие катеты. В противном случае распределение усилий будет определяться соотношением P_1/P_2 , которое для схемы, показанной на Рис.1.18, можно найти по формуле :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{(1+\nu) \cdot S_1^2 + S_1 \cdot S_2 + h_2 \cdot l}{(1+\nu) \cdot S_2^2 + S_1 \cdot S_2 + h_1 \cdot l} \cdot \frac{h_1 \cdot S_2}{h_2 \cdot S_1} \quad (26)$$

где ν – коэффициент Пуассона

Для других схем нагружения нахлесточных соединений распределения напряжений будут определяться несколько отличными от (26) соотношениями. Однако останавливаться на этом подробно в рамках настоящей работы является нецелесообразным. Из соотношения (26), учитывая условие равновесия:

$$P = P_1 + P_2 \quad (27)$$

Нетрудно найти P_1 и P_2 . Очевидно, что расчет изгибающего момента M и соответствующих напряжений в каждом шве соединения будет выполняться по формулам (22), (23) и (24).

В МВТУ им. Н.Э. Баумана разработан метод расчета на прочность сварных соединений с угловыми швами, который позволяет учесть направление вектора нагрузки на каждом из участков шва. Данный метод хорошо описан в работах В.А. Винокурова и С.А. Куркина [50, 63, 64 и др.] и может быть применен при расчете комбинированных угловых швов при изгибе. Суть его заключается в том, что в зависимости от направления передаваемой швом нагрузки его прочность на срез будет различна. Такое положение указывает на наличие неучтенного запаса прочности комбинированных угловых швов, рассчитываемых нормативными методами.

Учет различной прочности угловых швов осуществляется путем введения коэффициента прочности C (28):

$$C = \frac{C_\alpha}{\sqrt{\sin^2\gamma + C_\alpha^2 \cos^2\gamma}} \quad (28)$$

где C_α – коэффициент повышения прочности углового шва по сравнению с фланговым при разрушении шва силой, направленной перпендикулярно оси шва;
 γ – угол, образованный вектором полной силы P с продольной осью шва (Рисунок 1.21).

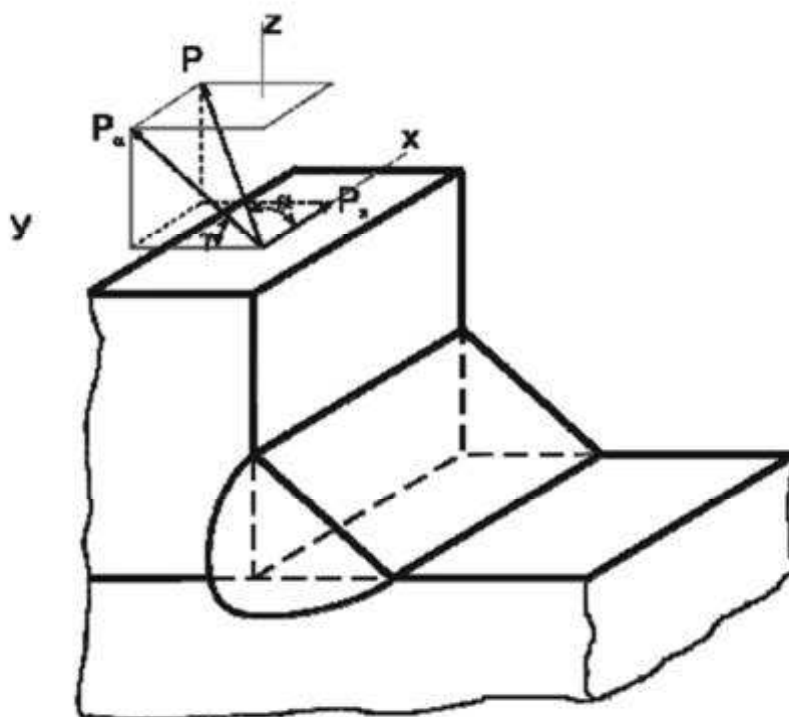


Рисунок 1.21 – Схема нагружения углового шва усилием произвольного направления

Коэффициент C_α зависит от механических свойств наплавленного металла и от направления усилия нагружения, поэтому определяется экспериментальными методами.

В работе [63] рассмотрен изгиб бруса, приваренного угловым швом к некоторой плоскости по периметру (Рисунок 1.22) Во всех точках периметра шва погонная сила q от действия момента M направлена под углом $\alpha = 90^\circ$, при этом $\gamma = 0$. По графику зависимости $C_\alpha = C_\alpha(\alpha)$ для низкоуглеродистой стали, представленному в [63] значение коэффициента $C_\alpha = 1.19$. По формуле (28) $C = C_\alpha = 1.19$.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

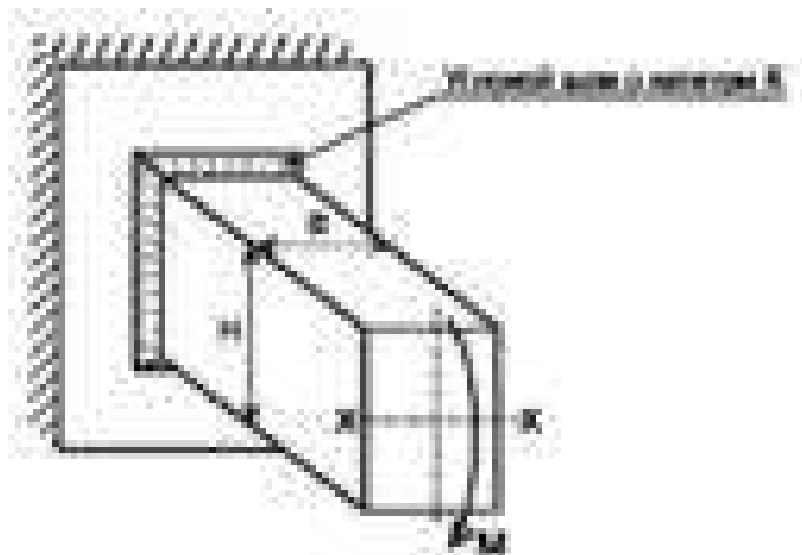


Рисунок 1.22 – Схема к расчёту углового шва бруса, нагруженного изгибающим моментом M

Расчетная плоскость среза в данном случае составляет $\beta K(2H + 2B)$ (здесь βK – наименьшее сечение шва). Момент инерции I_{x-x} расчетной площади среза (29):

$$I_{x-x} = \left[\frac{H^3}{12} + \frac{2BH^2}{4} \right] * \beta * K * C \quad (29)$$

Расчетное напряжение, действующее в плоскости среза, определяется по известной формуле (30):

$$\tau_{\text{расч}} = \frac{M}{W_{\text{ср}}} = \frac{0.5 * H * M}{I_{x-x}} \quad (30)$$

Рассматриваемый метод можно использовать как для нахлесточных, так и для тавровых соединений, металл которых находится в вязком состоянии, обладает достаточной пластичностью и где отсутствует механическая неоднородность.

Как показано в текущем обзоре существующих методов инженерных расчетов, все они производятся с точки зрения вязкого механизма разрушения, что вполне оправдано при расчете тонколистовых сварных конструкций, работающих в условиях «нормальных» температур. При этом основной проблемой, так или иначе возникающей в процессе оценки работоспособности

соединения с дефектом, является правильный выбор расчетного (опасного) сечения. Большинство из рассмотренных методик разработано для соединений с равнокатетными швами и не всегда учитывают реальное положение очага пластического течения. Чаще всего за расчетное принимается минимальное сечение углового шва. Такой подход, как показывают результаты работ [65- 71 и др.] не всегда оправдан.

С другой стороны, ухудшение режимов эксплуатации сварных конструкций с угловыми швами в условиях низких температур, а также применение новых высокопрочных материалов может привести к хрупким разрушениям соединений. Применение в таких случаях классических расчетных методов неприемлемо.

Очевидно, что рассмотренные методы, применяемые в инженерной практике, не ограничивают круг представлений о влиянии трещиноподобных дефектов на работоспособность сварных соединений с угловыми швами при изгибе. В научной литературе также можно найти ряд публикаций, посвященных этой теме. Подобные задачи рассматривались в работах Л.Б. Шрона [72, 73], В.И. Махненко [74, 75], Ю.Н. Овчаренко [76] и др. Причем большая часть этих работ посвящена изучению особенностей напряженно-деформированного состояния локальных зон концентрации напряжений таких сварных соединений при различных типах нагружения. Заслуживает внимание работа Л.Б. Шрона [72], посвященная разработке методики оценки концентрации напряжений в зоне перехода углового шва к основному металлу тавровых, крестовых (с полным и неполным проплавлением) и нахлесточных соединений.

В качестве основного критерия здесь выбран теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ . Для сварных соединений с неполным проплавлением ($2h_{\text{пр}} < b$), работающих в условиях изгиба (Рис.1.23), коэффициент концентрации напряжений для рассматриваемой зоны согласно результатам [72] определяется по формуле (31):

$$\alpha_\sigma = \alpha_\sigma \left\{ 1 + C \left[\frac{b-2h_{\text{пр}}}{b} * \sin(\varphi' - 15^\circ) \right]^2 \right\} \quad (31)$$

где: α_σ – теоретический коэффициент концентрации для соединений, выполненных с полным проплавлением (32):

$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{a}{\sqrt{\frac{p}{B}}} \sin\varphi \quad (32)$$

a – условный коэффициент;

$\varphi' = \arctg \frac{K_{\text{Л}}}{K_{\text{Г}}}$ – угол наклона лобовой грани шва;

s – коэффициент нагружения, при изгибе $s = 2.3$.

Коэффициент a в формуле (28) зависит от соотношения $\frac{B}{b}$ и для случая изгиба определяется выражением (33):

$$a = 0.3 * \left(\frac{B}{b} - 1\right)^{0.2} \quad (33)$$

Формула (33) справедлива для $\frac{B}{b} \leq 3$. Если соотношение $\frac{B}{b} > 3$, значение коэффициента, a принимается как для $\frac{B}{b} = 3$

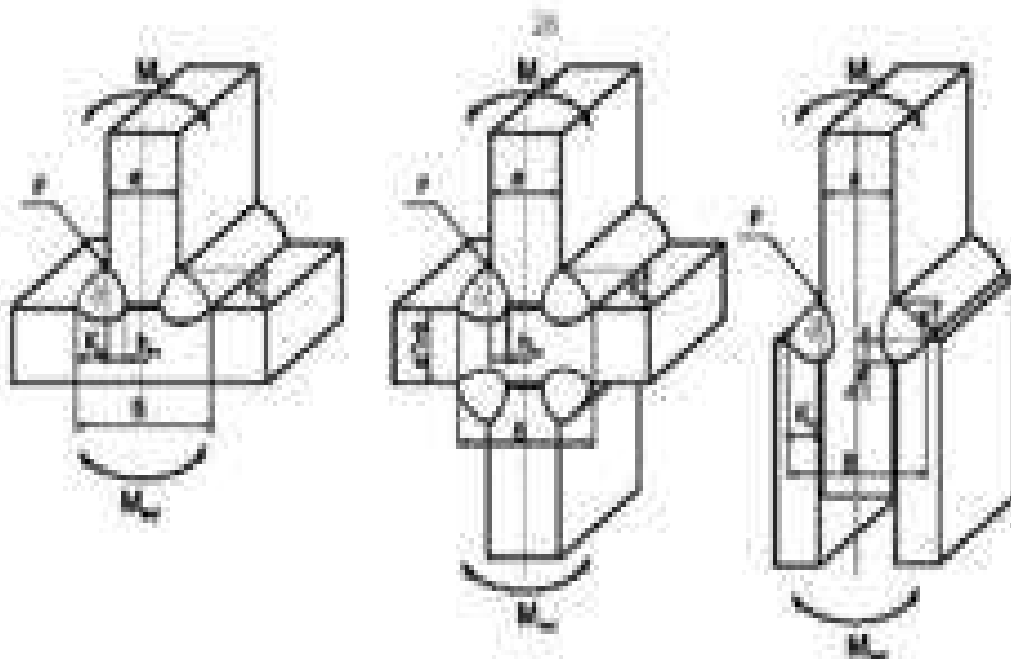


Рисунок 1.23 –Схема изгиба с угловыми швами

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Кроме того, по аналогии с формулой (31) получена формула для определения относительного градиента первого главного напряжения в рассматриваемой зоне (34):

$$\bar{G}'_{\sigma_1} = \bar{G}_{\sigma_1} \left\{ 1 + 0.4 * \left[\frac{B-2h_{\text{пр}}}{B} \sin(\varphi - 15^\circ) \right] \right\} \quad (34)$$

Здесь \bar{G}_{σ_1} - относительный градиент для соединения с полным проплавлением ($2h_{\text{пр}} \geq B$), который для случая нагружения изгибом определяется (35):

$$\bar{G}_{\sigma_1} = \frac{1,6}{p} \sqrt{\sin\varphi} + \frac{2}{B} \quad (35)$$

При этом протяженность зоны возмущения первого главного напряжения и максимальных касательных напряжений соответственно определяются по формулам:

$$L_{\sigma_1} = p * \left(1 - \sin \frac{p}{B} \right) * \sqrt{\sin\varphi} \quad (36)$$

$$L_{\tau} = p * \left(0.5 - \sin \frac{p}{B} \right) * \sqrt{\sin\varphi} \quad (37)$$

По полученным выражениям для определения $a_{\sigma}, \bar{G}_{\sigma_1}, L_{\sigma}$ (31), (34) и (36) можно найти распределение напряжений в направлении градиента напряжений (38):

$$\sigma_1 = \sigma_H \left[\omega_{\sigma} + (a_{\sigma} - \omega_{\sigma}) \exp \left(- \frac{a_{\sigma} * \bar{G}_{\sigma_1} * r}{a_{\sigma} - \omega_{\sigma}} \right) \right] \quad (38)$$

Где $\omega_{\sigma} = \frac{B-2a_{\sigma} * L_{\sigma}}{B-2L_{\sigma}}$

Распределение максимальных касательных напряжений в направлении их градиента определяется другим выражением (39):

$$\tau_{max} = \sigma_H \left[\omega_{\tau} + (a_{\sigma} - \omega_{\sigma}) \exp \left(- \frac{a_{\sigma} * \bar{G}_{\tau} * r}{a_{\sigma} - \omega_{\tau}} \right) \right] \quad (39)$$

Где $\omega_\sigma = \frac{B-2a_\sigma * L_\tau}{B-2L_\tau}$; $\bar{G}_\tau = 1.5 * \bar{G}_{\sigma_1}$ - относительный градиент максимальных касательных напряжений.

Также здесь получено выражение для определения интенсивности деформаций в зоне концентрации в упругопластической области в направлении максимального градиента (40):

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_H * \left[1 + (a_\sigma - 1) \exp\left(\frac{-a_\sigma * \bar{G}_{\sigma_1} * r}{a_\sigma - \omega_\sigma}\right) \right]^{\frac{2}{m+1}}}{\left(\frac{\varepsilon_H}{\varepsilon_T}\right)^{\frac{m-1}{m+1}}} \quad (40)$$

Здесь ε_H - номинальная деформация; ε_T - деформация, соответствующая пределу текучести материала; m - условный коэффициент.

Коэффициент m можно определить по формуле (41):

$$m = \left(1 - 0.3 * \frac{\psi}{100} \right) * \frac{\lg\left[\frac{\sigma_B}{\sigma_T} * \left(1 - 1.4 * \frac{\psi}{100} \right)\right]}{\lg\left[\left(\frac{\sigma_T}{E} + 2 * 10^{-2}\right)^{-1} \ln\left(\frac{100}{100 - \psi}\right)\right]} \quad (41)$$

где $\psi, \sigma_B, \sigma_T, E$ - соответственно относительное сужение, временное сопротивление, предел текучести и модуль упругости материала.

Найденное в [72] выражение для ε_i позволяет по известному соотношению найти распределение интенсивности напряжений $\sigma_1 = A * \varepsilon_i^m$

Полученные выше формулы (31)-(41) описывают НДС в зоне концентрации напряжений в месте перехода угловых швов к основному металлу. В то же время анализ разрушений тавровых и нахлесточных соединений показывает, что очень часто источником развития трещины становится непровар, то есть данная методика рассматривает только частный случай разрушения. С другой стороны, использование в качестве расчетного критерия теоретический коэффициент концентрации α_σ для оценки опасности сварочных дефектов не всегда корректно.

Дело в том, что очень часто в зонах перехода от наплавленного к основному

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

металлу встречаются макро- и микроподрезы, радиусы в вершине которых очень малы и недоступны для измерения [77]. Труднее дело обстоит с вершинами трещиноподобных дефектов типа непровар. Нередко рассматриваемые дефекты заканчиваются очень короткой трещиной или надрывом. Естественно, что невозможно предсказать или установить при обследовании сварных соединений готовой конструкции наличие или отсутствие таких малых трещин. Поэтому при оценке опасности сварочных дефектов (подрезов, непроваров, несплавлений и др.) приходится допускать худшее и считать, что такие короткие трещины возможны [78], т.е. предполагается, что $r \rightarrow 0$. В таком случае использование α_σ для оценки НДС зоны концентратора становится крайне неудобным.

В работе [75] рассмотрена возможность расчетной оценки предельного состояния при изгибе таврового соединения с односторонним угловым швом с использованием подходов линейной механики разрушения (ЛМР). В качестве характеристики напряженно-деформированного состояния здесь использовали коэффициент интенсивности напряжений K_I в зоне вершины непровара, который для расчетной схемы с изгибом будет определяться следующим образом (42):

$$K_I = \frac{4\pi-8}{\pi^2-8} * \sqrt{\pi} * \frac{M_{изг}}{h*\sqrt{h}} \quad (42)$$

где: $M_{изг}$ – величина внешнего изгибающего момента; h – расстояние от вершины непровара до лобовой грани шва.

Предложенный подход является идеализированным, что является вполне оправданным. Тавровое соединение представлено по схеме эквивалентной пластины нетто-сечением h с краевым полубесконечным разрезом. Приемлемость подобных подходов доказана многочисленными исследованиями, в том числе и результатами работы [80].

В научной литературе имеется ряд публикаций, посвященных продольному изгибу балочных сварных конструкций. Но с исследовательской точки зрения подобные расчетные схемы представляют меньший интерес, т.к. угловые швы в таких случаях работают как фланговые в условиях растяжения-сжатия или в

условиях продольного среза. Между тем вопросы, связанные с работоспособностью фланговых швов при растяжении-сжатии и при продольном сдвиге в литературе изучены достаточно хорошо.

Приведенный в настоящем разделе обзор не является исчерпывающим. Вопросам прочности сварных соединений с угловыми швами (с полным и неполным проплавлениями) в условиях изгиба уделяется внимание в работах как российских, так и зарубежных ученых [81, 82, 83 и др.], что только подтверждает актуальность этой проблемы. Однако большинство из них носят либо экспериментально-рекомендательный характер, либо требуют дополнительной проработки вопроса.

1.5 Вывод по первой главе

После проведения анализа работ М.В. Шахматова, Б.Г. Кульневич, О.А. Бакши, Т.В. Кульневич, В.В. Ерофеева, Л. М. Качанова, Р.З. Шрона и других, выявлены с нашей точки зрения ряд недостатков. Большинство работ посвящено данным о распределении нагрузок и деформаций в сварных соединениях при применении комплексных теоретических подходов, так же описывается влияние геометрии угловых швов на прочность. При этом не учитывается влияние механической неоднородности на работоспособность сварных соединений с дефектами, а именно твердых швов, так же в этих работах рассматриваются сварные соединения без привязки к реальным узлам сварных конструкций. В данной работе применим результаты исследований к реальной конструкции.

На основе приведённого обзора была сформулирована цель работы и поставлены задачи для проведения моделирования.

Цель работы: Моделирование и качественная оценка прочности сварного таврового соединения при работе на растяжение и изгиб.

Поставленные задачи для достижения цели:

- Создать эскиз сварного соединения(узла) в программе Компас 3D
- Создать расчетную модель соединения средствами ANSYS

- Оценка работоспособности расчетных моделей таврового соединения, при воздействии растягивающих и изгибающих нагрузок, оценка влияния механической неоднородности в программе ANSYS
- Создать такой же эскиз сварного соединения при помощи программы Компас 3D, но уже с добавлением трещиноподобных плоскостных дефектов (поры, подрезы) и создать расчетную модель соединения средствами ANSYS
- Оценка работоспособности расчетных моделей тавровых соединений с дефектами при воздействии растягивающих и изгибающих нагрузок, оценка влияния механической неоднородности
- Выполнить анализ полученных результатов

2 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ В ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ РАСТЯЖЕНИЕ

Численный эксперимент заключается в том, чтобы проанализировать влияние дефектов в сварном соединении при помощи программы ANSYS на примере реального сварного узла. Для начала мы создадим чертёж сварного узла при помощи программы Компас 3D. После создания чертежа нам необходимо произвести импорт этого чертежа в программу ANSYS, что бы в дальнейшем создать расчётную модели и произвести расчёты для получения картины пластических деформаций. Узел состоит из двух заготовок, ширина которых 9 и 14мм., длинна 200 и 100мм. Между заготовок технологический зазор 2мм.. Сварные швы равнокатетные с усилением шва 2мм. Размеры рассматриваемых дефектов, подрезы 0.5 мм и поры длиной 2мм и высотой 0.4мм. После проведения эксперимента получим карты пластических деформаций при растяжении и изгибе данного сварного узла. Предел текучести основного металла не изменяется $\sigma_T=25$ кгс/мм², а у металла сварного шва варьируется от 25 кгс/мм² до 50 кгс/мм².

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 элементами (Рисунок 2.1). Узел таврового сварного соединения был взят на основе реальных чертежей. Основной металл сварного соединения выполнены из стали Сталь 20 по ГОСТ 1050-88. Толщина горизонтального листа 9мм, а вертикального 14мм. Катет шва равен 5мм. Усиление шва 2 мм. (Рисунок 2.2, Рисунок 2.3) сварное соединение с подрезами по 0.5 мм. (Рисунок 2.4, Рисунок 2.5) сварное соединение с порами длиной 1мм и высотой 0.4 мм. (Рисунок 2.6, Рисунок 2.7) сварное соединение с подрезами по 0.5 мм и порами длиной 1 мм и высотой 0.4мм.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

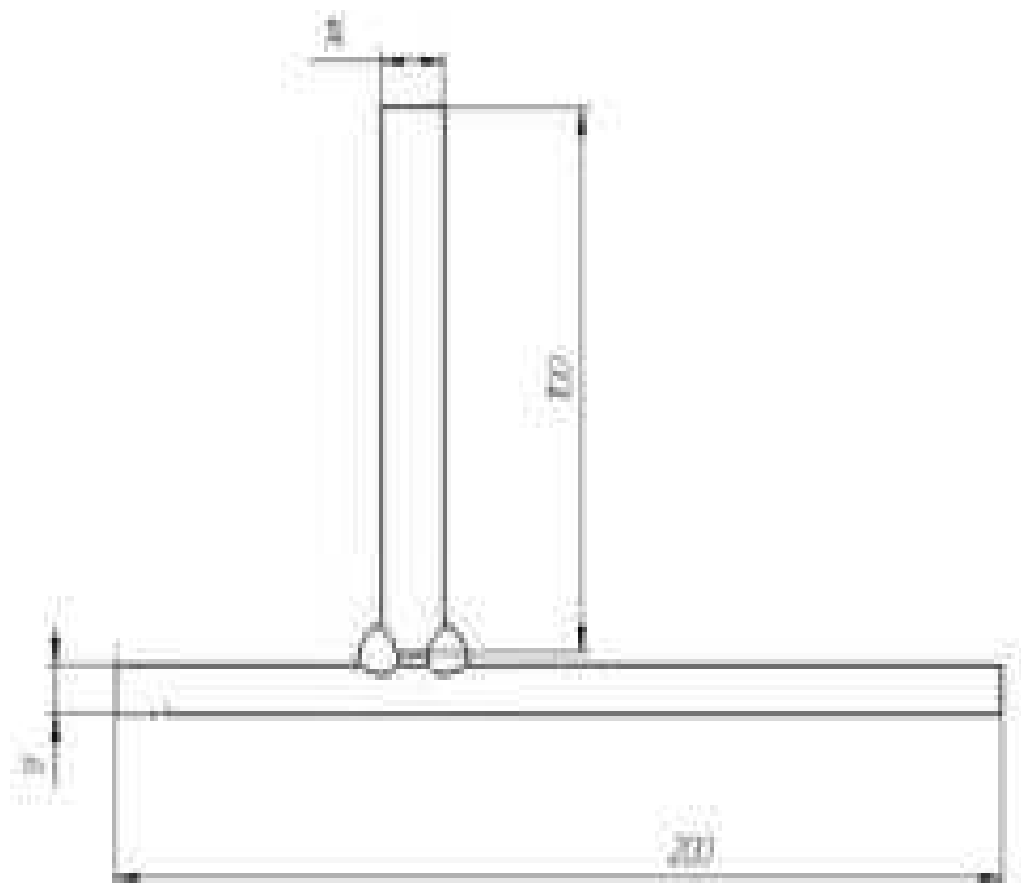


Рисунок 2.1– Схема сварного таврового соединения без дефектов

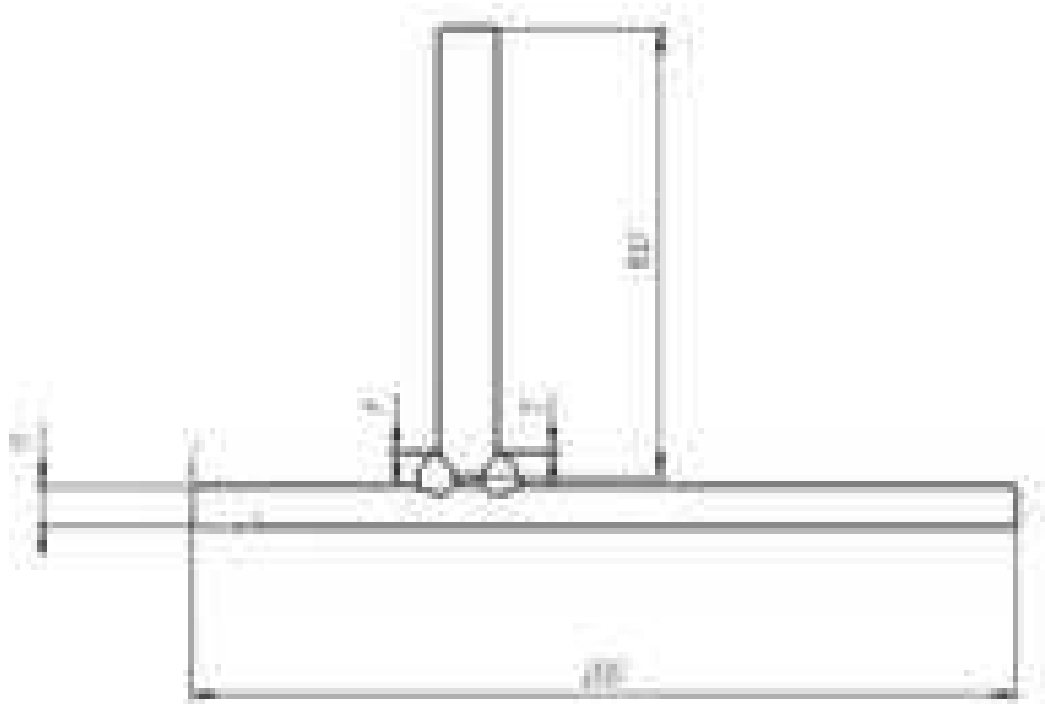


Рисунок 2.2– Схема сварного таврового соединения с подрезами

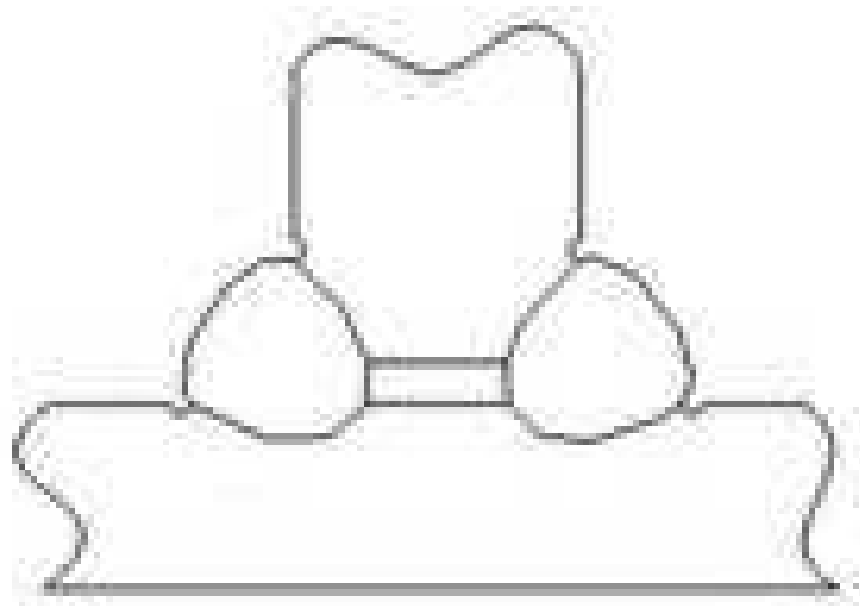


Рисунок 2.3– Схема сварных швов с подрезами

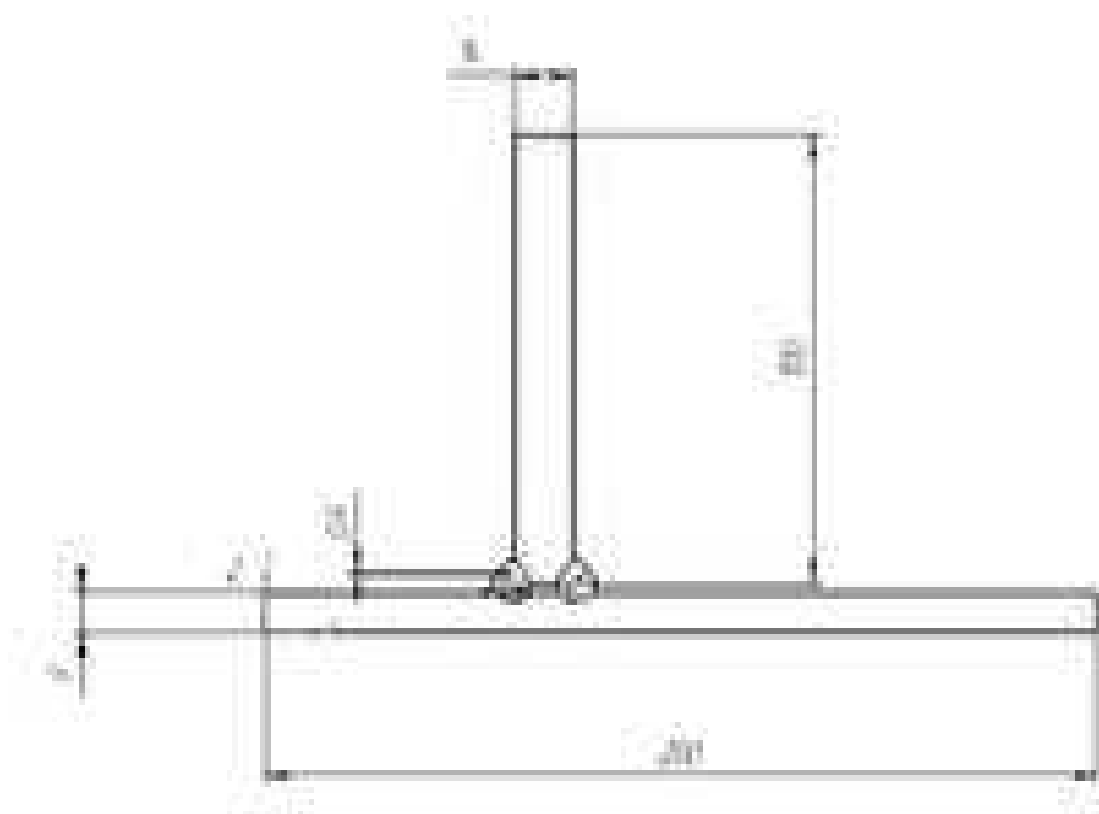


Рисунок 2.4– Схема сварного таврового соединения с порами

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2018.207.00 ПЗ

Лист

55

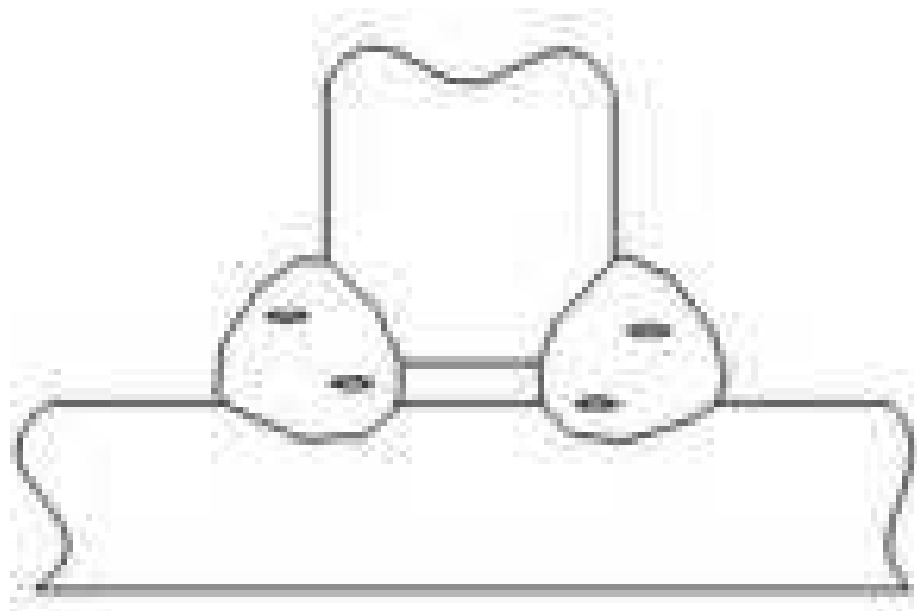


Рисунок 2.5– Схема сварных швов с порами

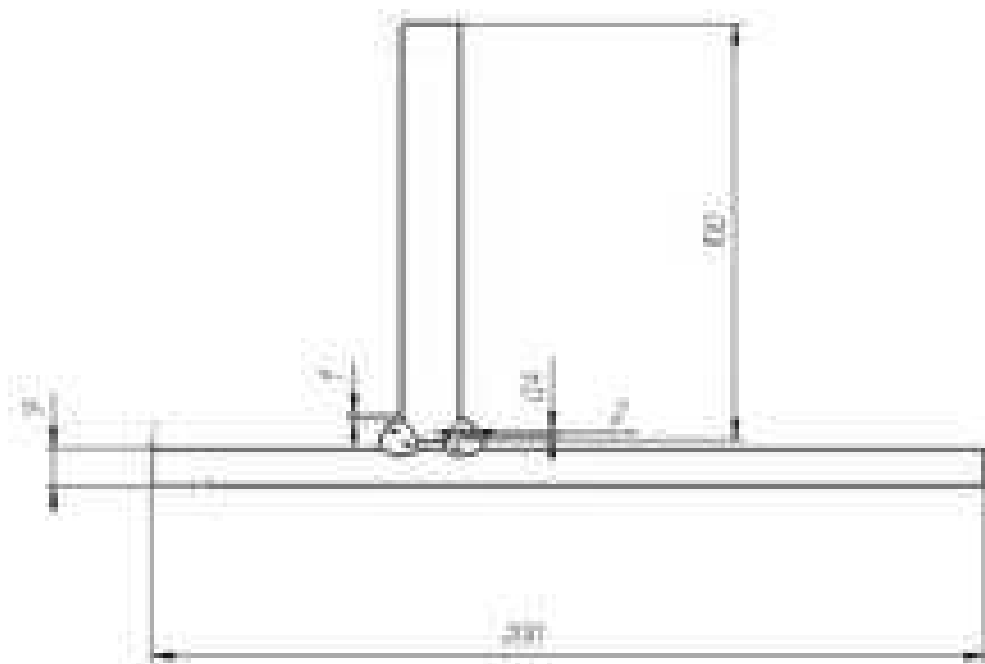


Рисунок 2.6– Схема сварного таврового соединения с подрезами и порами

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2018.207.00 ПЗ

Лист

56

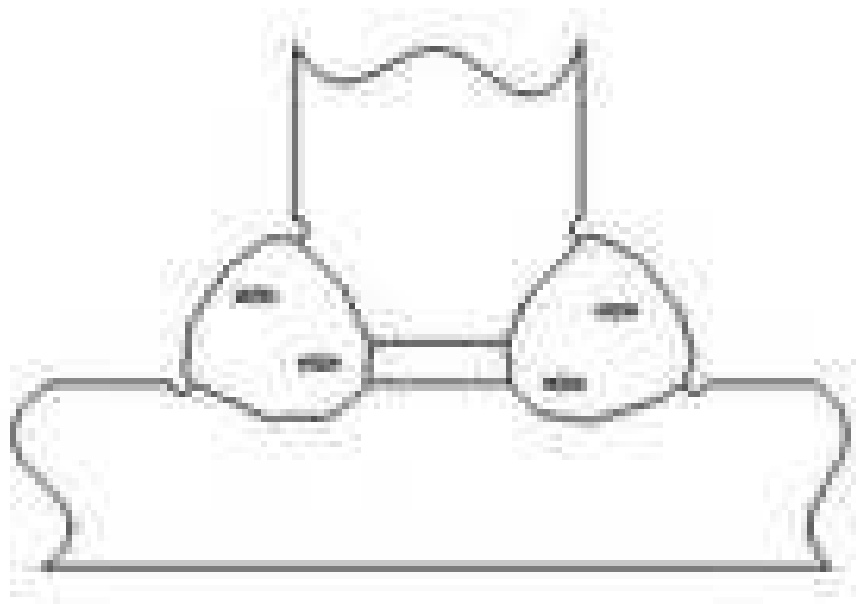


Рисунок 2.7– Схема сварных швов с подрезами и порами

2.2. Создание расчетной модели.

Создание сварной модели начинаем с того что создаём фрагмент нужного нам сварного соединения в программе Компас 3D. После того как мы начертили нужный нам сварное соединение (Рисунок 2.1, Рисунок 2.2, Рисунок 2.3, Рисунок 2.4) необходимо сохранить фрагмент в двух расширениях (.frw и .igs). Далее открываем программу ANSYS. Выбираем папку куда будут сохраняться результаты и как будет называться наш ваял. Следующим шагом будет импортирование фрагмента в программу ANSYS. После того как мы произвели импорт в программу ANSYS мы увидим наш фрагмент (Рисунок 2.8) Задаём что сварное соединение структурное.



Рисунок 2.8– Фрагмент сварного соединения в программе ANSYS

Следящим шагом является выбор элементов сварного соединения. В нашем фрагменте будет 4 элемента, две заготовки и два сварных шва. Для этого необходимо во вкладке Preprocessor выбрать Modeling далее Create→Areas→Arbitrary→ By Lines и выбираем элементы по линиям (Рисунок 2.9)

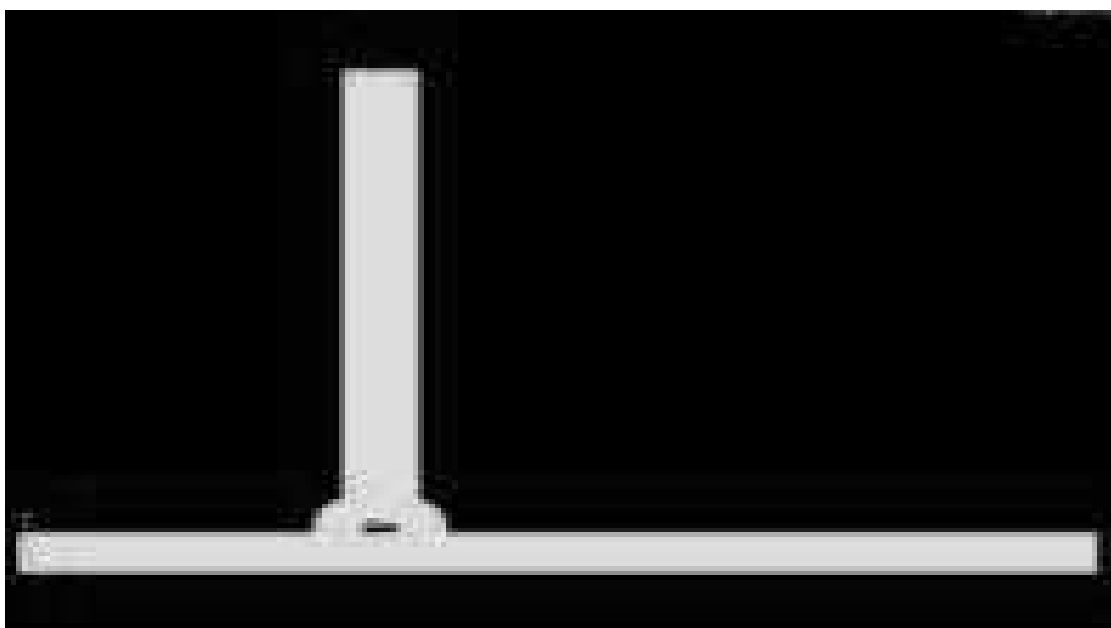


Рисунок 2.9– Фрагмент сварного соединения с выбранными элементами

Далее мы задаём свойства материала один (метал заготовок) и два (метал шва). (Рисунок 2.10), основными параметрами которые нужно задать это модуль упругости(модуль Юнга кг/мм), коэф. Пуанссона(Рисунок 2.11) и предел текучести материала.



Рисунок 2.10– Свойства материала



Рисунок 2.11 – задаем модуль упругости (модуль Юнга кг/мм) и коэф. Пуанссона

После того как мы разбили сварное соединение на элементы и задали свойства

материала, выбираем тип элемента таврового сварного соединения. Надо выбрать элемент PLANE 183. Он является 2D (двухмерным) элементом порядка с восемью узлами. Моделирование таврового сварного соединения осуществлялось при помощи PLANE 183 так как это рекомендовано 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 по части несжимаемых упругопластичных материалов и полностью несжимаемых гиперупругих материалов элемент имеет 29 смешанную формулировку для точности расчета конструкций. Далее задаём сетку для нашего сварного соединения по элементам (Рисунок 2.12) С начало сетка задаётся для элементов первого материала, а потом для элементов из второго материала.

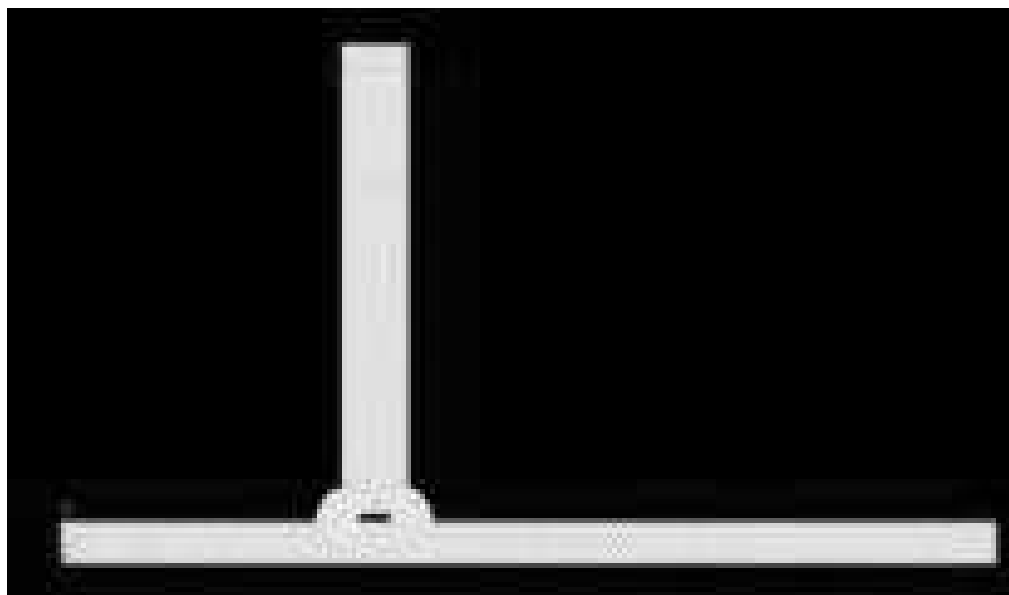


Рисунок 2.12 – Фрагмент после того как задали сетку элементов

Последним шагом перед тем как приступать к расчётам необходимо закрепить нашу конструкцию. Это делается при помощи закрепления нижней линии модели, задаём для нее перемещение по всем осям равное нулю (Рисунок 2.13). Так же в этом же шаге необходимо указать линию к которой будут прилагаться нагрузки (растяжение, изгиб) для проведения численного эксперимента (Рисунок 2.14)

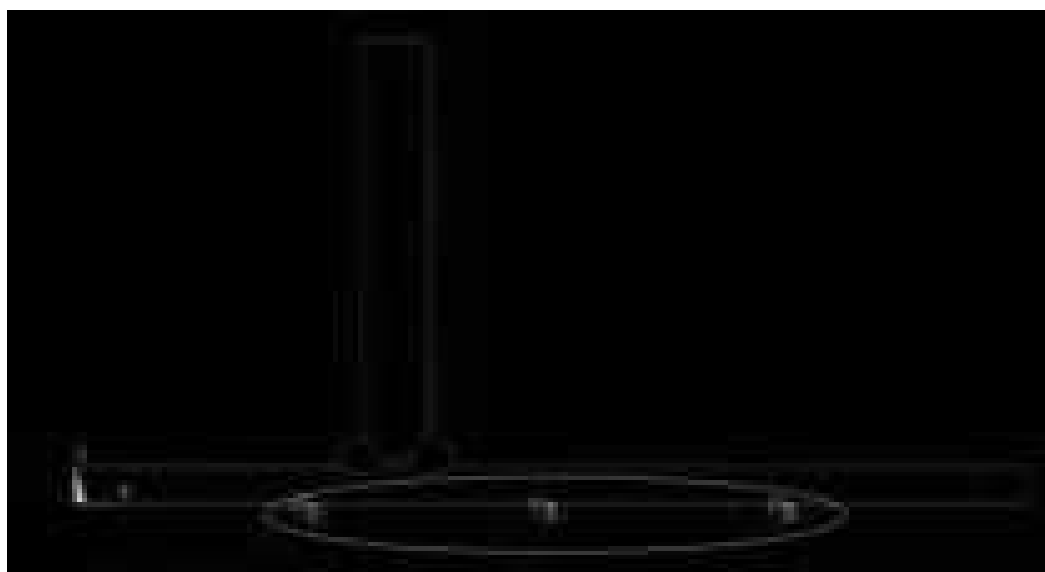


Рисунок 2.13 – Вид закрепления модели таврового соединения где жестко закреплена нижняя часть сварного соединения

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

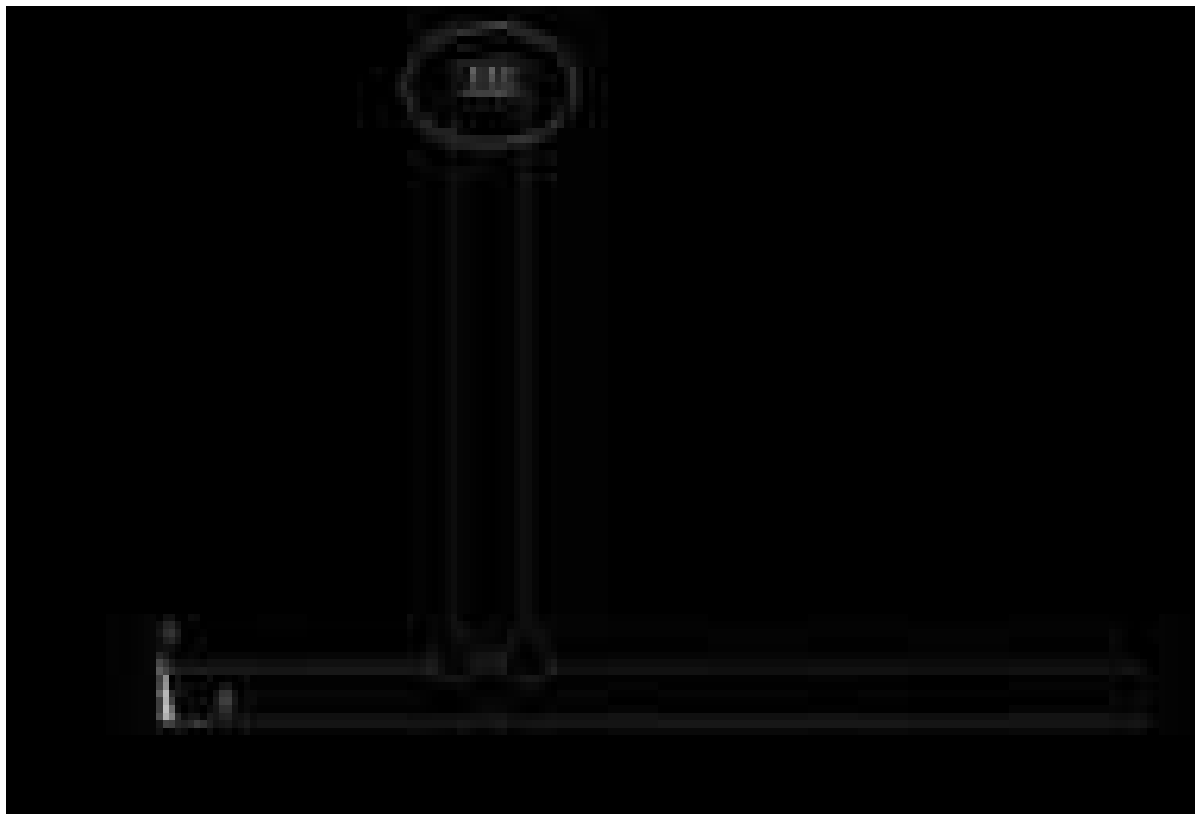


Рисунок 2.14 – Вид закрепления модели таврового соединения где задано перемещение по оси

2.4 Проведение эксперимента на растяжение

После создание модели приступаем к проведению численного эксперимента. Первым шагом является описание прикладываемых нагрузок к сварному соединению.

Прикладываем нагрузку к элементам сварной конструкции в программе ANSYS:

- 1) Нагрузка перемещением 2мм растяжением по оси Y;
- 2) Предел текучести шва будет меняться в ходе эксперимента.
- 3) Рассмотрены тавровые соединения с без дефектов и с дефектами

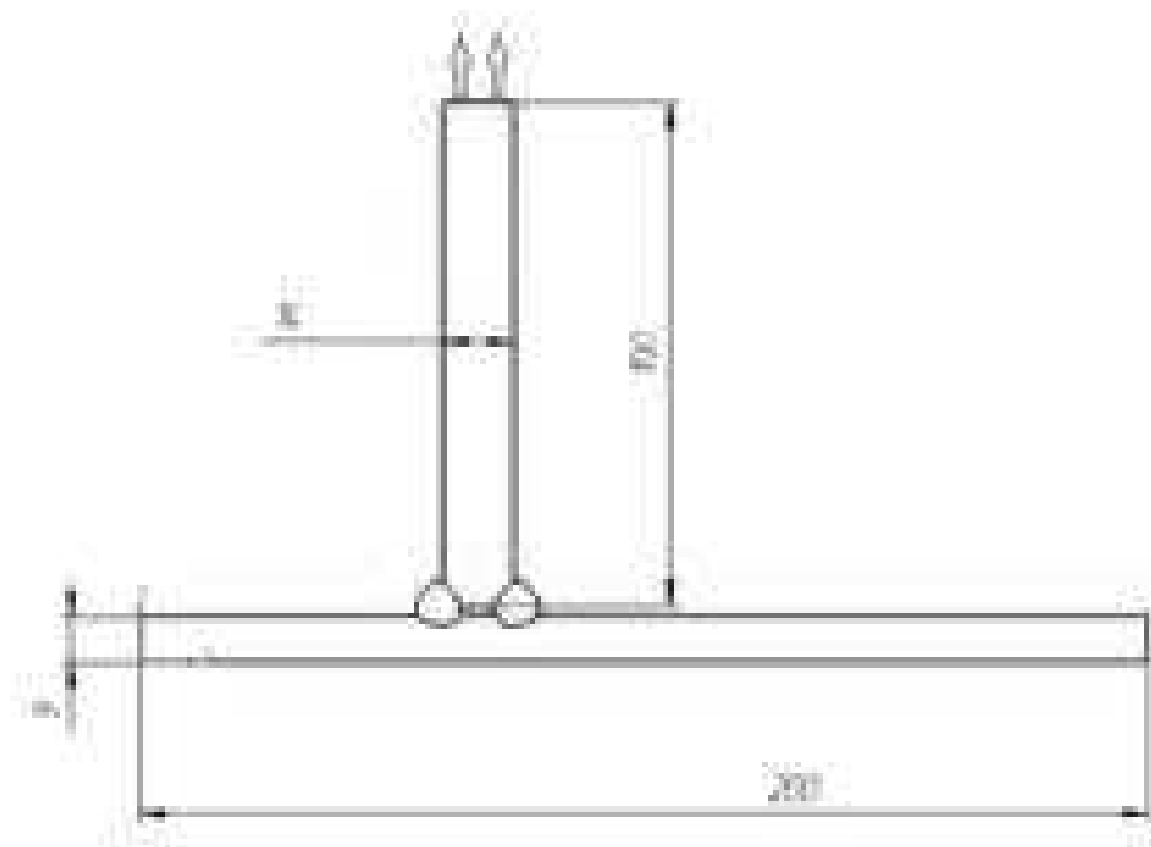


Рисунок 2.15 – Задаем нагрузку растяжением перемещением по оси Y для таврового соединения без катетов на расстояние 2мм



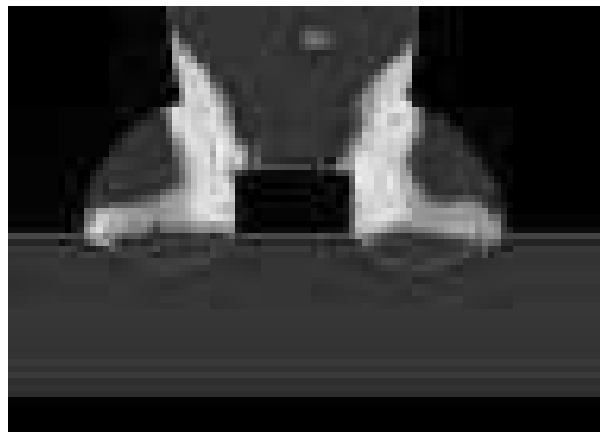


Рисунок 2.16 – Пластические деформации при растяжения сварного равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=25 \text{ кгс/мм}^2$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.16). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось тавровое соединение без дефектов в сварном шве. В программе 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 максимальных пластических деформаций, находящийся он находится в сварном шве и переходящий в основной металл. Максимальные деформации сконцентрированы в зоне сплавления.

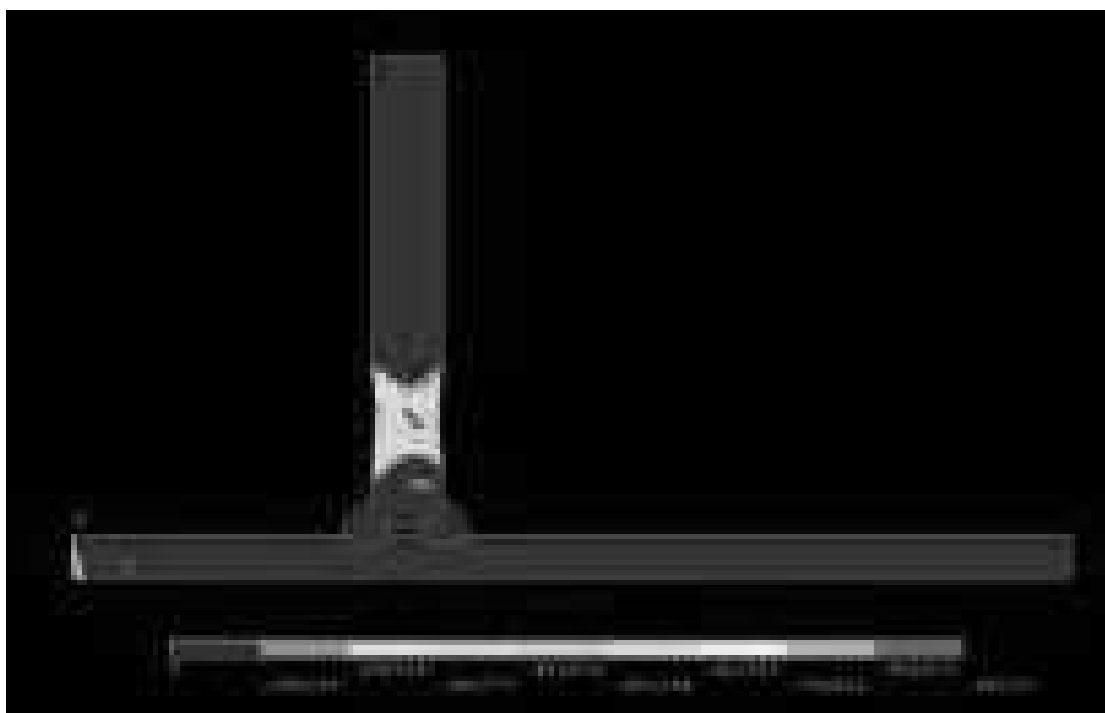
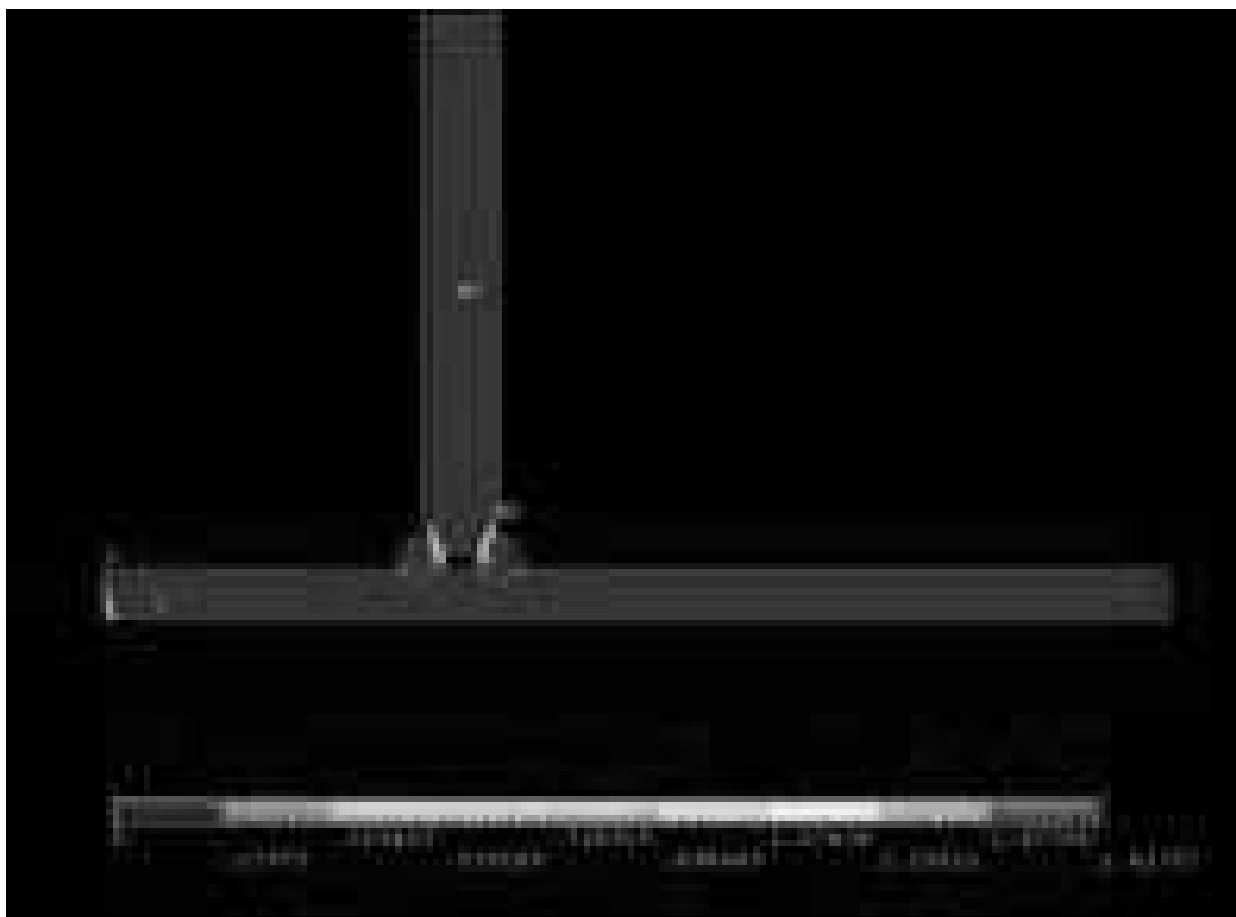


Рисунок 2.17 – Пластические деформации при растяжения сварного не равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=30$ кгс/мм²

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.17). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось тавровое соединение с подрезами 1 мм. В программе 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 максимальных пластических деформаций, находящийся в основном металле. Максимальные деформации сконцентрированы в основном металле.



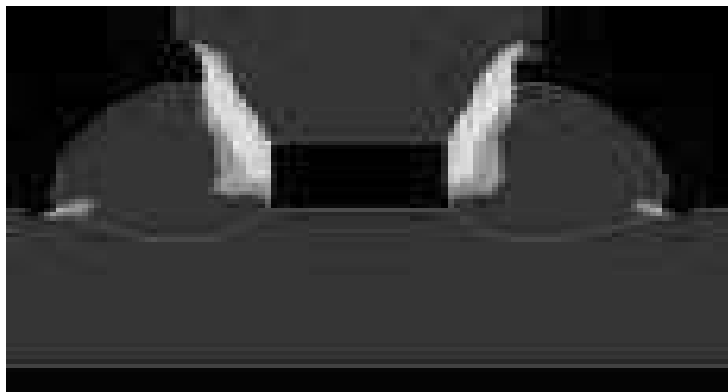


Рисунок 2.18 – Пластические деформации при растяжения сварного равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=25$ кгс/мм²

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.18). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось тавровое соединение с подрезами 1 мм. В программе ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25$ кгс/мм², предел текучести сварного шва $\sigma_T = 25$ кгс/мм². Был выявлен очаг максимальных пластических деформаций, находящийся он находится около подрезов в сварном шве и переходящий в основной металл. Максимальные деформации сконцентрированы на границе подрезов в основном металле.

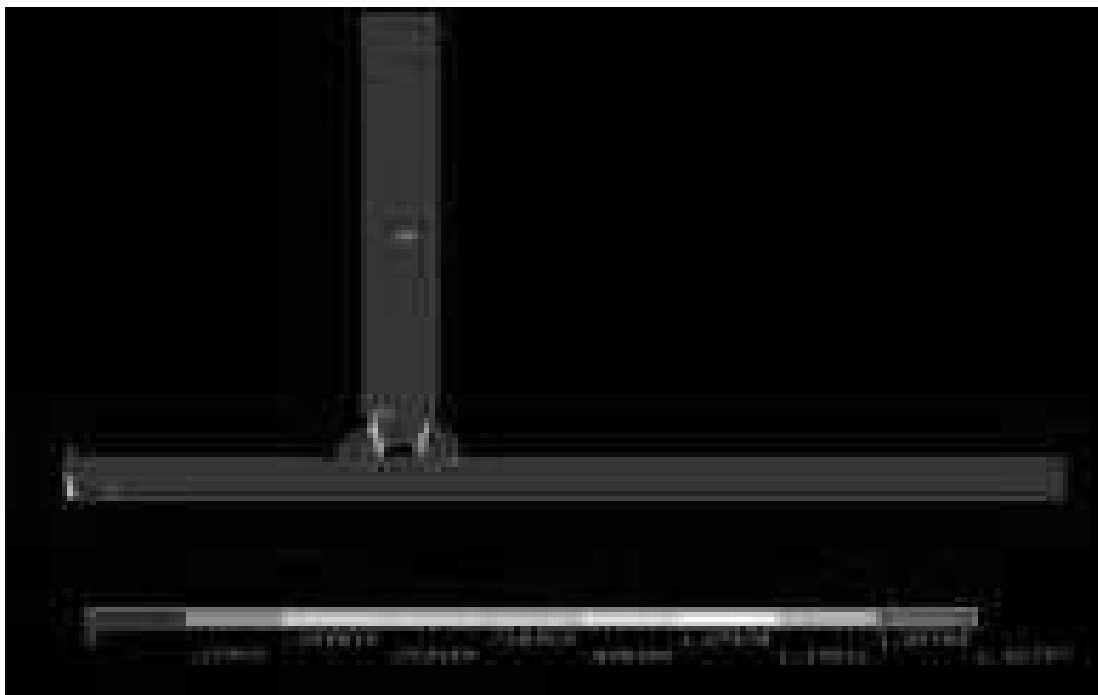
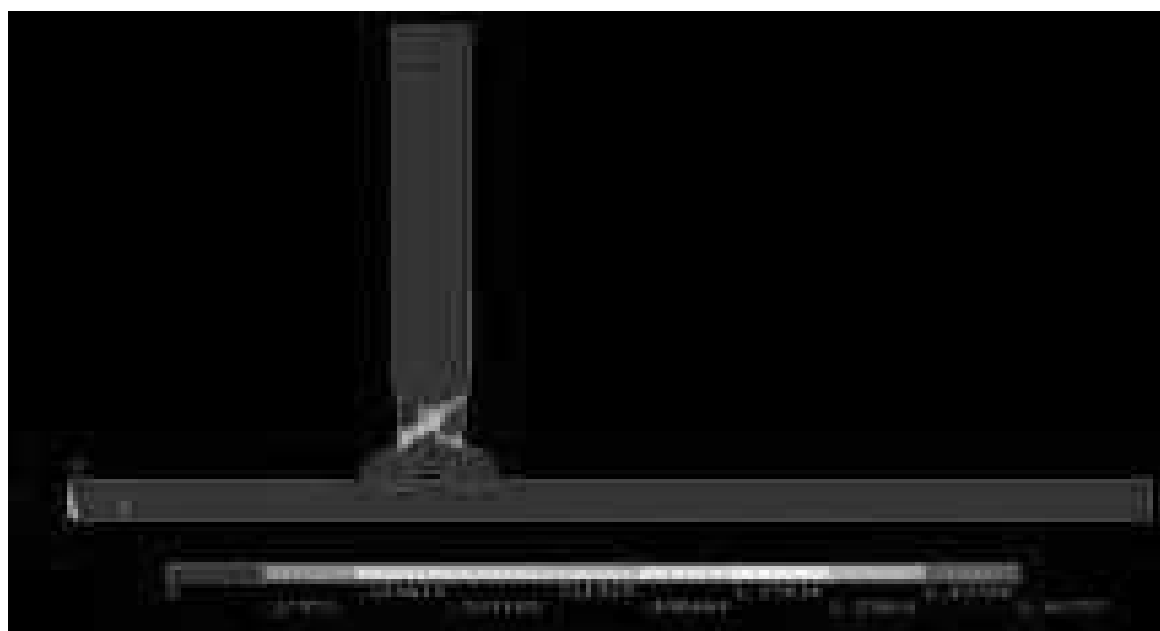




Рисунок 2.19 – Пластические деформации при растяжения сварного не равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=30$ кгс/мм²

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.19). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось тавровое соединение с подрезами 1 мм. В программе 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 максимальных пластических деформаций, находящийся он находится около подрезов в сварном шве и переходящий в основной металл. Максимальные деформации сконцентрированы на границе подрезов в основном металле. С повышением уровня пластичности сварного шва на 5 кгс/мм², пластические деформации остались в тех же местах что и пределе текучести сварного шва $\sigma_T = 25$ кгс/мм².



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

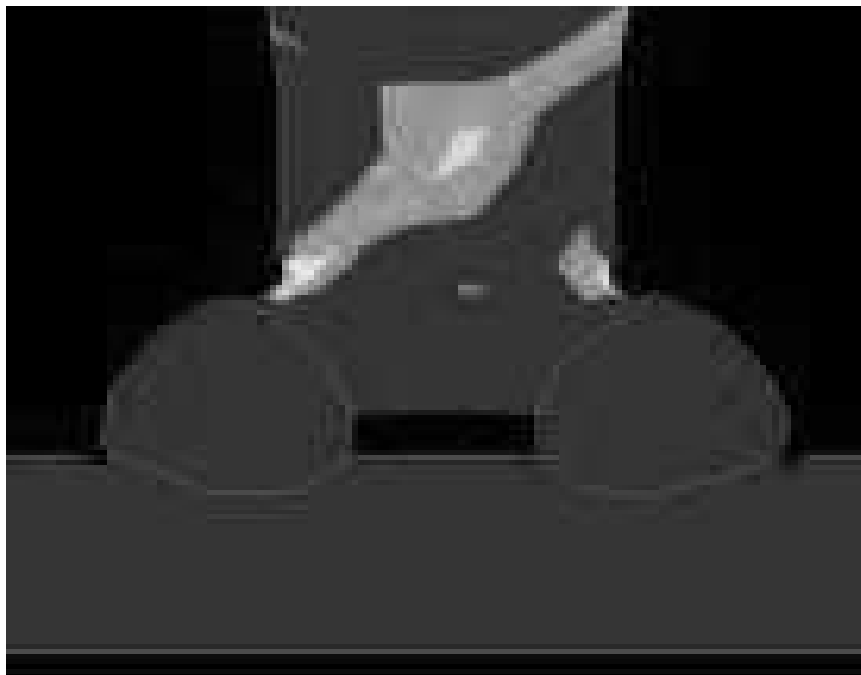


Рисунок 2.20 – Пластические деформации при растяжения сварного не равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS Предел текучести сварного шва $\sigma_T=50 \text{ кгс/мм}^2$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.20). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось тавровое соединение с подрезами 1 мм. В программе 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 максимальных пластических деформаций, находящийся он находится около подрезов в основном металле и переходящий в основной металл. Максимальные деформации сконцентрированы на границе подрезов в основном металле. С повышением уровня пластичности сварного шва на 20 кгс/мм^2 , пластические деформации переместилась в основной металл.

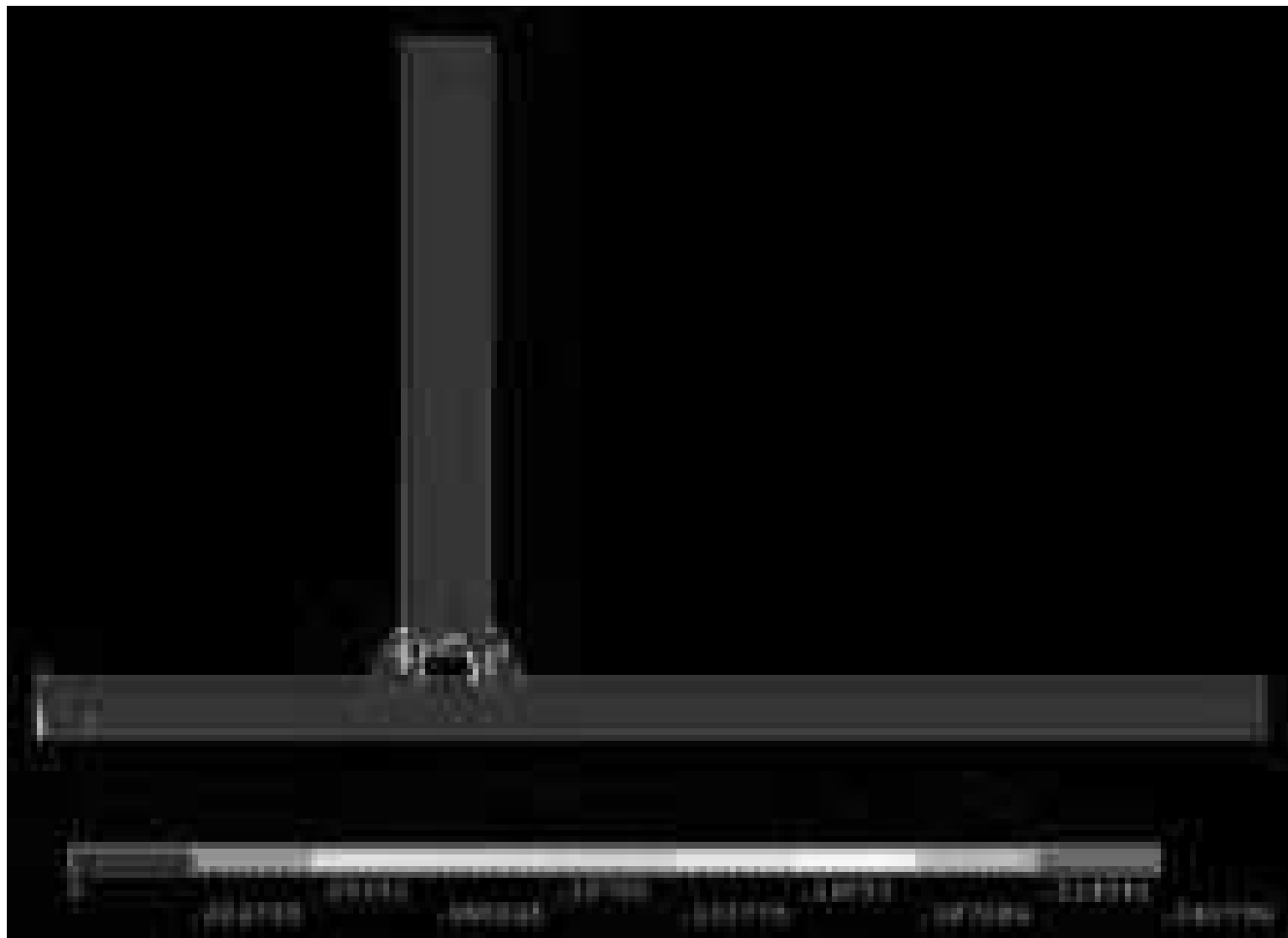


Рисунок 2.21 – Пластические деформации при растяжения сварного равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS Предел текучести сварного шва $\sigma_T=25 \text{ кгс/мм}^2$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.21). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

тавровое соединение с порами длиной 2 мм и высотой 0.4 мм. В программе 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 максимальных пластических деформаций, находящийся он находится около пор в сварном шве и перемещается к границе сплавления. Максимальные деформации сконцентрированы на границе пор в сварном шве.

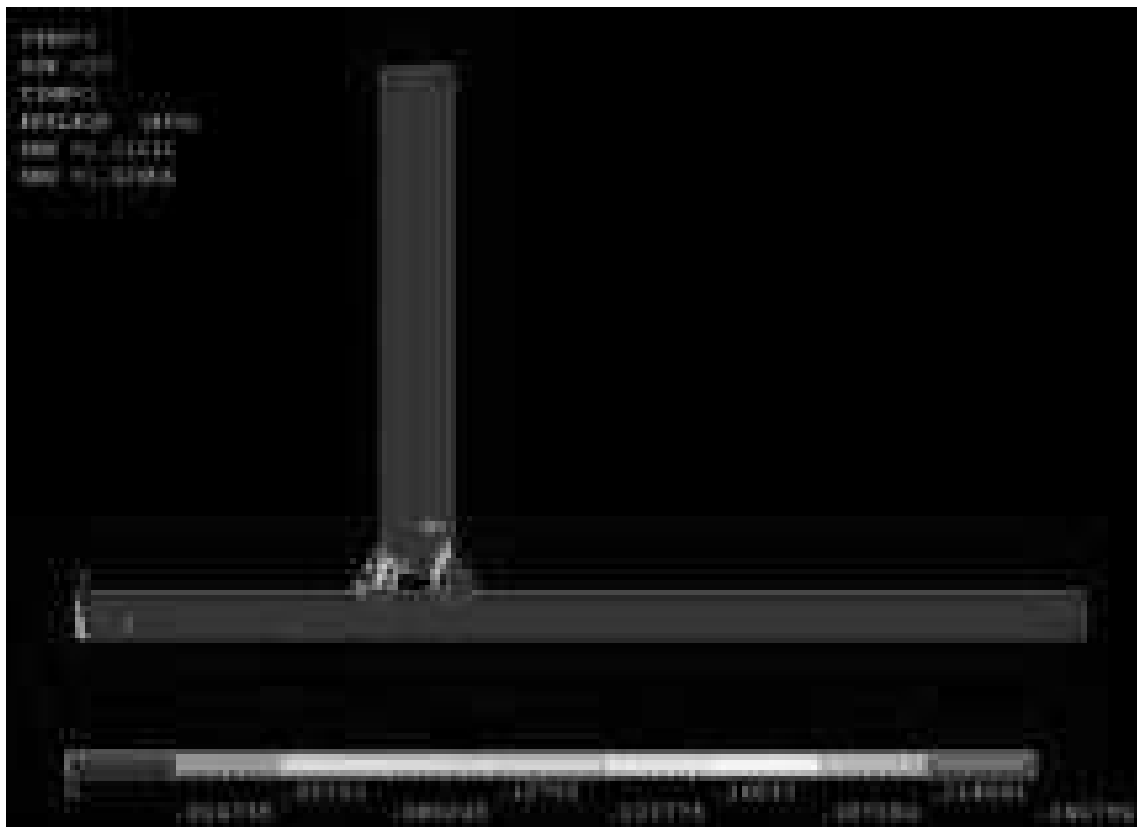
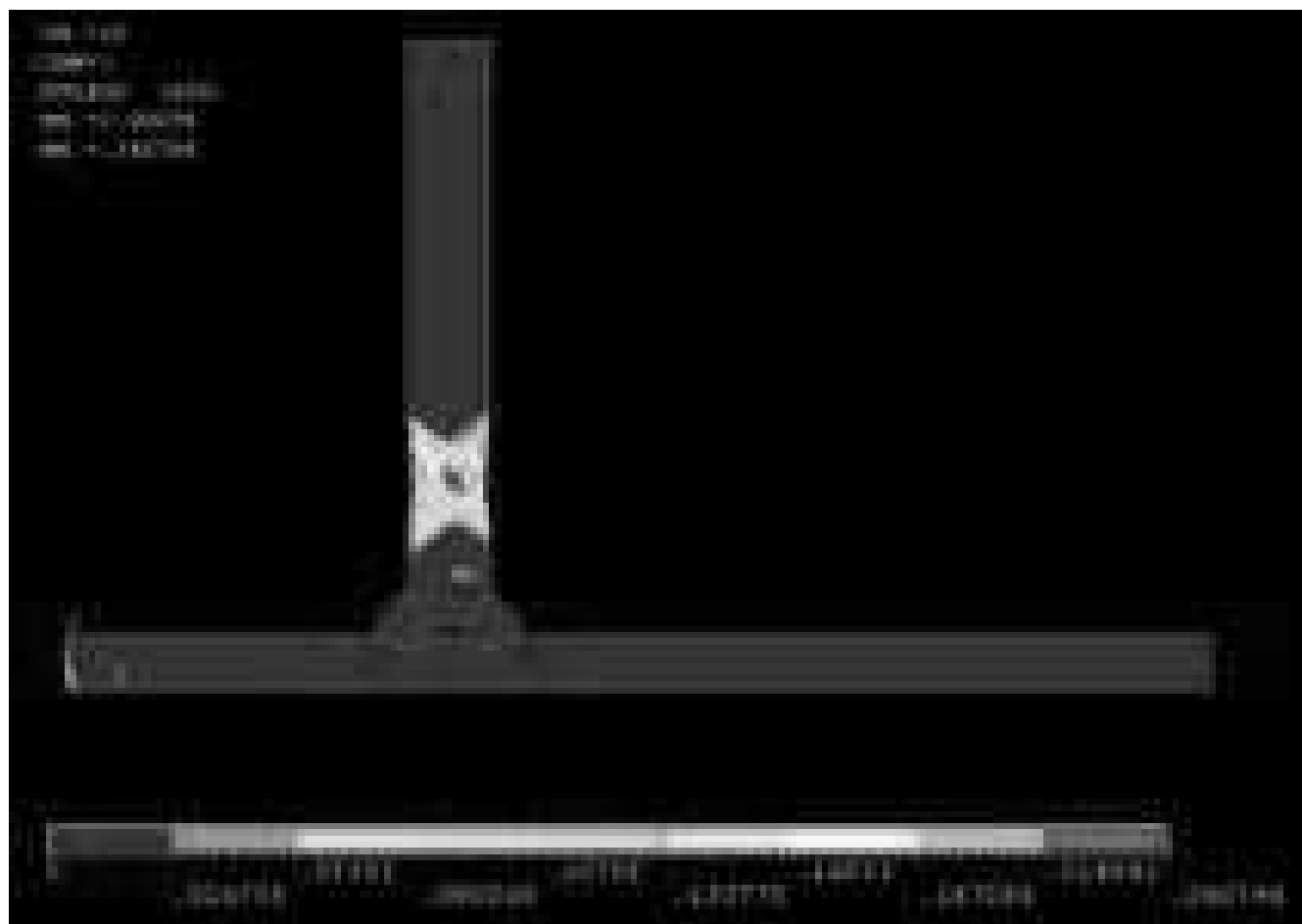


Рисунок 2.22 – Пластические деформации при растяжения сварного не равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=30 \text{ кгс/мм}^2$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.22). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось тавровое соединение с порами длиной 2 мм и высотой 0.4 мм. В программе ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T = 30 \text{ кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг максимальных пластических деформаций, находящийся он находится около пор в сварном шве и перемещается к границе сплавления. Максимальные деформации сконцентрированы на границе пор в левом сварном шве сварном шве, а в правом максимальные деформации приходится на границу сплавления.



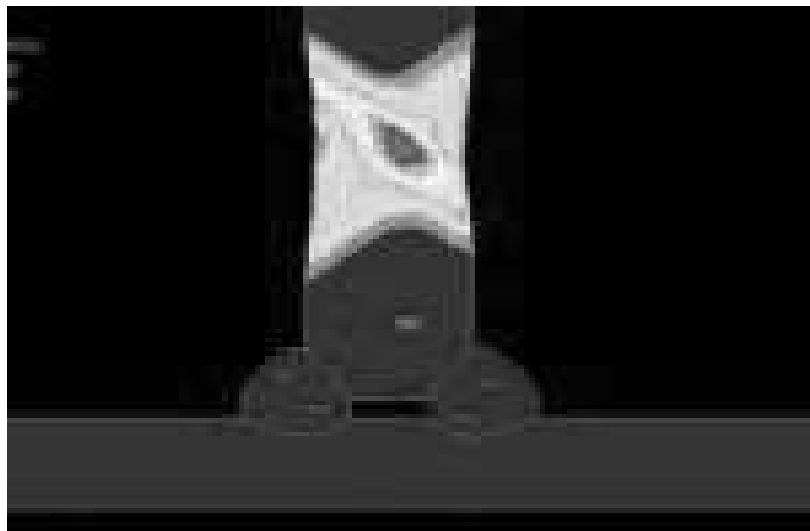
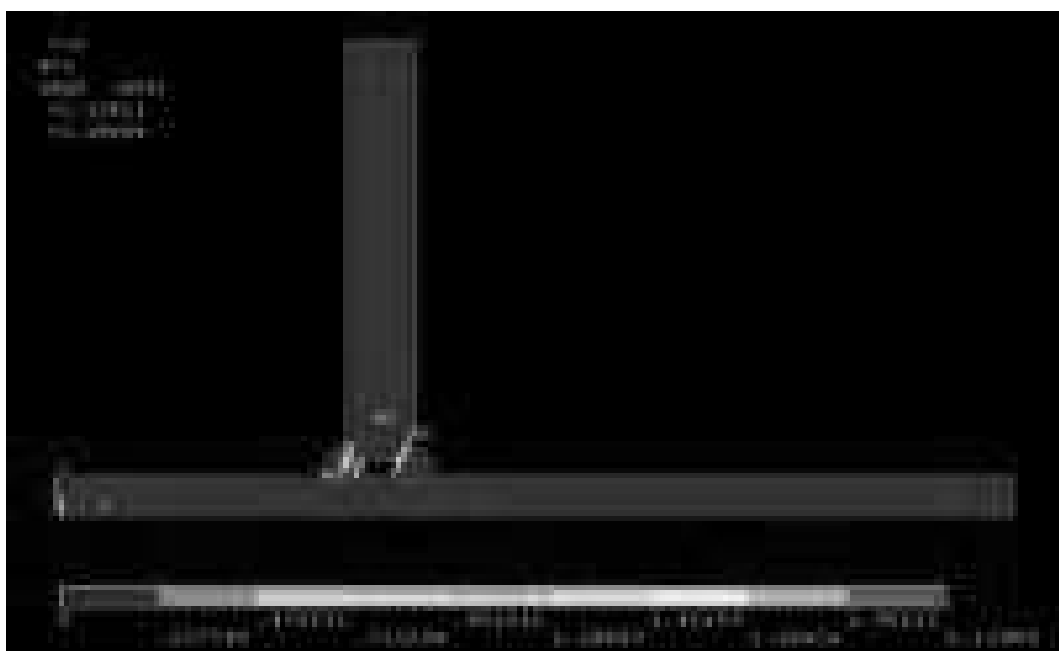


Рисунок 2.23 – Пластические деформации при растяжения сварного не равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=50$ кгс/мм²

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.23). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось тавровое соединение с порами длиной 2 мм и высотой 0.4 мм. В программе ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25$ кгс/мм², предел текучести сварного шва $\sigma_T = 50$ кгс/мм². Был выявлен очаг максимальных пластических деформаций, находящийся основном металле. Максимальные деформации сконцентрированы в центре основного металла.



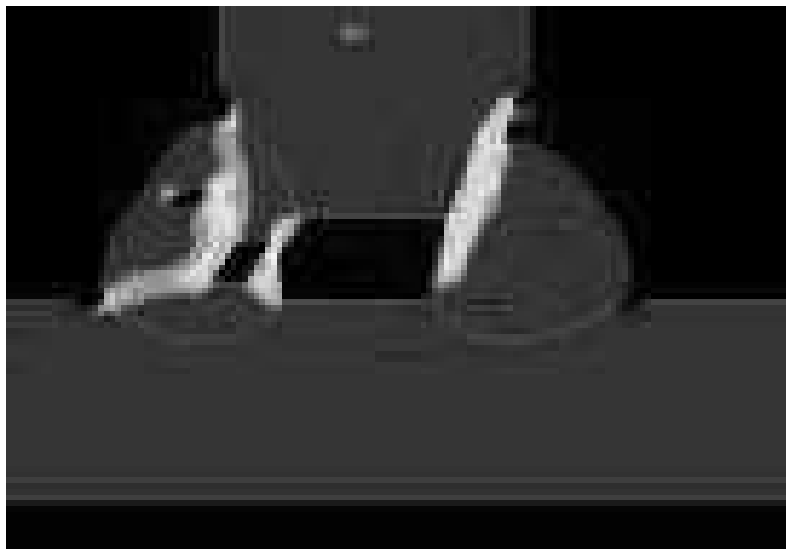


Рисунок 2.24 – Пластические деформации при растяжения сварного равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва $\sigma_T=25$ кгс/мм²

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.24). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось тавровое соединение с подрезами по 1мм. И порами длиной 2 мм и высотой 0.4 мм. В программе ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25$ кгс/мм², предел текучести сварного шва $\sigma_T = 25$ кгс/мм². Был выявлен очаг максимальных пластических деформаций, находящийся около пор и подрезов в сварном шве и перемещается к границе сплавления. Максимальные деформации сконцентрированы на границе пор и подрезов в левом сварном шве сварном шве, а в правом максимальные деформации приходится на границу сплавления.

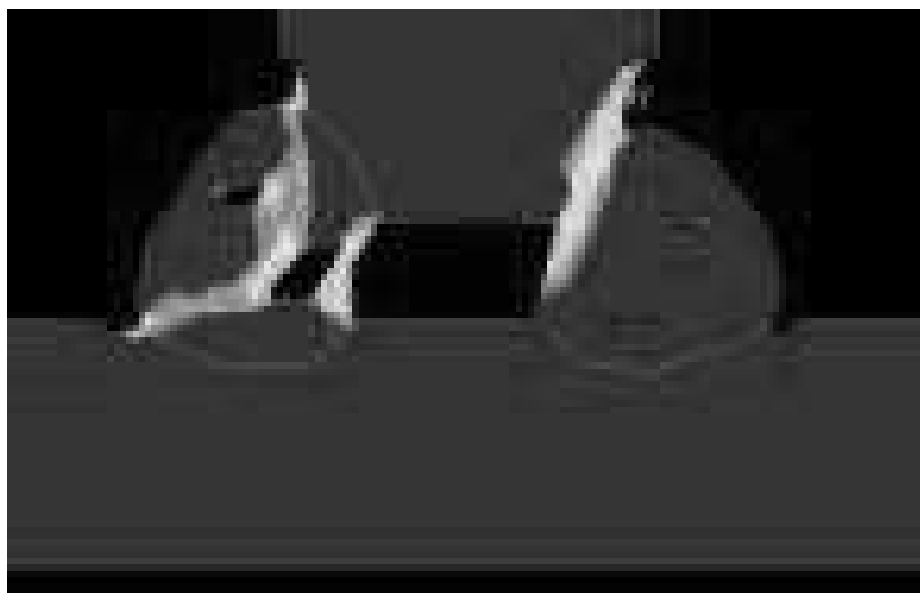
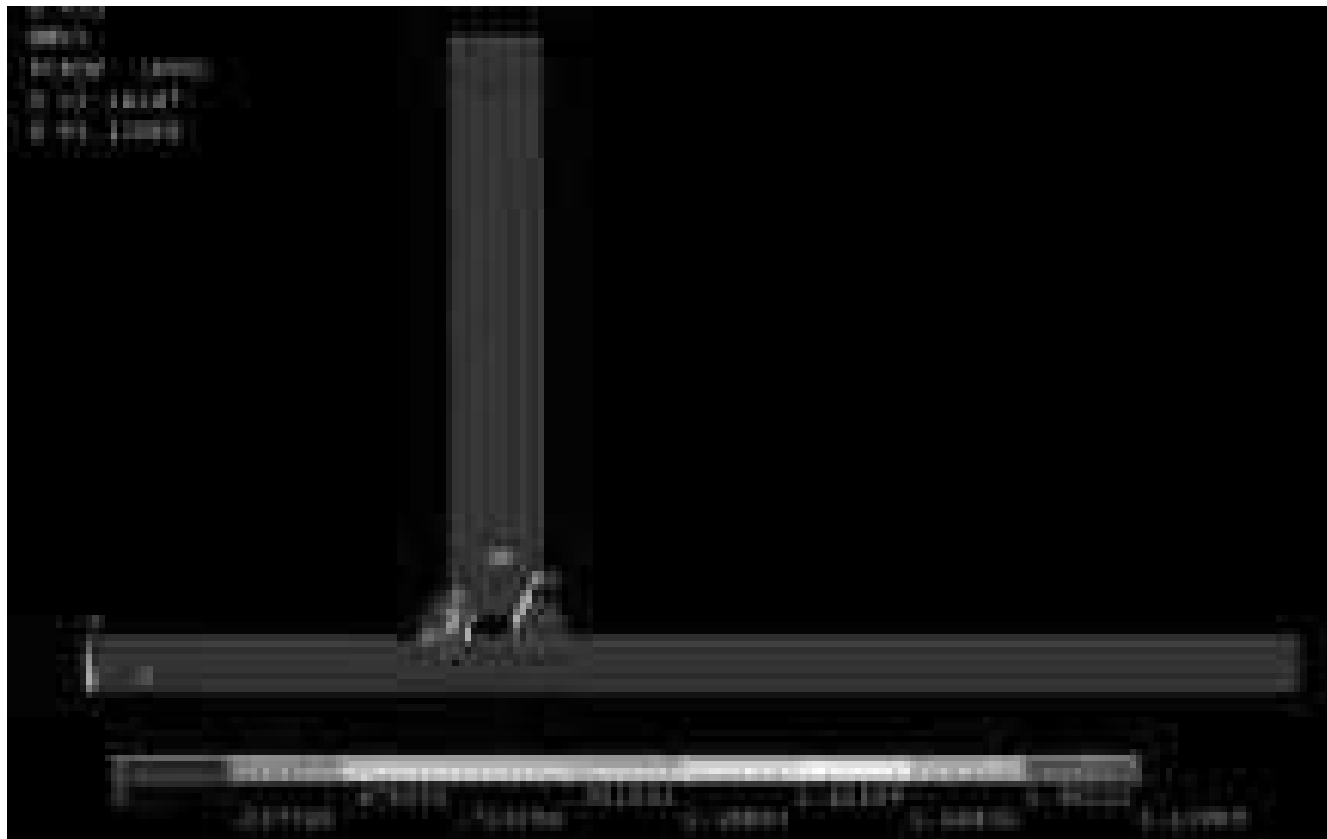
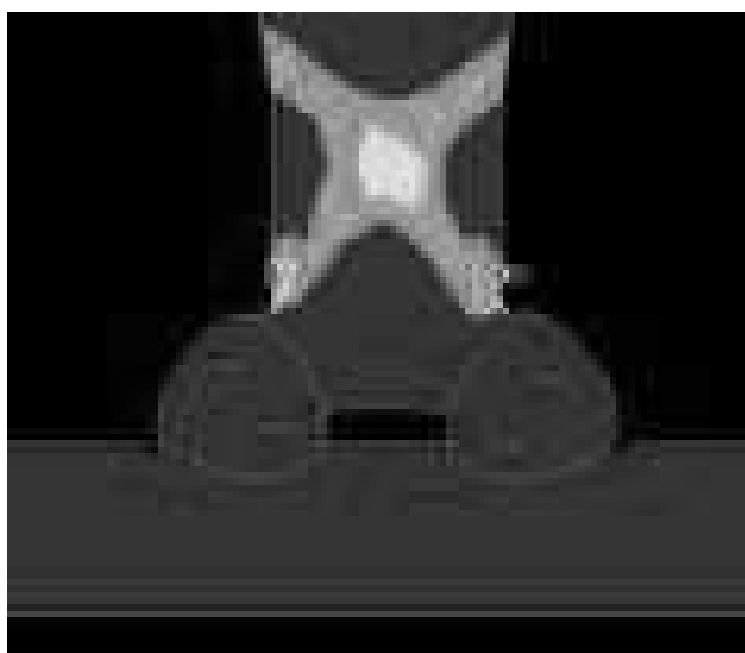
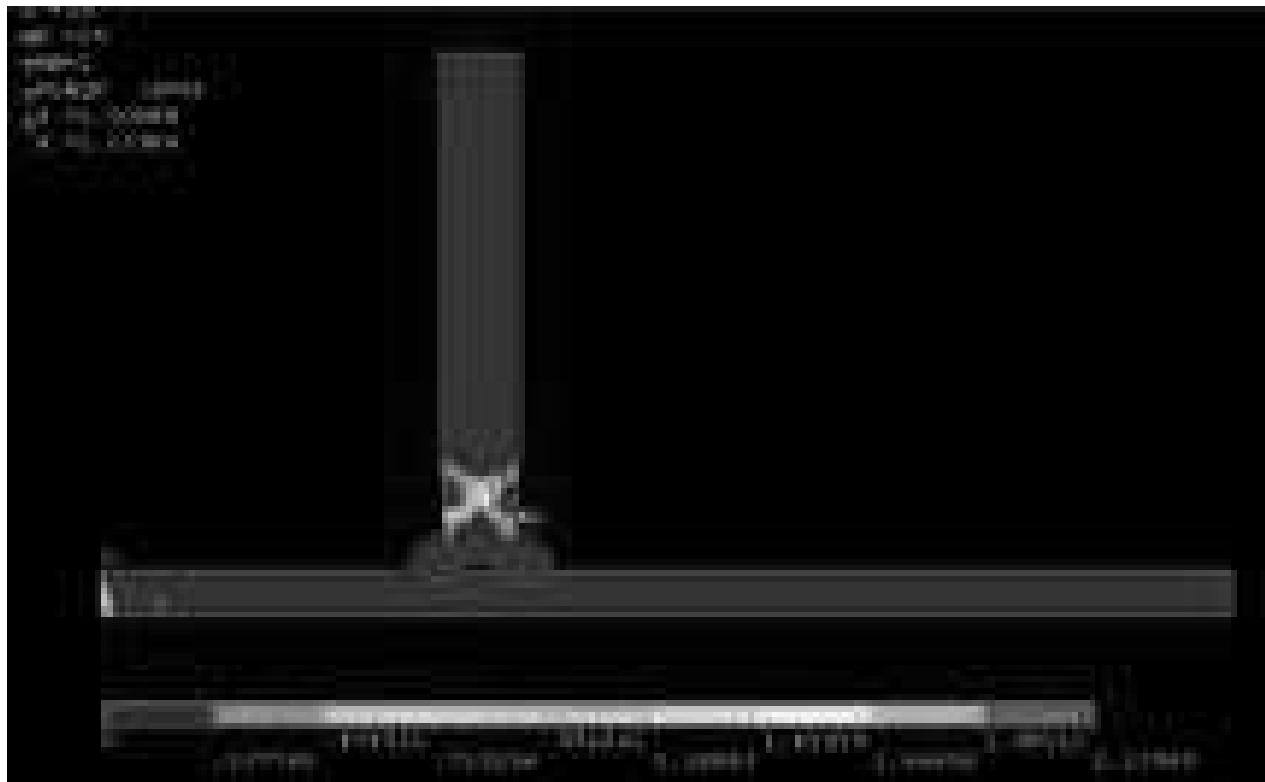


Рисунок 2.25 – Пластические деформации при растяжения сварного не равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS Предел текучести сварного шва $\sigma_T=30 \text{ кгс/мм}^2$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.25). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось тавровое соединение с подрезами по 1мм. И порами длиной 2 мм и высотой 0.4

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

мм. В программе ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T = 30 \text{ кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг максимальных пластических деформаций, находящийся около пор и подрезов в сварном шве и перемещается к границе сплавления. Максимальные деформации сконцентрированы на границе подреза с правой стороны в основном металле на границе сплавления.



					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

Рисунок 2.26 – Пластические деформации при растяжения сварного не равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS Предел текучести сварного шва $\sigma_T=50 \text{ кгс/мм}^2$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 2.26). Испытанию на растяжение по оси Y подвергалось тавровое соединение с подрезами по 1мм. И порами длиной 2 мм и высотой 0.4 мм. В программе ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T = 30 \text{ кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг максимальных пластических деформаций, находящийся в основном металле. Максимальные деформации сконцентрированы на границе подреза в основном металле.

2.4 Вывод по второй главе

Результаты работы таврового соединения без дефектов и с дефектами можно увидеть на рисунках 2.16-2.26. Предел текучести сварного шва изменялся от 250 Мпа до 400 Мпа. По результатам эксперимента можно отметить, что одно из основных влияний на расположение максимальных пластических деформаций в сварном соединении оказывает изменяемый предел текучести сварного шва. Из этого следует что при увеличений твердости шва пластические деформации переходят от сварного соединения в основной металл. Так же можно заметить, что при наличии подрезов в сварном соединении максимальные концентрации пластической деформации остаются на границе подрезов, не в зависимости от предела текучести сварного шва. В отличии от сварного соединения с подрезами, в сварных соединениях где присутствуют только поры с увеличением предела текучести сварного шва, пластические деформации полностью перейдут в основной металл и будут на много выше чем в сварном шве на границе пор.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

3 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ В ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ ИЗГИБЕ

Будет использована конструкция которая описана выше, такая же, как и при испытаниях на растяжение. Рассматриваемы дефекты остаются теми же, подрезы размером 1мм и поры длиной 2 мм. И высотой 0.4мм. Создание модели для испытаний на изгиб будет отличаться от модели которая используется для испытаний на растяжение тем то приложенная нагрузка будет по оси X, а не по оси Y.(Рисунок 3.1)

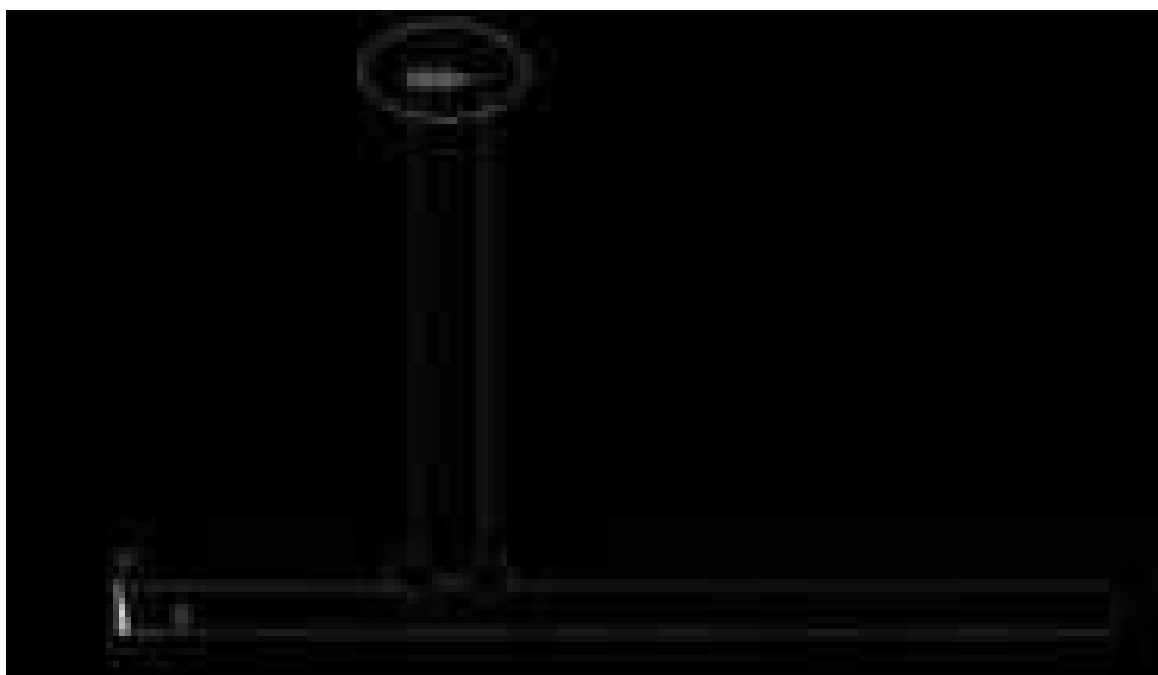


Рисунок 3.1 – Вид закрепления модели таврового соединения где задано перемещение по оси

3.1 Проведение эксперимента на изгиб

После создание модели приступаем к проведению численного эксперимента. Первым шагом является описание прикладываемых нагрузок к сварному соединению.

Прикладываем нагрузку к элементам сварной конструкции в программе ANSYS:

- 1) Нагрузка перемещением 10мм изгибом по оси X;
- 2) Предел текучести шва будет меняться в ходе эксперимента.

3) Рассмотрены тавровые соединения с без дефектов и с дефектами

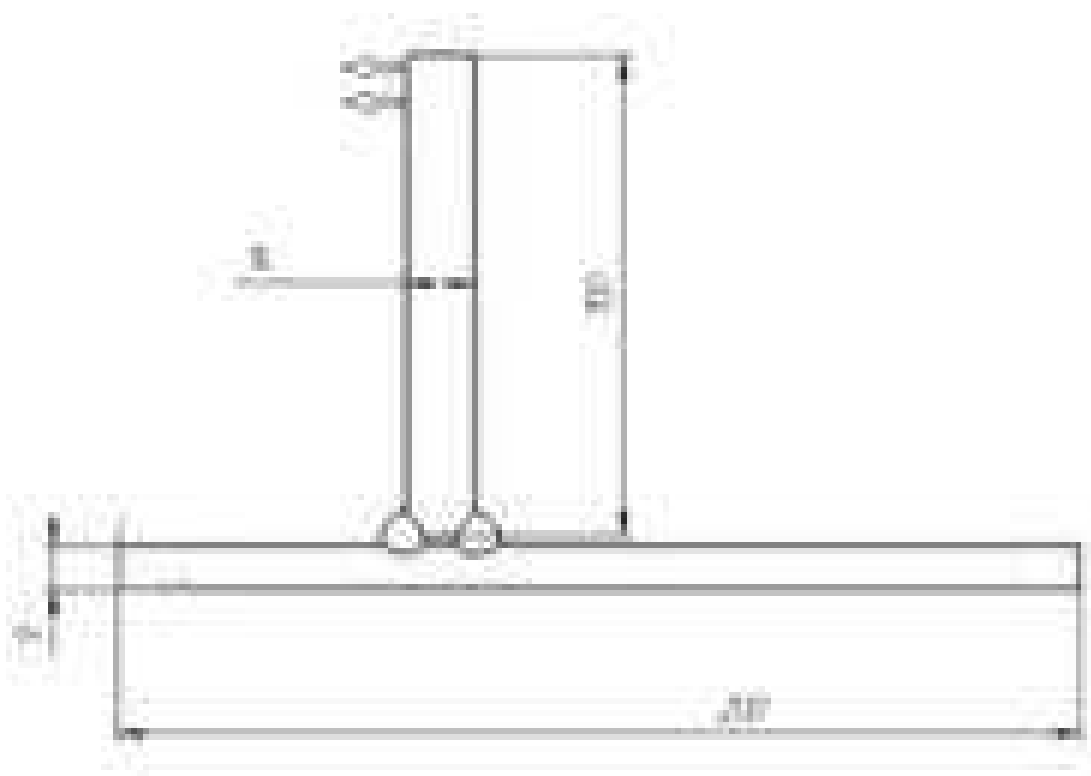


Рисунок 3.2 – Задаем нагрузку изгибом перемещением по оси X для таврового соединения без дефектов на расстояние 10мм

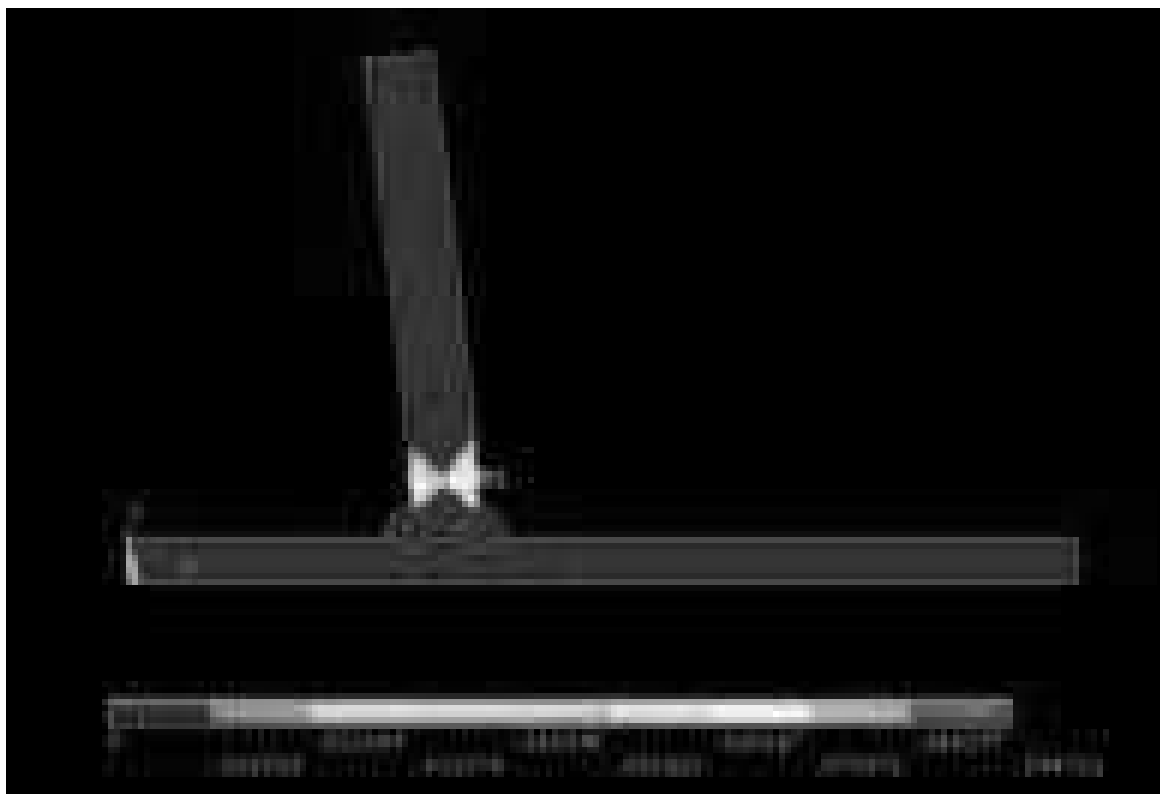
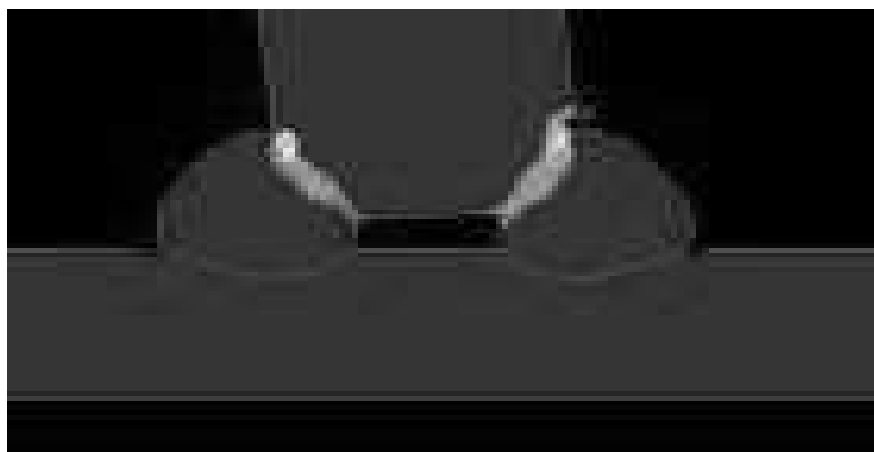
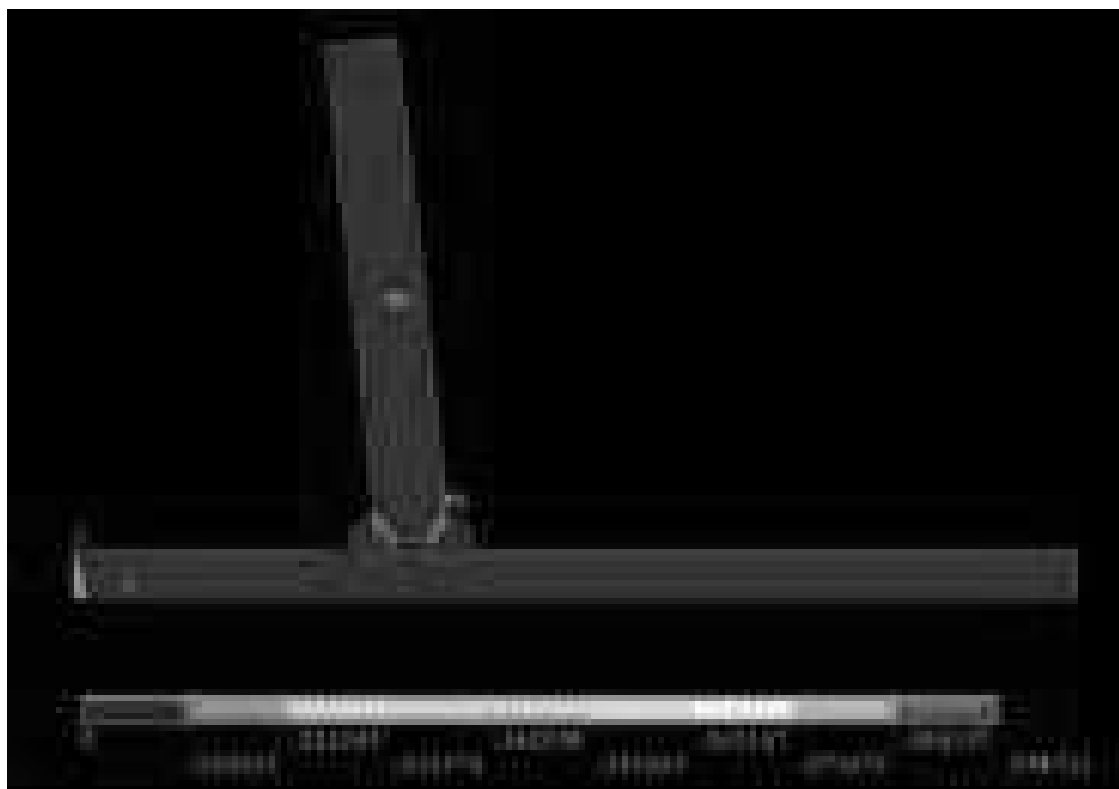


Рисунок 3.3 – Пластические деформации при изгибе сварного равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 3.3). Испытанию на изгиб по оси X подвергалось тавровое соединение без дефектов в сварном шве. В программе 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 максимальных пластических деформаций, находящийся в основной металл. Максимальные деформации сконцентрированы на краях основного металла.



					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79

Рисунок 3.4 – Пластические деформации при изгибе сварного неравнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 3.4). Испытанию на изгиб по оси X подвергалось тавровое соединение без дефектов в сварном шве. В программе 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 максимальных пластических деформаций, находящийся в зоне сплавления. Максимальные деформации сконцентрированы на краях подрезов в основном металле.

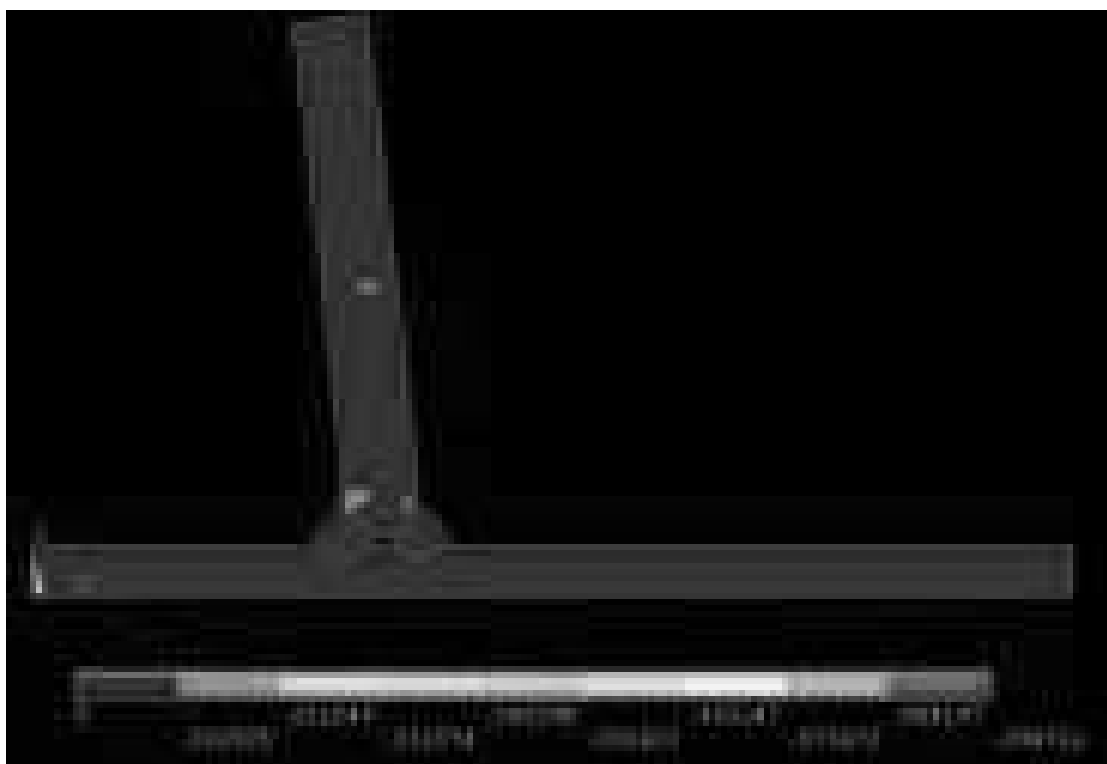


Рисунок 3.5 – Пластические деформации при изгибе сварного неравнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 30 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 3.5). Испытанию на изгиб по оси X подвергалось тавровое соединение без дефектов в сварном шве. В программе ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T = 30 \text{ кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг максимальных пластических деформаций, находящийся в зоне сплавления. Максимальные деформации сконцентрированы на краях подрезов в основном металле.

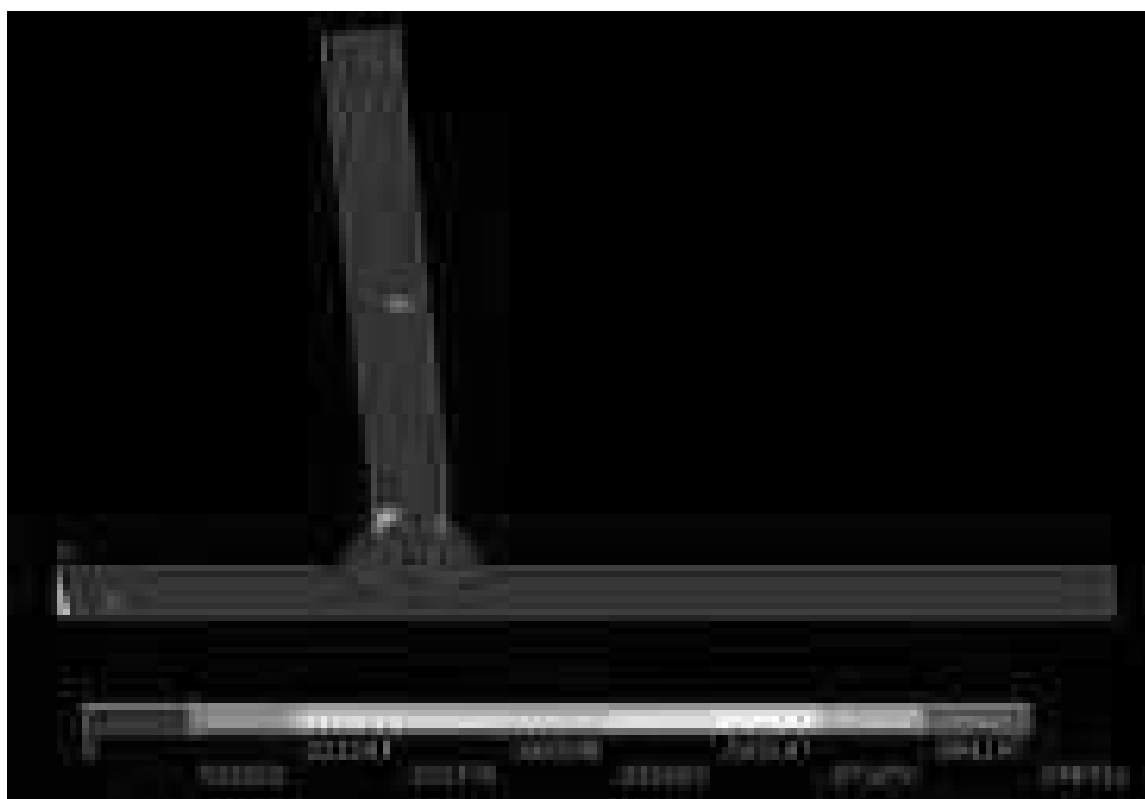
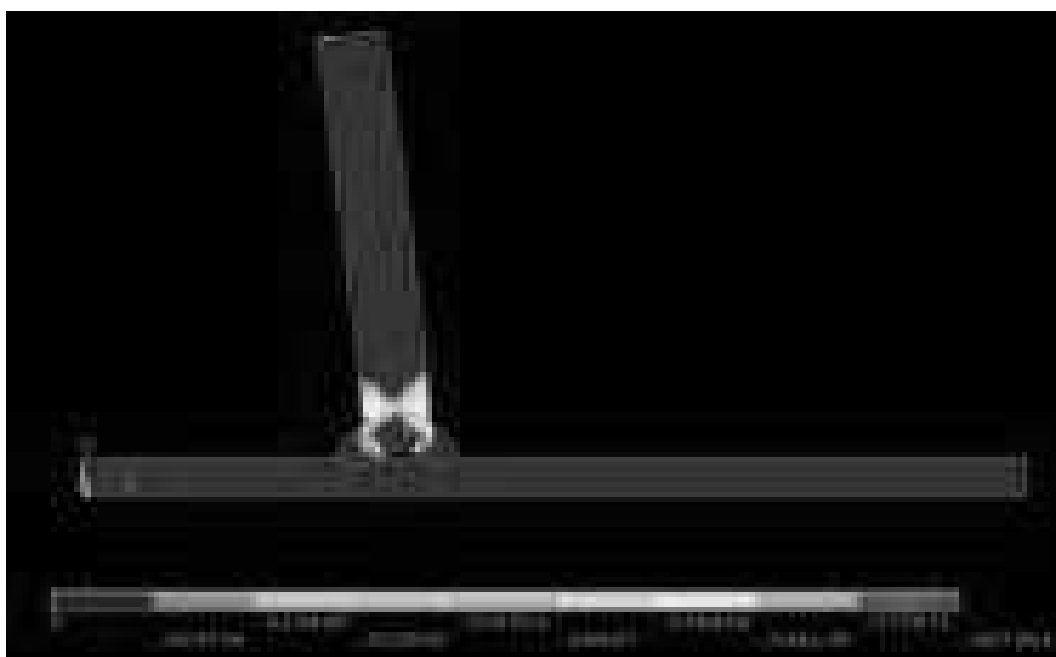




Рисунок 3.6 – Пластические деформации при изгибе сварного неравнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 50 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 3.6). Испытанию на изгиб по оси X подвергалось тавровое соединение без дефектов в сварном шве. В программе 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 максимальных пластических деформаций, находящийся в зоне сплавления. Максимальные деформации сконцентрированы на краях подрезов в основном металле.



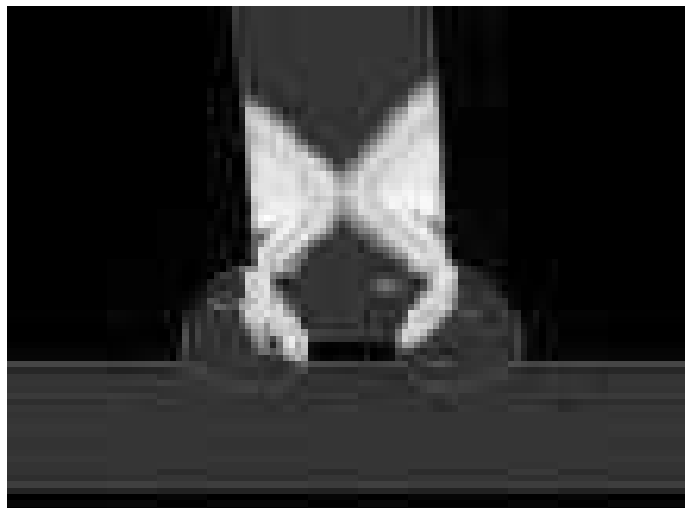
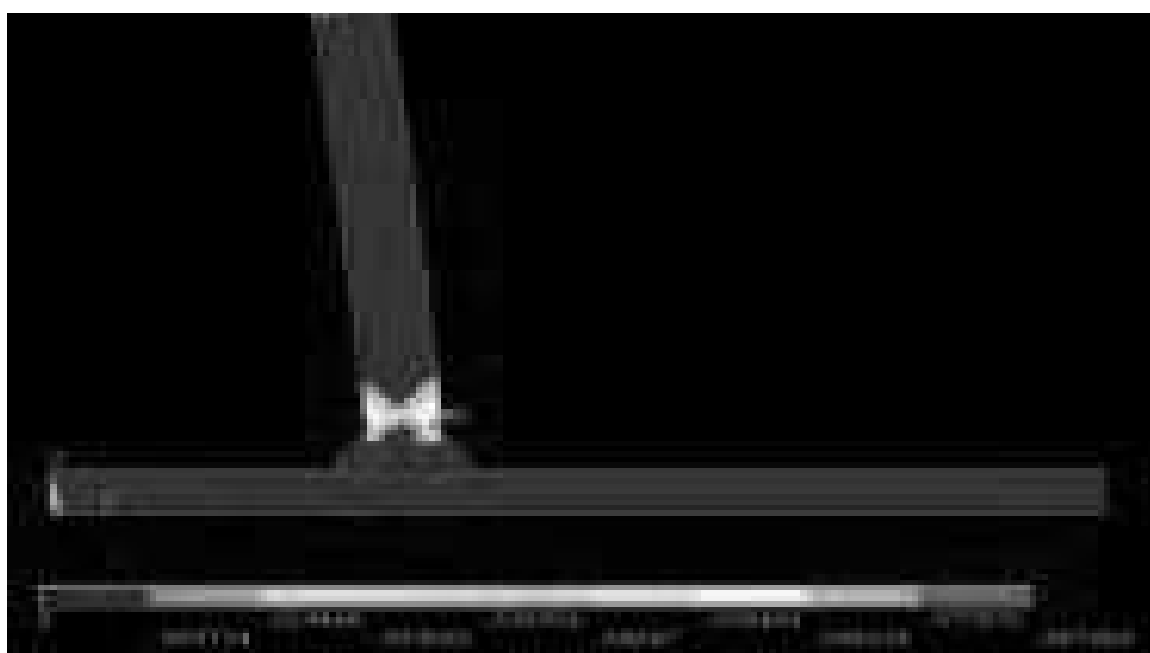


Рисунок 3.7 – Пластические деформации при изгибе сварного равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 3.7). Испытанию на изгиб по оси X подвергалось тавровое соединение без дефектов в сварном шве. В программе 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 максимальных пластических деформаций, находящийся в сварном шве и переходящий в основной металл. Максимальные деформации сконцентрированы в основном металле.



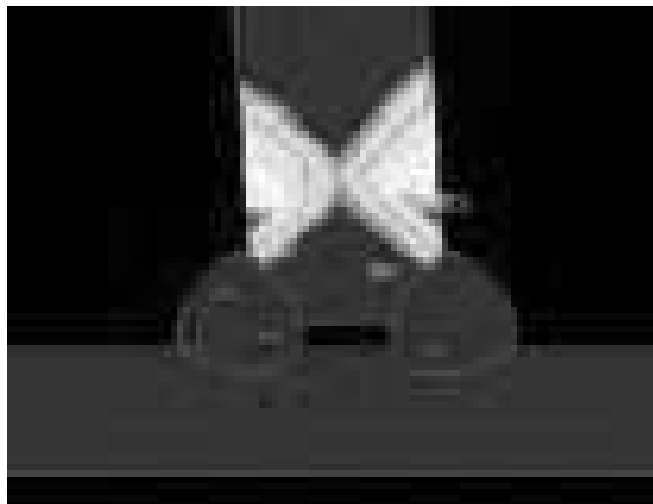


Рисунок 3.8 – Пластические деформации при изгибе сварного неравнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 30 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 3.8). Испытанию на изгиб по оси X подвергалось тавровое соединение без дефектов в сварном шве. В программе ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T = 30 \text{ кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг максимальных пластических деформаций, находящийся в зоне сплавления и переходящий в основной металл. Максимальные деформации сконцентрированы в основном металле.

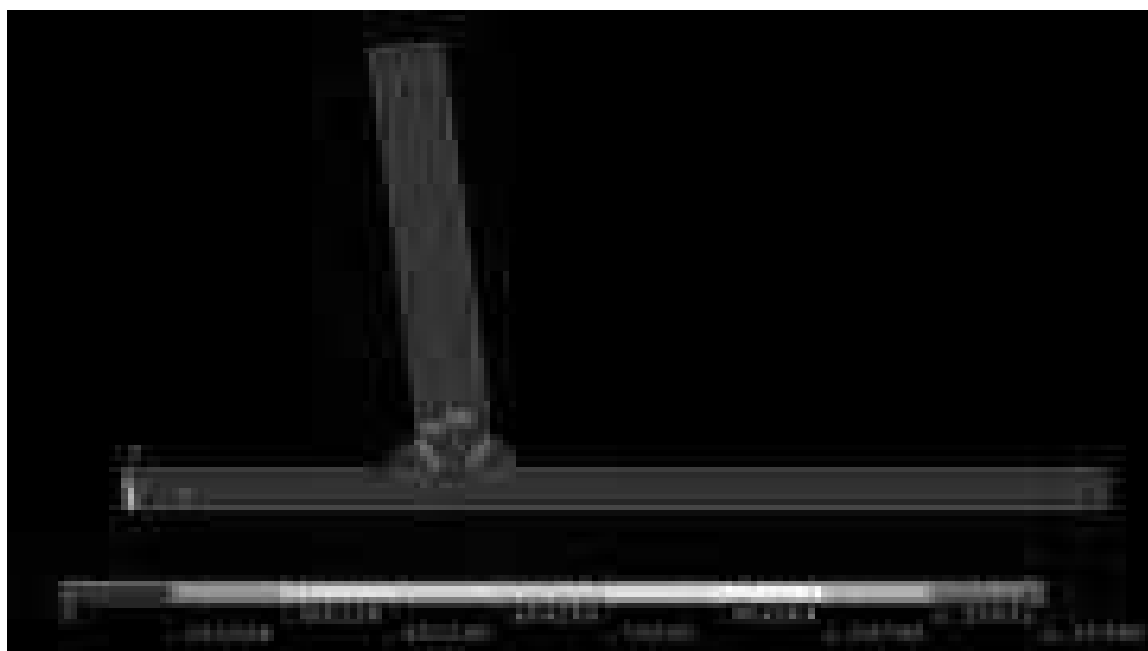
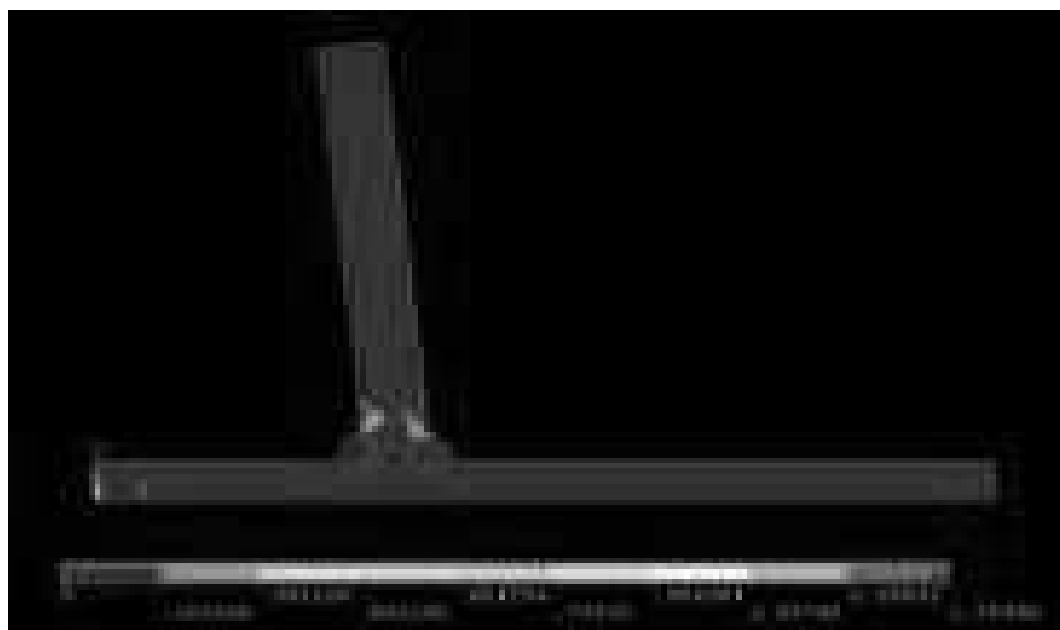




Рисунок 3.9 – Пластические деформации при изгибе сварного равнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 3.9). Испытанию на изгиб по оси X подвергалось тавровое соединение без дефектов в сварном шве. В программе 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 максимальных пластических деформаций, находящийся в зоне сплавления. Максимальные деформации сконцентрированы на границе подрезов в основном металле.



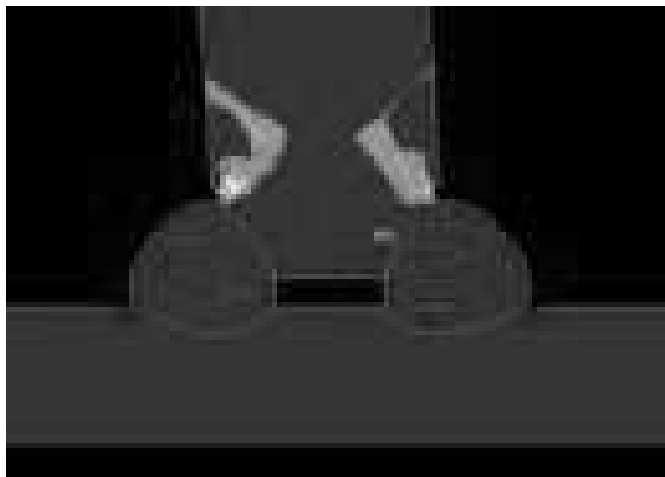


Рисунок 3.10 – Пластические деформации при изгибе сварного неравнопрочного соединения, полученные в программе ANSYS. Предел текучести сварного шва

$$\sigma_T = 30 \text{ кгс/мм}^2$$

В ходе данного расчёта было получено наглядная картина пластических деформаций (Рисунок 3.10). Испытанию на изгиб по оси X подвергалось тавровое соединение без дефектов в сварном шве. В программе ANSYS были заложены следующие свойства соединения. Предел текучести основного материала $\sigma_T = 25 \text{ кгс/мм}^2$, предел текучести сварного шва $\sigma_T = 30 \text{ кгс/мм}^2$. Был выявлен очаг максимальных пластических деформаций, находящийся в основном металле. Максимальные деформации сконцентрированы на границе подрезов в основном металле.

3.2 Вывод по третьей главе

Результаты работы таврового соединения без дефектов и с дефектами можно увидеть на рисунках 3.3-3.10. Предел текучести сварного шва изменялся от 250 Мпа до 400 Мпа. По результатам эксперимента можно отметить, что одним из основных влияний на расположение максимальных пластических деформаций в сварном соединении оказывает изменяемый предел текучести сварного шва, как и при испытаниях на растяжение. Из этого следует что при увеличений твердости шва пластические деформации переходят от сварного соединения в основной металл. Так же можно заметить, что при наличии подрезов в сварном соединении максимальные концентрации пластической деформации остаются на границе подрезов, не в зависимости от предела

текучести сварного шва. В отличии от сварного соединения с подрезами, в сварных соединениях где присутствуют только поры с увеличением предела текучести сварного шва, пластические деформации полностью перейдут в основной металл и будут на много выше чем в сварном шве на границе пор.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		87

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После проведения анализа существующих методов оценки разрушений сварных конструкций с угловыми швами работающих на растяжение и изгиб, была сформулирована цель и поставлены задачи для достижения этой цели.

После проведение моделирования и качественной оценки прочности были получены результаты, представленные на рисунка, для растяжение Рис.2.16-Рис.2.26, для изгиба Рис.3.3-3.10. На основе полученных результатов можно сделать вывод что одним из основных влияний на расположение максимальных пластических деформаций в сварном соединений оказывает изменяемый предел текучести сварного шва, как и при испытаниях на растяжение так и при испытаниях на изгиб. Из этого следует что при увеличений твердости шва пластические деформации переходят от сварного соединения в основной металл. Так же можно заметить, что при наличии подрезов в сварном соединении максимальные концентрации пластической деформации остаются на границе подрезов, не в зависимости от предела текучести сварного шва. В отличии от сварного соединения с подрезами, в сварных соединениях где присутствуют только поры с увеличением предела текучести сварного шва, пластические деформации полностью перейдут в основной металл и будут на много выше чем в сварном шве на границе пор.

Главным выводом данной работы являться что растяжение (сжатие) и изгиб – одни из самых основных типов нагружений. Зачастую, они воздействуют на сварные узлы одновременно в составе сложного нагружения. Результаты настоящей работы показали, что можно сознательно регулировать механическую неоднородность сварных тавровых соединений, работающих как при растяжении-сжатии, так и при изгибе, с целью увеличения их несущей способности. Причем это можно делать по единым принципам, т.е. если брать во внимание что такое соединение должно быть не равнопрочным $\sigma_{\text{мш}} > \sigma_{\text{ом}}$, предел текучести металла шва увеличивать исходя от предела текучести основного металла то пластические деформации из металла шва и из зоны сплавления перейдут в основной металл. Так же стоит отметить что

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		88

наличие пор в сварном шве не является критичным, так как при увеличении предела текучести металла шва пластические деформации перейдут в основной металл, и сварная конструкция будет разрушаться в основном металле. Если конструкция имеет подрезы или поры и подрезы вместе, то максимальная концентрация не зависимо от того равнопрочное или не равнопрочное соединение будет на границах подрезов. Отсюда следует вывод что сварная конструкция начнет свое разрушение именно с границы подреза в основном металле.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		89

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.Акулов, И.А. Справочник по сварке Том 4 / И.А. Акулов — М.: Машиностроение, 1971. — 416 с.
- 2.Лившиц, Л.С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л.С. Лившиц — М.: Машиностроение, 1989. — 336 с.
- 3.Борт, М.М. Справочник электросварщика / М.М. Борт и др. — М.: Машгиз; Издание 3-е, переработанное, 1962. — 752
- 4.Николаев, Г.А. Расчёт, проектирование и изготовление сварных конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин и др — М.: «Высшая школа», 1971. — 356 с.
- 5.Сатель, Е.А. Проблемы развития технологии машиностроения / Э.А. Сатель — М.: Машиностроение, 1968. — 592 с.
- 6.Николаев, Г.А. Сварные конструкции / Г.А. Николаев — М.: «Высшая школа», 1990. — 446 с.
- 7.Чернышов, Г.Г. Справочник электросварщика и газосварщика / Г.Г. Чернышов — М.: Машиностроение, 1987. — 416 с.
- 8.Медоваров, Б.И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов / Б. И. Медовар — М.: Машиностроение, 1966. — 552 с.
- 9.Земзин, В.Н. Жаропрочность сварных сталей / В.Н. Земзин — М.: Машиностроение, 1972. — 634 с.
- 10.Халимов, А.Т. Техническая диагностика и оценка ресурсов аппарата / А.Т. Халимов, Р.С. Зайнуллин, А.А. Халимов — Уфа: УГНТУ, 2001. — 408 с.
- 11.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.
- 12.Зайнуллин, Р.С. Сертификация нефтегазохимического оборудования по параметрам испытаний / Р.С. Зайнуллин — М.: Машиностроение, 1998. — 448 с.
- 13.Колев, В.Т. Сопротивление материалов / В.Т. Колев — М.: Машиностроение, 1988. — 316с.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		90

- 14.Ивлев, Д.Д. Механика пластических сред Том 2 / Д.Д. Ивлев — М.: Физматлит, 2001. — 448 с.
- 15.Бирюлев, В.В Проектирование металлических конструкций / В.В. Бирюлев — М.: Машиностроение, 1990. — 427с.
- 16.Котляревский, В.А. Безопасность резервуаров и трубопроводов / В.А. Котляревский — М.: Экономика и информатика, 2000, — 559с
- 17.Зайнуллин, Р.С. Критерии безопасного разрушения элементов трубопроводных систем с трещинами / Р.С. Зайнулин, Е.М. Морозов, А.А. Александров М.: Машиностроение, 2005. —316с.
- 18.Ревлин, Ю.И. Металлы и их заменители / Ю.И. Ревлин М.: Metallurgy, 1973. — 586с.
- 19.Бугай, Н.В Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования / Н.В. Бугай, Т.Г. Березина, И.И. Трунин — М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.
- 20.Иванцов, О.М. Надёжность магистральных нефтепроводов / О.М. Иванцов — М.: Машиностроение, 1985. —231 с.
- 21.Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин — М.: Машиностроение, 1983. — 359 с.
- 22.Зайнуллин, Р.С. Ресурсы элементов трубопроводных систем / Р.С. Зайнуллин – Уфа : Муницип. Науч.-техн. Центр «Безопасность эксплуатации слож. Техн. Систем», 2005 (Уфим. Полигр. Комб.). – 835 с.
- 23.Спасенко, И.В. Расчёт трубопроводов на ползучесть / И.В. Спасенко — М.: Машиностроение, 1998. — 118 с.
- 24.Батуев, Г.С. Испытательная техника Книга 1 / Г.С. Батуев — М.: Машиностроение, 1982.— 528 с.
- 25.Браун, Р.Х. Обработка металла резанием / Р.Х. Браун, И.Дж.А Армарево Пер. с англ. Пастухова В.А. — М.: Машиностроение, 1977. — 325 с.
- 26.Зайнуллин, Р.С. Сертификация нефтегазохимического оборудования по параметрам испытаний / Р.С. Зайнуллин — М.: Машиностроение, 1998. — 448 с.
- 27.Куликов, Д.В. Физическая природа разрушений / Д.В. Куликов — Уфа: 1999. – 240 с.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		91

28. Труфьяков, В.И. Усталость сварных соединений / В.И.Труфьяков. — Киев: Наукова думка, 1973. — 216 с.
- 29.Gurney. T.R. Fatigue of welded structures / T.R. Gurney. — Cambridge University Press, 1979. — 456 p
- 30.Макаров, И.И. Работоспособность сварных соединений с технологическими отклонениями: автореферат дис. На соискание ученой степени доктора техн. Наук/И.И. Макаров. — М.: Изд. МВТУ им. Н.Э. Баумана, — 1976. 32с.
- 31.Захаров М.Н. Критерий разрушения сварных стыковых соединений с внутренними дефектами / М.Н. Захаров, В.А. Насонов, Е.М. Морозов // Известия высших учебных заведений — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана — 214, 5с.
- 32.Захаров М.Н. Оценка влияния дефектов сварных соединений на прочность и надёжность стальных сосудов и аппаратов/ М.Н. Захаров, В.А. Насонов // Известия высших учебных заведений — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана — 212, 5с.
- 33.Нагуен, Н.Н. Влияние дефектов сварных швов на механические свойства корпусной стали, определение при динамической нагрузки / Н.Н. Нагуен, А.Р. Рубан // Вестник Государственного Университета морского и речного флота имени С.О. Масарова — М.: Изд. УмиРФ Баумана — 215, 130с.
- 34.Коновалов, Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений / Н.Н. Коновалов — М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. — 111 с.
35. Юхин Н.А. Дефекты сварных швов и соединений / Н.А. Юхин — М.: Издательство «СОУЭЛО», 2007. — 56 с.
- 36.Шахмотов М.В. Комплексный подход к оценки прочности сварных тавровых соединений / М.В. Шахмотов, Е.А. Усманова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. — Челябинск.: ЦНТИ, 2007. — 56 с.
- 37.Махутов Н.А. Ресурс безопасности эксплуатации сосудов и трубопроводов / Н.А. Махутов, В.Н. Пярмяков — Новосибирск : Наука, 2005 (СП Наука РАН), 2005. — 515с.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		92

38.Власов Г.А. Опыт проведения работ по экспертизе промышленной безопасности сосудов работающих под давлением / Г.А. Власов, Н.Г. Андерсаян, С.П. Зарецкий — Новосибирск : Наука, 2010 (СП Наука РАН), 2010. — 212с.

39.Бирилло Н.Н. О некоторых результатах экспериментальных исследований дефектосодержащих сварных швов / Н.Н. Бирилло, Ю.А. Теплинский, Р.В. Агинеи, В.Н. Воронин, Т.Т. Алиев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2010. — 40-45с.

40.Бирилло И.Н. О некоторых результатах экспериментальных исследований дефектосодержащих сварных швов / И.Н. Бирилло, Ю.А. Теплинский, Р.В. Агинеи, В.Н. Воронин, Т.Т. Алиев // МГ. Газовая промышленность. Сер. Диагностика оборудования и трубопроводов, 2003, № 2. — с. 40–45.

41.Булатова А.З. Оценка опасности расслоений в металле конструкций на основе диаграммы трещиностойкости / А.З.Булатов, М.Н.Захаров, Е.М. Морозов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2010, № 3— с. 41–46.

42.Лепихин А.М. Неразрушающий контроль и оценка опасности дефектов сварки на стадии эксплуатации оборудования / А.М. Лапихин // Вопросы материаловедения, 2007, № 3— с. 208–213.

43.Didžiokas R. The impact of the internal welding defects on the joint strength / R.Didžiokas, J.Januteniene, J. Jonaityte // Transport, 2008, vol. 23, no. 3, pp. 240–244.

44.Schaumann P. Influence of weld defects on the fatigue resistance of thick steel plates / P.Schaumann ,M. Collmann // Procedia engineering, 2013, vol. 66, pp. 62–72.

45.Гумеров А.Г. Оценка технического состояния и ресурса нефтегазохимического оборудования и трубопроводов / А.Г. Гумеров, Р.С.Зайнуллин, А.Г. Халимов. — М.: Недра, 2004. — 286 с.

46.Захаров М.Н. Критерий разрушения сварных стыковых соединений с внутренними дефектами / М.Н. Захаров, В.А. Насонов, Е.М. Морозов // Известия высших учебных заведений — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана — 214, 5с.

47. Усманова Е.А. Расчётная оценка несущей способности тавровых и нахлесточных сварных соединений с лобовыми швами с учётом концентрации напряжений / Е.А. Усманова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. — Челябинск.: ЦНТИ, 2011. — 58 с.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		93

48.Кархин В.А. Концентрация напряжений в стыковых сварных соединениях / В.А. Кархин, Л.А. Копельман // Справочное производство 1976, № 3— с. 6–7.

49.Шрон Л.Б. Методика расчётной оценки концентрации напряжений в тавровых и нахлесточных сварных соединениях / Л.Б. Шрон // Вопросы сварочного производства: сб. науч. Тр. // Челябинск: ЧПИ, 1983 — с. 14–16.

50.Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. –М.: Машиностроение, 1996. — 576с.

51.Макаров, И.И. Работоспособность сварных соединений с технологическими отклонениями: автореферат дис. На соискание ученой степени доктора техн. Наук/И.И. Макаров. — М.: Изд. МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1976. — 32 с.

52.Жемчужников, Г.В. Статическая прочность стыковых сварных соединений с технологическими дефектами / Г.В. Жемчужников, Э.В. Котенко, В.С. Гиренко // Автоматическая сварка. — 1970. №8. — с. 23-26.

53.Румянцев, С.В. Неразрушающие методы контроля сварных соединений / С.В. Румянцев, В.А. Добросмыслов, О.И. Борисов, Н.Т. Азаров — М.: Машиностроение, 1976. — 335 с.

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

55.СП 16.13330.2011 Стальные конструкции / Госстрой России.- М.: ЦИТП Госстроя России, 2011. — 96 с.

56.Design rules for arc-welded connections in steel submitted static loads // Ibid. - 1976. -14.-N5/6. –P/ 132-149.

57.Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. Том 3 / Под. Ред. В.А. Винокурова. — М.: Машиностроение, 1979. — 567 с.

58.Сереико, А.И. Расчет сварных соединений и конструкций. Примеры и задачи / А.Н. Сиренко, М.Н. Крумбольд, К.В. Багрянский. Киев: Вища школа, 1977. — 336 с.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		94

59.Закревский, М.П. Анализ предельных состояний подкрановых балок / М.П. Закревский, В.В. Москвичев, В.С. Котельников // Безопасность труда в промышленности. 2004. №3. — С.31-34.

60.А.П. Браженис, М.А. Даунис // Материалы конференции «Развитие технических наук в республике и использование их результатов», Каунас. — 1974. — с.32-39.

61.Бакши, О.А. Оценка прочности тавровых соединений с угловыми швами, находящимися в хрупком состоянии, по критериям механики разрушения / О.А. Бакши, Н.Л. Зайцев, С.Ю. Гооге // Сварочное производство.-1981. —с.13-16.

62.Макклинток, Ф. Пластические аспекты разрушения Том 3: Разрушение / Ф. Макклинток; под ред. Г. Либовица. — М.: Мир, 1976. — с.67-262.

63.Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: Учеб. Пособие / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. — М.: Высшая школа. 1982. — 272 с.

64.Винокуров, В.А. Прочность сварных соединений с угловыми швами и метод их расчета / В.А. Винокуров, С.А. Куркин // Сварочное производство. 1984. №8. — с.3-5.

65.Махненко, В.И. Расчетная оценка несущей способности сварных швов с неполным проплавлением / В.И. Махненко, К.А. Ющенко, В.Е.Починок // Автоматическая сварка. 1984.№8. — с.1-6.

66. Махненко, В.И. Применение критериев механики разрушения к расчету на прочность сварных соединений с предусмотренными несплошностями трещинообразного типа / В.И. Махненко, В.Е.Починок // Автоматическая сварка. 1982.-№1. — с. 1-6.

67. Овчаренко, Ю.Н. Оценка работоспособности сварных соединений с угловыми швами с использованием механики разрушения : автореф. Дисс. / Ю.Н. Овчаренко. — М.: МВТУ, 1981. —15 с.

68.Черногоров, А.Л. Обоснование требований к качеству сварных соединений с позиции влияния их на работоспособность несущих систем сельскохозяйственных машин : автореф. Дисс / А.Л. Черногоров. — М.: МГТУ, 1990. — 16 с.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		95

69. Usami, S. Fatigue strength at roots of cruciform, tee and lap joints / S. Usami, S. Kusumoto // IW Doc. XIII-833-77. — 20 p.

70. Айметов, С.Ф. Работоспособность лобовых швов тавровых соединений при изгибе / С.Ф. Айметов // Тез. Доклада науч.-техн. Конференции «XXVI

71. Российская школа по проблемам науки и технологий». — Миасс: МСНТ.2006. — с. 49.

72. Petershagen, H. Cruciform joints and their optimization for fatigue strength- a literature survey / H. Petershagen // Welding in the World. — 1975. 13. -№5/6. — p.143-154.

73. Шрон, Л.Б. Методика расчетной оценки концентрации напряжений в тавровых и нахлесточных сварных соединениях / Л.Б. Шрон // Тр. — ЧПИ: Вопросы сварочного производства, 1983. — с.58-68.

74. Махненко, В.И. Расчетная оценка несущей способности сварных швов с неполным проплавлением / В.И. Махненко, К.А. Ющенко, В.Е. Починок // Автоматическая сварка. 1984. №8. — с.1-6.

75. Махненко, В.И. Применение критериев механики разрушения к расчету на прочность сварных соединений с предусмотренными несплошностями трещинообразного типа / В.И. Махненко, В.Е. Починок // Автоматическая сварка. 1982. -№1. — с. 1-6.

76. Овчаренко, Ю.Н. Оценка работоспособности сварных соединений с угловыми швами с использованием механики разрушения : автореф. Дисс. / Ю.Н. Овчаренко — М.: МВТУ, 1981. —15 с.

77. Черногоров, А.Л. Обоснование требований к качеству сварных соединений с позиции влияния их на работоспособность несущих систем сельскохозяйственных машин: автореф. Дисс / А.Л. Черногоров. — М.: МГТУ, 1990. —16 с.

78. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. — М.: Машиностроение, 1996. — 576с.

79. Черногоров, А.Л. Обоснование требований к качеству сварных соединений с позиции влияния их на работоспособность несущих систем сельскохозяйственных машин : автореф. Дисс / А.Л. Черногоров. — М.: МГТУ, 1990. — 16 с.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		96

80.Usami, S. Fatigue strength at roots of cruciform, tee and lap joints / S. Usami, S. Kusumoto // IW Doc. XIII-833-77. — 20 p.

81.Ковалев, В.В. Влияние некоторых конструктивных факторов на коэффициент концентрации напряжений в области острых выточек / В.В. Ковалев // Проблемы прочности. 1978. №3 — с.74-78.

82.Зайцев, Н.Т. Методика: определения коэффициентов; интенсивности, напряжений K_j методом фотоупругости / П.Л.Зайцев, С.Ю. Гооге // Сб. науч. Трудов — ЧПИ: Вопросы сварочного производства. — 1979. — с.31-36.

83.Окерблом, Н.О. Некоторые соображения о перспективах развития сварных конструкций/ Н.О. Окерблом // Автоматическая сварка, 1965 №4 — с.1-6.

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		97

ПРИЛОЖЕНИЕ

					15.04.01.2018.207.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		98