

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование кафедры)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического оборудования

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Влияние механической неоднородности сварных соединений на
эксплуатационные характеристики магистральных трубопроводов

Студент

Н.В. Александров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

К.т.н., доцент, А.Л. Федоров

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

Содержание

Введение.....	3
1 Анализ исходных данных по теме работы	6
1.1 Особенности влияния структуры сварных соединений на эксплуатационные характеристики трубопроводов	6
1.2 Анализ напряженно-деформированного состояния механически неоднородного металла соединения.....	9
1.3 Анализ влияния на прочность металла тонких пластичных прослоек...	16
1.4 Анализ влияния на циклическую прочность механически неоднородного сварного соединения мягких прослоек	17
2 Методика исследования.....	23
2.1 Общий принцип расчета сварных металлоконструкций.....	23
2.2 Создание дефектов типа трещина и непровар.....	40
2.3 Имитация прослоек в сварном соединении.....	45
3 Результаты исследования по методу конечных элементов	49
3.1 Исследование дефектов типа трещина и непровар.....	49
3.2 Исследование мягких прослоек	51
3.2 Исследование жестких прослоек	56
4 Рекомендации по результатам исследований напряженно- деформированного состояния сварных соединений	59
4.1 Современный уровень развития технологий контроля	59
Заключение	65
Список используемой литературы и используемых источников.....	67

Введение

Для оценки работоспособности сварных соединений могут применяться самые разнообразные методы и приемы. Например испытания выполненных образцов сварных соединений. При проведении таковых следует руководствоваться ГОСТ 6996-66. Данный документ предусматривает испытания сварных соединений на растяжение, при этом получают такие характеристики как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение. Отражены также в данном документе требования к проведению испытаний на ударный изгиб, на сопротивляемость старению, также отражены требования к исследованию твердости различных участков сварного соединения [3]. ГОСТ 9.905-82 предусматривает оценку сопротивления воздействию агрессивной внешней среды.

Все указанные ГОСТ предусматривают изготовление подлежащих исследованиям образцов и последующие их исследования. Данные исследования характеризуются расходом материалов, электричества для получения сварных соединений, также к расходам следует отнести затраты на содержание управленческого аппарата, которые учитываются через коэффициент заводских, цеховых расходов.

Следует помнить, что в настоящее время все чаще применяются технологии компьютерного моделирования. В частности метод расчета по конечным элементам. Принцип его заключается в том, что исследуемый объект разбивается на т.н. конечные элементы, затем к нему прикладывается требуемое воздействие и после выполнения требуемых расчетов выполняется анализ объекта [37].

Компьютерные технологии анализа физических объектов требуют построения геометрической модели исследуемого тела. Данная процедура осуществляется в модуле CAD, затем результаты исследуемой геометрической модели импортируются в модуль CAE [38]. Там объект

разбивается на конечные элементы, назначаются свойства объекта, и производится анализ по методу конечных элементов.

Исследования объектов с применением компьютерных технологий позволяют экономить материальные ресурсы. Исключив из технологического цикла подготовки образцов изготовление, механическую обработку и непосредственно сами испытания можно сэкономить время. Кроме того, к достоинствам компьютерных технологий следует отнести возможность проведения исследований на критических режимах, при которых физический образец разрушится и понадобится создание нового образца [4].

На основании вышеизложенного следует сформулировать цель магистерской диссертации следующим образом: экономия материальных и временных ресурсов при исследовании механической неоднородности сварных соединений.

Чтобы достичь поставленной цели, в работе были решены следующие задачи:

- выбор средств компьютерного моделирования;
- разработка методики выполнения исследований механической неоднородности;
- проведение исследований механической неоднородности;
- обработка результатов исследований и оценка их результатов;
- на основании анализа полученной при проведении исследований информации сформулировать необходимые рекомендации и довести их до сведения предприятий и организаций выполняющих сварку магистральных трубопроводов.

Поставленные задачи определили структуру магистерской диссертации, которая состоит из введения, четырех глав, заключения.

Предмет и объект исследования определяется тематикой работы, ее целью и задачами.

Предмет исследования – компьютерные технологии исследования моделей сварных соединений.

Объект исследования – модели сварных соединений с неоднородностью сварного соединения.

Теоретической, методологической и информационной базой исследования послужили:

- государственные и отраслевые стандарты, нормативная база применяемая на предприятиях, занимающихся бурением скважин;

- опубликованные работы российских и зарубежных ученых и инженеров в области сварки, наплавки и контроля;

- сведения по проблеме исследования, полученные из глобальных компьютерных сетей.

«В ходе исследования использовались специальные и общенаучные методы исследования. В качестве специальных при написании работы применялись аналитические и логические методы. Выполнялся анализ литературных источников по теме исследования, анализ полученных при экспериментальных исследованиях результаты. Методы логики применялись для получения выводов из результатов экспериментальных исследований. В качестве общенаучных методов при написании работы применялись методы наблюдения за объектом во время проведения экспериментальных исследований» [6].

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что исследованы неоднородности сварных соединений и их влияние на величину напряжений в сварном соединении.

Практическая значимость исследования заключается в том, что рекомендации сформулированные по результатам выполнения работы направлены на конкретное внедрение в практику строительства магистральных трубопроводов применительно к условиям предприятия “Ульяновскнефть”.

1 Анализ исходных данных по теме работы

1.1 Особенности влияния структуры сварных соединений на эксплуатационные характеристики трубопроводов

При получении сварных соединений происходит действие источника тепла на свариваемый металл и на присадочную проволоку [2]. Нагрев соединяемых кромок и присадочной проволоки ведется до момента расплавления, рисунок 1.

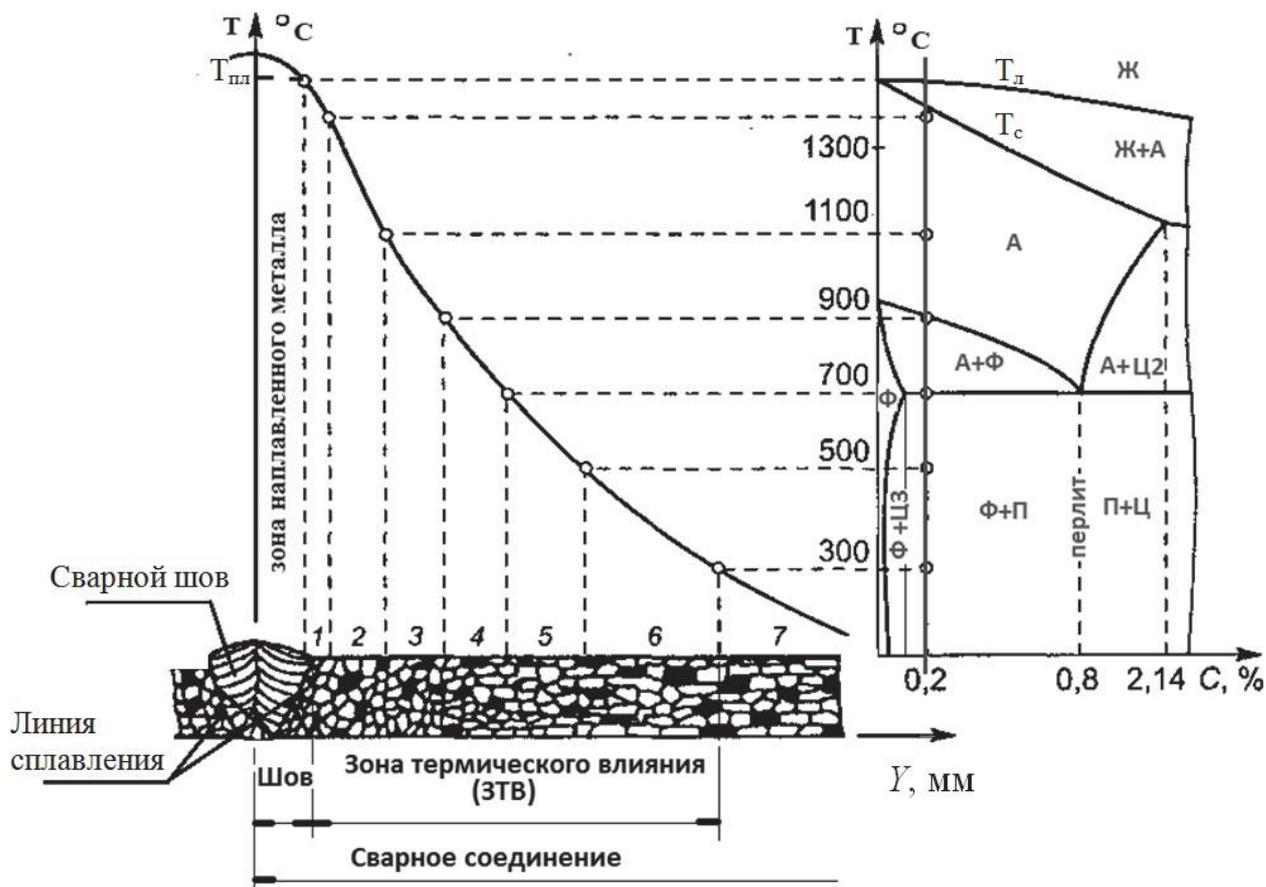
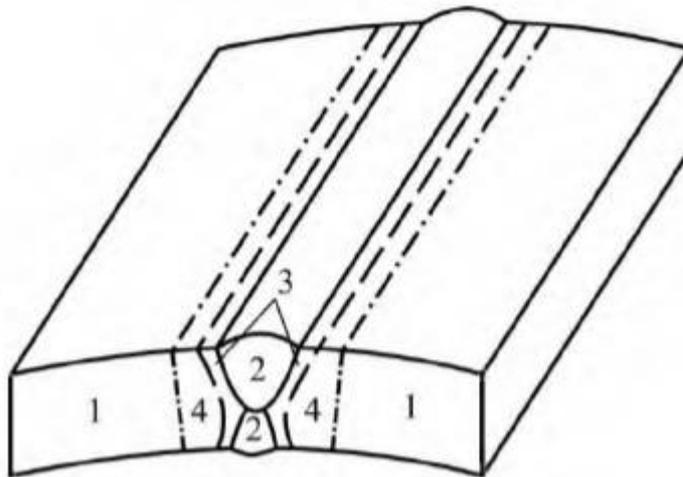


Рисунок 1 – Области нагрева сварного соединения

Области сварного шва по причине термического влияния следует разбить следующим образом, рисунок 2:

- наплавленный металл;
- область термического влияния;
- область примыкающего к зоне термического влияния металла.

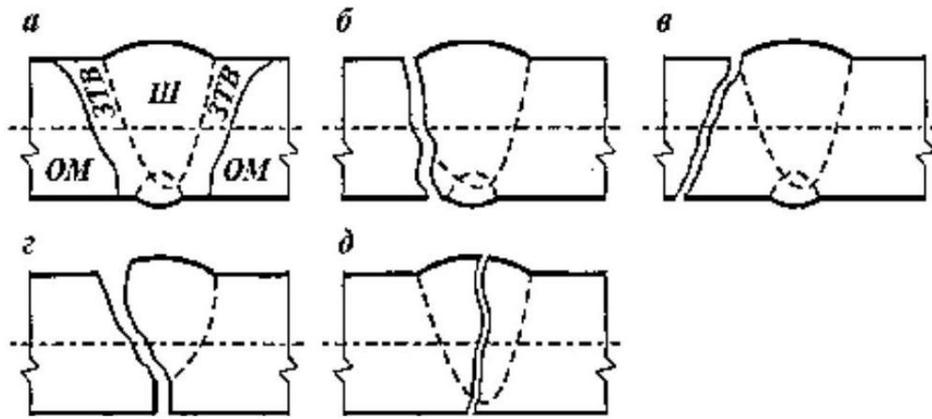


1 основной металл; 2 наплавленный металл; 3 зона термического влияния; 4 примыкающий металл

Рисунок 2 – Области сварного шва

«На характер разрушения сварных соединений существенное влияние оказывают специфические макро- и микроструктурные особенности сварных соединений. Отличительной особенностью сварных соединений является структурная неоднородность, обуславливающая различие механических свойств отдельных участков соединения. Кроме этого, для сварных соединений характерно появление в них дефектов (непровар, холодные и горячие трещины, поры, включения и др.), а также в сварных соединениях выше уровень напряженности из-за остаточных (сварочных) напряжений» [4]

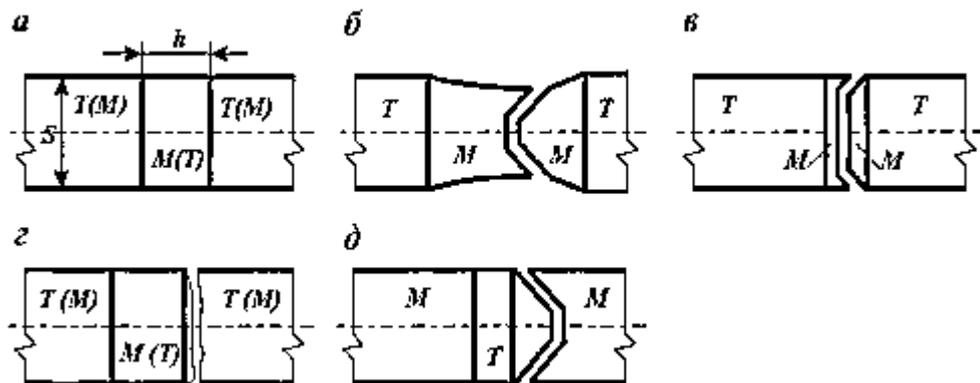
«В случае, если металл шва имеет более высокие механические свойства, то при отсутствии макроскопических дефектов при статическом нагружении разрывы происходят по основному металлу согласно механизма вязкости или хрупкого разрушения» [4]. Основные типы разрушения сварных соединений представлены на рисунке 3.



а - схема сварного соединения; б - разрушение по линии сплавления; в – разрушение срезом; г - разрушение отрывом; д - разрушение по шву.

Рисунок 3 - Основные типы разрушения сварных соединений

«Нередко в сварных соединениях имеют место так называемые мягкие и твердые прослойки, соответственно, с пониженными и повышенными прочностными свойствами которые существенно изменяют характер и местоположение разрыва, рисунок 4» [4].



а - схема сварного соединения с мягкой твердой прослойкой; б – вязкое разрушение соединения с широкой мягкой прослойкой; в – квазихрупкое разрушение соединения с мягкой прослойкой; г - разрушение соединения с тонкой прослойкой; д - разрушение соединения с твердой прослойкой.

Рисунок 4 - Схемы разрушения механически неоднородных сварных соединений.

«В широких мягких прослойках разрушение происходит в результате косо́го среза или конуса аналогично разрушению однородного металла, С уменьшением ширины мягкой прослойки характер разрушения заметно изменяется. В достаточно узких прослойках участок прямого излома занимает большую часть прослойки, чем зона среза. Это объясняется тем, что в тонких мягких прослойках в результате стеснения деформаций мягкого металла развивается объемное напряженное состояние, жесткость которого тем больше, чем уже прослойка. При некоторых геометрических и механических ограничениях, несмотря на наличие мягких прослоек в сварных соединениях, разрушение может происходить по основному металлу» [5].

1.2 Анализ напряженно-деформированного состояния механически неоднородного металла соединения.

Нагрузка, такая как растяжение, приложенная к сварному шву имеющему пластические прослойки вызывает пространственное распределение напряженного состояния. При этом в пластической прослойке помимо нормальных напряжений σ , появляются касательные напряжения τ . Если принять ось Z вдоль сварного соединения то стремление мягкой прослойки удлиниться вызывает в соответствии с законом сохранения потребность в сжатии, однако окружающий сварное соединение с пластичной прослойкой основной металл такой возможности не представляет [1]. Появляются касательные напряжения как по оси X так и по оси Y . Вследствие этих процессов в пластичной прослойке развивается трехосное растяжение. В местах контакта пластичной прослойки с основным металлом касательные напряжения растяжения в пластичной прослойке преобразуются в касательные напряжения сжатия, в соответствии со вторым законом Ньютона [7].

Вывод из перечисленного следует однозначный, пластичная прослойка упрочняется, так как в ней действует трехосное напряженное состояние, однако основной металл разупрочняется в соответствии с законом «смягчения» открытым О.Л. Бакши. При растяжении таких сварных соединений начинается пластическая

деформация основного металла, в местах контакта основного и пластичного металла, однако на расстоянии от пластичной прослойки металл сохраняет свои пластические свойства. Если нагрузка на сварное соединение возрастает, и размер пластичной прослойки не превышает критическое значение начинается пластическая деформация свариваемого металла по всей площади контакта пластичной прослойки и свариваемого металла [8].

При этом пластическая деформация свариваемого металла в области контакта пластичной прослойки и свариваемого металла приводит к снижению деформаций непосредственно мягкой прослойки. Данный эффект приводит к тому что пластичная прослойка упрочняется в меньшей степени.

Проведенные эксперименты доказали, что рядом с пластичной прослойкой имеет место упрочнения слоя металла. При этом данный слой оказывает на мягкую прослойку упрочняющее воздействие. Данная ситуация в сварочной практике имеет широкое распространение. Этому способствует наличие областей в зоне термического влияния термообработанных по механизму закалки. Данное физическое явление встречается в практике получения сварных соединений достаточно часто. К пластичной области сварного шва (расплавленный и закристаллизовавшийся металл) в контакте находятся области термообработанные по механизму закалки. По механизму ликвации в сварном соединении может образоваться слой с повышенным содержанием углерода. Указанные области сварного соединения оказывают сопротивление свободным деформациям мягкой прослойки. И как следствие разрушение сварного соединения происходит не по мягкой прослойке а по основному металлу [9].

Области прилегающие к пластичной прослойке обеспечивают при размерах прослойки меньше критических значений разрушение по основному металлу.

Однако если областей в зоне термического влияния термообработанных по механизму закалки нет, то сварной шов разрушится по пластичной прослойке. При отсутствии таковых областей участки основного металла в пластическую деформацию (благодаря эффекту смятения) вступают области

основного металла до достижения предела текучести. Это определит место развития шейки и последующее разрушение по прослойке [12].

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что существующие в настоящее время приемы и методы по исследованиям сварных соединений на прочность не позволяют в полной мере оценить напряженно-деформированное состояние сварного соединения. Однако моделирование сварных швов в системах трехмерного моделирования и последующий анализ по методу конечных элементов позволяют достаточно точно определить проблемные участки сварного соединения [11].

Если рассмотреть влияние температуры на преобразования структуры и появление напряжений в сварном соединении то значительную роль в этом процессе играют дефекты, такие как непровары, пористость, шлаковые включения и трещины. К неблагоприятным моментам изменения структуры можно отнести образование закалочных структур, увеличение размеров зерна. Эти явления оказывают непосредственное влияние на снижение вязкости и пластичности сварного соединения [10]. Указанные процессы негативно сказываются на стойкости к образованию горячих и холодных трещин. Также негативно на характеристики сварных соединений влияет различия в химическом составе в области неполного расплавления при переходе от основного металла к непосредственно сварному шву.

Как показывает статистика по дефектам на магистральных трубопроводах, около 30 % аварий приходится на трубопроводы возрастом 30 лет (это те трубопроводы, которые были построены в 90-е годы). Возникновение аварий происходит по причине наличия в таких трубопроводах множественных дефектов, образование которых допущено по причине нарушений технологического процесса, а также недоработки проектной и исполнительной документации. Риски, задиры накладки и вмятины являются концентраторами напряжений, по причине наличия которых возникает порядка 7 % всех аварий на магистральных трубопроводах. По причине дефектов в сварном шве возникает 1,5...2 % аварий на магистральных трубопроводах [9]. Исходя из общеизвестной схемы

концентрация напряжений увеличивается при увеличении глубины дефекта и уменьшении радиуса r , рисунок 5.

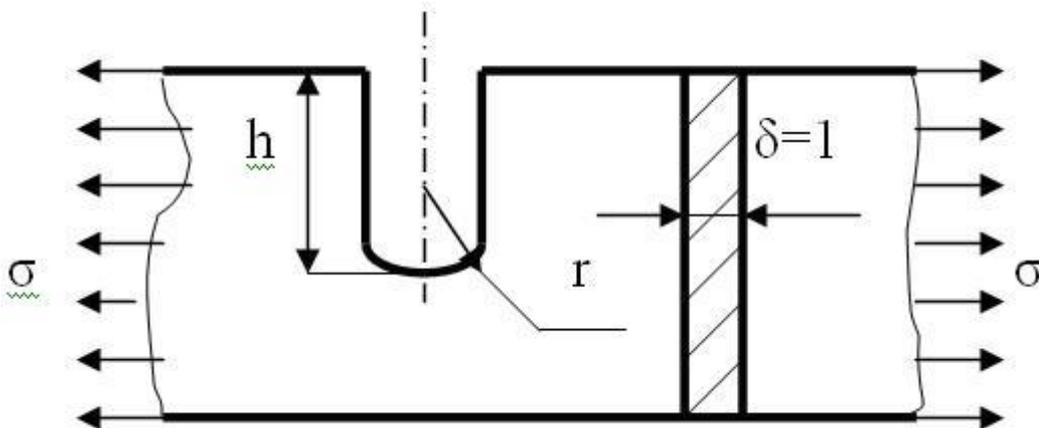


Рисунок 5 – Геометрические параметры концентратора

Из чего следует, что наиболее опасными дефектами сварных соединений являются трещины [8]. Статистика появления дефектов в сварных соединениях на магистральных трубопроводах распределяется, примерно, следующим образом, рисунок 6. Количество трещин составляет около 18%.

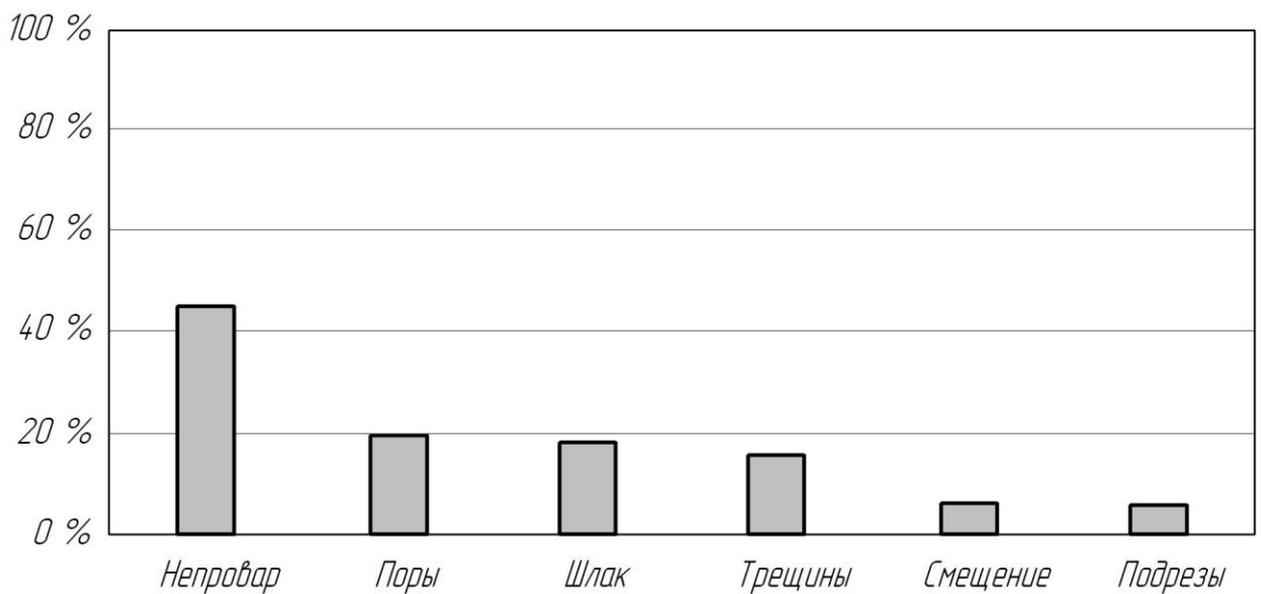


Рисунок 6 – Статистика дефектности магистральных трубопроводов

Сварку сталей магистральных трубопроводов, в составе которых незначительное содержание углерода, можно выполнять электродами, которые предназначены для сварки низколегированных и углеродистых сталей. Примером таких электродов являются электроды типа Э42А и Э50А [13].

Низкое содержание углерода в сварном шве обуславливает хорошую стойкость против кристаллизационных трещин, появление которых в основном возможно по причине неблагоприятной подготовки (глубокая и узкая разделка). Для того, чтобы предупредить образование в сварном шве пор и непроваров необходимо выполнять тщательную зачистку свариваемых кромок, удаляя ржавчину, масло и другие загрязнения [14].

В процессе сварки сталей предназначенных для магистральных трубопроводов в металле сварного шва могут образовываться закалочные структуры. Кроме феррита возможно образование остаточного аустенита, мартенсита и бейнита. Содержание этих структур в металле шва зависит от термического цикла, который определяется параметрами режима и техникой сварки. При уменьшении погонной энергии сварки наблюдается повышение количества и дисперсности остаточного аустенита, мартенсита и бейнита [15].

Влияние образующихся при сварке закалочных структур зависит от их распределения по объёму сварного шва. Если закалочные структуры равномерно распределены в ферритной основе и не имеют чёткой ориентации, то их влияние незначительно. Увеличение скорости охлаждения сварного шва резко увеличивает количество закалочных структур, что приводит к разупрочнению, уменьшению пластичности и повышению опасности хрупкого разрушения [22].

Содержащиеся в стали химические элементы (кремний и марганец) повышают количество образующихся при сварке закалочных структур. С учётом этих особенностей при сварке сталей магистральных трубопроводов следует назначать параметры режима, которые обеспечивают меньшую погонную энергию, чем при сварке низкоуглеродистых сталей [21].

В настоящее время развитие сварочных технологий обеспечивает получение сварных соединений чья прочность совпадает с прочностью основного металла.

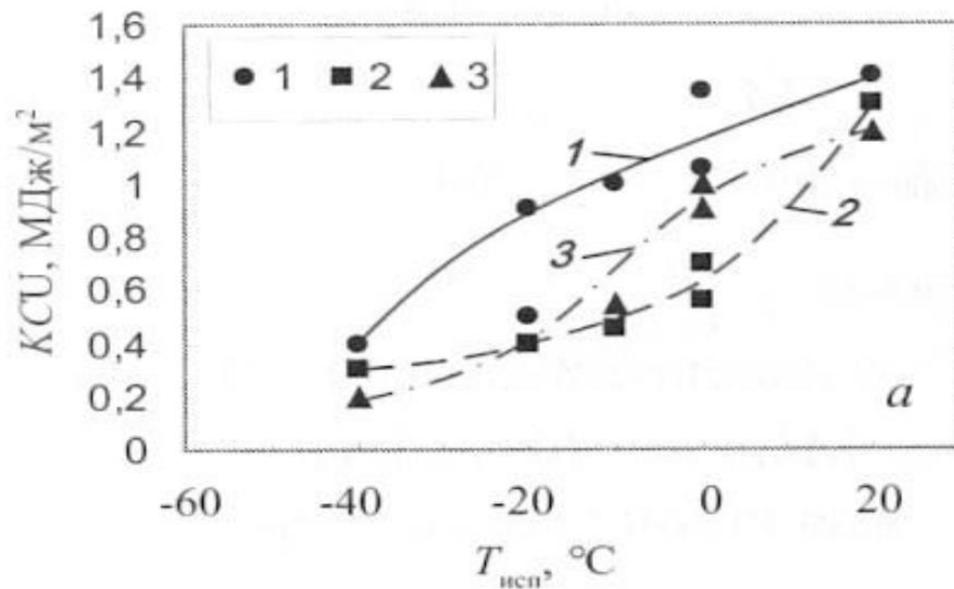
Тем не менее при получении сварных соединений в несколько проходов, а толщина стенок магистральных трубопроводов, в основном превышает 10 мм возможно появление в сварном шве дефектов [20]. Получаемые дефекты, являющиеся концентраторами напряжений, негативно влияют на эксплуатационные характеристики сварных соединений, возможно их преждевременное разрушение. Особенно это является актуальным при знакопеременных нагрузках [19]. При статических нагрузках сварные дефекты соединений хотя и концентрируют напряжения, значительно в некоторых случаях их повышая, но в целом заметного влияния на работоспособность не оказывают.

Если рассматривать сварное соединение в целом, то можно выделить следующие области – металл шва, зона термического влияния, температура которой при сварке достигла значений, превышающих 300°C и основной металл. В свою очередь у сварного соединения есть области твердого состояния, область перегрева, область неполной перекристаллизации. Затем следуют области рекристаллизации и область нормализации [51].

Измерения твердости по длине расположенной перпендикулярно сварному соединению характеризуют неравномерность значений. Что также подтверждает различные химические свойства областей сварного соединения.

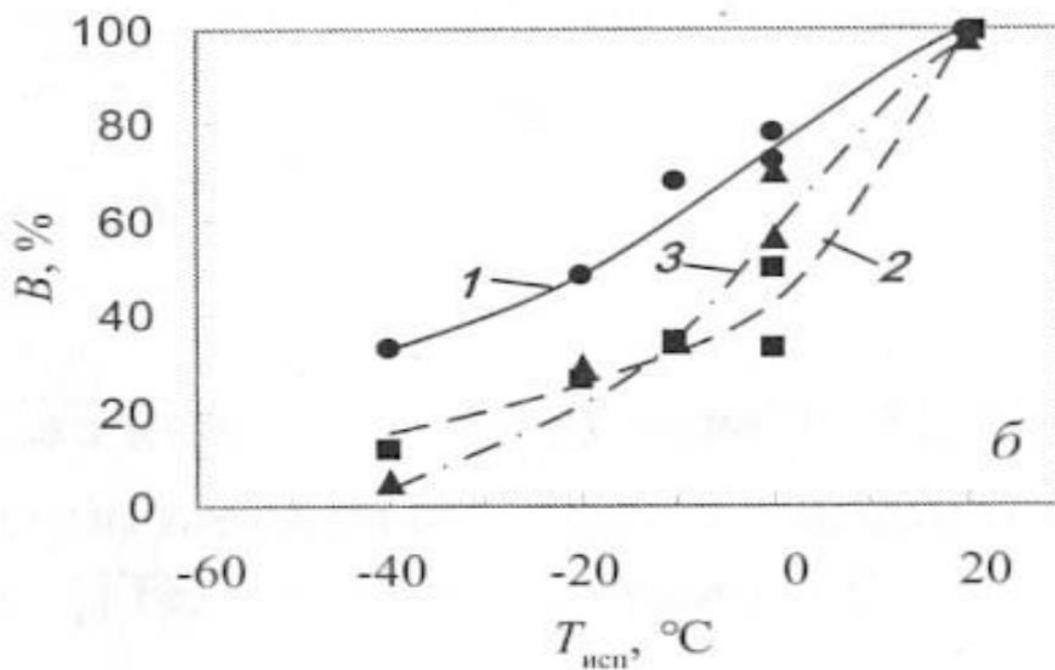
При определении характеристик металла шва необходимо помнить о том, что в основном на его свойства оказывает влияние химический состав применяемого присадочного металла, способ сварки и режимы выбранного способа сварки. Для металлургических процессов протекающих в сварочной ванне характерным является высокие скорости. Это обуславливает отсутствие выравнивания химического состава. Как следствие получается неравномерность распределения химических компонентов по сечению шва. В результате этого развиваются процессы ликвации.

Различные области металла шва характеризуются разными значениями ударной вязкости [50], рисунок 7. Причем, вязкая составляющая зоны излома в %, при исследованиях на ударную вязкость также находится в зависимости от областей металла, рисунок 8.



1- основной металл; 2 – расстояние 2 мм от линии сплавления;
3 – расстояние 4 мм от линии сплавления

Рисунок 7 – Ударная вязкость различных областей сварного соединения



1- основной металл; 2 – расстояние 2 мм от линии сплавления;
3 – расстояние 4 мм от линии сплавления

Рисунок 8 – Вязкая составляющая зоны излома в %, при исследованиях на ударную вязкость.

Причем, в зависимости от расположения образца при ударе маятника металл облицовочного слоя показывает меньшие значения, до 3х раз, чем металл со стороны корня шва [49]. Это можно объяснить тем, что металл со стороны облицовки подвергался большему термическому воздействию.

1.3 Анализ влияния на прочность металла тонких пластичных прослоек

Упрочнение пластичных слоев в зоне термического влияния сварного соединения наблюдается при их небольших толщинах. Чем меньше толщина пластичного слоя, тем больше вероятность появления касательных напряжений при деформации, тем больше вероятность появления трехосного напряженного состояния. В связи с этим вероятность разрушения по хрупкому механизму возрастает [48]. Таким образом если толщина пластичных слоев в околошовной области сварного соединения меньше критической указанные слои могут разрушиться по хрупкому механизму. Практика эксплуатации сварных соединений и данные лабораторных исследований отвечают на этот вопрос положительно [23]. Рассмотрим сопротивление хрупкому разрушению сварного соединения с мягкой прослойкой.

Для разрушения по хрупкому механизму характерным является распространение трещины при напряжениях меньших предела текучести. В свою очередь разрушение по вязкому механизму характеризуется пластическими деформациями, которые появились по достижении напряжений равных или превышающих предел текучести материала [39].

Когда происходит разрушение сварного соединения по пластичной прослойке его причисляют к разрушению по хрупкому механизму невзирая на пластические деформации в самой прослойке. Соседствующие с пластичной прослойкой области сварного соединения ограничивают возможности деформирования тонкой пластичной прослойки. Если разрушение произошло по пластичной прослойке, то сварное соединение в целом даже если разрушение случилось при общих напряжениях не достигших величины предела текучести

основного металла то необходимо считать разрушение случившимся по хрупкому механизму [24].

Если разрушение случилось при общих напряжениях превысивших величину предела текучести основного металла то необходимо считать разрушение случившимся по вязкому механизму. Потому что в момент разрушения соединение пластически деформировалось.

С учетом того, что пластические деформации происходят под действием касательных напряжений (τ) при малых толщинах пластичной прослойки величина напряжений σ значительно превосходит величину напряжений τ . Это случается тогда, когда пластичная прослойка окружена твердыми слоями закалочных структур, в этом случае сопротивление отрыву достигается ранее, чем начинаются деформации металла пластичной прослойки [25].

Металл переходит в хрупкое состояние при наличии размера нормальных напряжений значительно превышающих касательные. Пластические деформации происходят при действии на металл касательных напряжений. Если пластичные области сварного соединения соседствуют с твердыми областями нормальные напряжения достигнут сопротивления отрыву до того момента появления пластических деформаций. При реализации такой схемы нагружения начнется разрушение по хрупкому механизму [40].

1.4 Анализ влияния на циклическую прочность механически неоднородного сварного соединения мягких прослоек

Сварные соединения представляют из себя несколько областей, находящихся под различным температурным воздействием. В некоторых областях температура превышает линию PSK (A1), в некоторых областях превышает значения линии GS (A3). При сварке сталей содержащих свыше 0,8% углерода происходит превышение температуры SE (A_{cm}). Следовательно, сварное соединение характеризуется неоднородностью свойств [42]. Всяческое изменение структуры сварного соединения характеризуется концентрацией напряжений.

Поэтому для сварных соединений очень важным является оценка циклической прочности.

Несмотря на пристальное внимание ученых проблемы усталостного разрушения до конца не изучены. Выделяют четыре стадии усталостного разрушения [41]. Усталостное разрушение включает в себя стадии образования полосовых субструктур, зарождения и развития микротрещин, последующим перерождением микротрещин в макротрещины и распространением макротрещин в объеме металла.

Усталостное разрушение имеет место при переменных нагрузках на эксплуатируемые детали машин. Большинство деталей современных машин работает в условиях переменных нагрузок. В некоторых случаях и корпусные детали испытывают воздействие переменных нагрузок [26].

Усталостное разрушение по механизму действия отличается от разрушения при однократном разрушении. В первую очередь при переменных нагрузках накапливаются локальные повреждения. Со временем они перерастают в микротрещины. Микротрещины по мере роста объединяются, и превращаются в макроскопические трещины. Рост макроскопической трещины зависит от величины напряжений в ее устье [47].

Циклом нагружения называют последовательные значения напряжений за период их изменения. Для параметров цикла следует отнести нижеперечисленные значения его характеристик, рисунок 9:

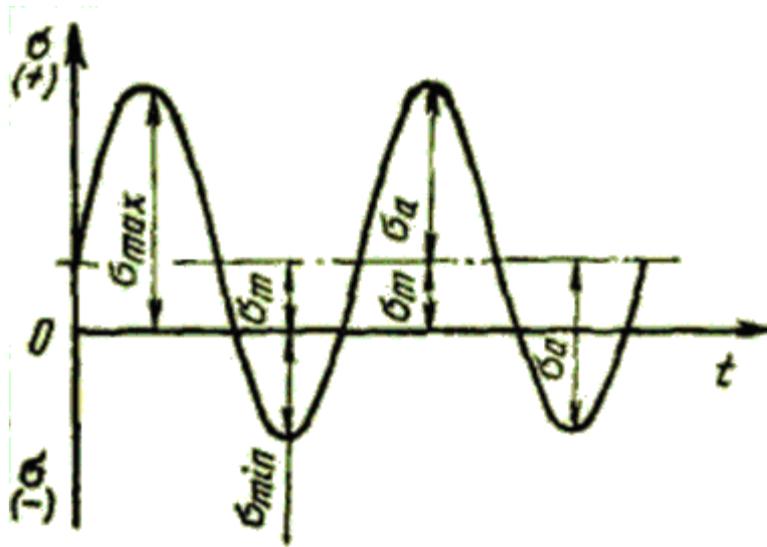


Рисунок 9 – Параметры цикла нагружения

- максимальное (σ_{\max}) и минимальное (σ_{\min}) значения напряжения цикла;
- размах напряжения цикла: $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$.
- амплитуда напряжения: $\sigma_a = 0,5(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$.
- среднее напряжение цикла: $\sigma_m = 0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$.
- коэффициент асимметрии цикла нагружения: $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$.
- частота и период нагружения: $f = 1/T$.

Цикл нагружения может быть симметричным, рисунок 10 г. Однако не всегда коэффициент асимметрии принимает значения -1.

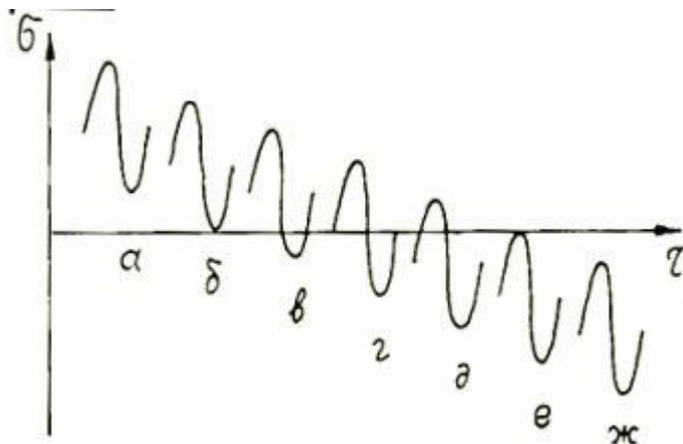


Рисунок 10 – Виды циклов нагружения

Возможен вариант при котором максимальное и минимальное напряжения цикла положительны, рисунок 10 а. При этом коэффициент асимметрии цикла изменяется в пределах $0 < R < 1$. Возможен вариант при котором нижний предел напряжений достигает нуля а верхний положителен, рисунок 10 б. При этом коэффициент асимметрии цикла равен нулю [43]. Если значения по модулю положительных значений напряжений превышают отрицательные, то коэффициент асимметрии меняется в пределах $1 < R < 0$. Если значения по модулю отрицательных значений напряжений превышают положительные, рисунок 10 д, то коэффициент асимметрии меняется в пределах $-\infty < R < -1$. Возможен вариант при котором верхний предел напряжений достигает нуля а нижний отрицателен, рисунок 10 е. При этом коэффициент асимметрии цикла равен минус бесконечности [43]. Ну и если верхний и нижний предел напряжений цикла отрицательны, деталь работает в условиях сжимающих напряжений, рисунок 10 ж, при этом коэффициент асимметрии цикла находится в пределах $-1 < R < 0$ [9].

Циклы 10 б и 10 е называют еще пульсирующими циклами.

Развитие малоциклового усталости металла сварного соединения обусловлено наличием областей с малым сопротивлением появлению и распространению трещин. Отрицательную роль на стойкость сварного соединения оказывают различного рода концентраторы, в роли которых могут выступать трещины, шлаковые включения, пористость. Также отрицательно влияют различия в механических свойствах областей сварного соединения [46].

Причем различие в механических свойствах областей сварного соединения способно привести к перераспределению деформаций, и локализации деформаций на узких участках. Также отрицательную роль на стойкость сварного соединения оказывают различия в структуре основного металла и металла шва. Для металла непосредственно сварного шва (наплавленный металл) характерна литая структура. Литая структура характеризуется кристаллитами больших размеров [27]. Которые характеризуются различием свойств в зависимости от направления. Следующая область термического влияния характеризуется

значительными изменениями. Особенности структуры зависят от принятых режимов получения сварного соединения. Также существенное влияние оказывает на структуру предварительный нагрев сварного соединения и термообработка по окончании процесса сварки. Подводя итоги, можно сказать, что для сварного соединения характерным состоянием является значительная структурная неоднородность [43].

Для сварных соединений по тем или иным причинам характерными моментами являются неоднородности. Неоднородности характеризуются различием механических свойств, различием структуры. В состав сварного соединения могут входить области, предел текучести которых и предел прочности меньше, чем у основного металла [28]. В таких областях возникает сложное напряженное состояние. При действии на сварное соединение знакопеременных нагрузок такое напряженное состояние значительно снижает стойкость сварного соединения знакопеременным нагрузкам. Безусловно, характер напряженного состояния может отразиться и на сопротивлении усталостному напряжению гетерогенного сварного соединения при малоцикловом нагружении,

В работе [44] было проведено исследование влияния механической неоднородности сварных соединений на сопротивление усталостному разрушению при малоцикловом жестком (с заданной амплитудой деформаций) нагружении, а также перераспределения деформаций при упругопластическом нагружении. «Коэффициенты механической неоднородности сварного соединения по пределу пропорциональности и прочности составляли 1,90 и 1,04, соответственно. Образцы с плоской рабочей частью сечением 30x10 мм вырезали из сварных пластин, собираемых с зазором 5 и 7,5 мм, что обеспечивало относительную толщину прослойки соответственно, 0,5 и 0,75. Сварной шов в изготовленных образцах был расположен в середине рабочей части, В процессе испытания фиксировалось число циклов, соответствующее появлению усталостной трещины размером 1-2 мм, и число циклов до разрушения» [35].

При действии на сварное соединение знакопеременных нагрузок максимум деформаций происходит в центре прослойки. Причем увеличение

толщины прослойки сказывается негативно на величинах деформаций.

Сварка сталей, применяемых для строительства трубопроводов усложняется по причине опасности получения холодных трещин в околошовной зоне [45]. Для обеспечения равнопрочности основного и наплавленного металла необходимо снизить содержание углерода в металле сварного шва и легировать его соответствующими элементами. Однако, это, в свою очередь, приведёт к повышению вероятности образования горячих трещин в металле сварного шва. Исходя из этого следует заключить, что задача обеспечения равнопрочности основного металла и наплавленного металла при сварке трубопроводных сталей является актуальной [29].

Выводы по разделу

В качестве вывода по данному разделу следует принять во внимание что не только дефекты сварных швов оказывают влияние на эксплуатационные характеристики сварных соединений магистральных трубопроводов, но и неоднородности обусловленные пластичными и твердыми слоями.

2 Методика исследования

2.1 Общий принцип расчета сварных металлоконструкций

За несколько десятилетий метод получения неразъемных соединений технологией сварки занял ведущее место среди способов обработки в самых разных отраслях промышленности. Технология получения неразъемных соединений сваркой характеризуется многообразием технологических вариантов. Способы сварки подразделяются на сварку плавлением, сварку давлением [2].

Однако если перечислить технологические варианты то в общей сложности можно насчитать 5 вариантов получения сварных соединений плавлением. Сюда следует отнести дуговые способы сварки, способ сварки при котором тепло выделяется при прохождении электрического тока через расплавленный шлак. При электрошлаковом процессе источником нагрева является ток, который проходит через электропроводный флюс [46]. Под действием проходящего через него тока флюс расплавляется и нагревается до значительных температур, превращаясь в шлаковую ванну. При наплавке присадочный металл подается в шлаковую ванну, плавится и очищается от примесей. Эффективность процесса электрошлаковой наплавки определяется составом шлака. Под действием конвективных потоков шлаковая ванна находится в непрерывном движении со значительной скоростью. Благодаря тому, что расплавленный шлак обладает высокой рафинирующей способностью, происходит уменьшение содержания в металле вредных примесей, значительно повышается качество наплавленного слоя [31].

Другим вариантом сварки плавлением является применение для нагрева металла тепла, выделяемого при сгорании в кислороде газообразных углеводородов. Однако данный метод сварки характеризуется малыми значениями концентрации энергии. И применяется ограниченно,

преимущественно там, где есть нужда в дешевом оборудовании и наличествует высококвалифицированный персонал [30].

Технологические процессы сварки характеризуются широким практическим опытом ее применения. Сварка нашла применение как в микроэлектронике, так и при создании крупногабаритных изделий в промышленности. Везде где сварка применяется она обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики получаемых сварных соединений [36].

Однако на нынешнем этапе развития технологий сварки к качеству сварных соединений предъявляются все более ужесточаемые требования. Для того, чтобы удовлетворить их требуются не только новые сварочные материалы и технологические приемы выполнения сварных соединений, но и современные приемы проектирования конструкций соединений, параметров режимов сварки. Для решения задач проектирования как сварных соединений так и технологий сварки нашли применение современные технологии автоматизированного проектирования. За счет введения в системы автоматизированного проектирования модулей расчета по методу конечных элементов появляется возможность на этапе рабочего проектирования оценить те или иные конструктивные решения [34].

Поэтому разработчики систем автоматизированного проектирования включают модули проектирования сварных соединений в свои программные продукты. В частности такой модуль есть и в пакете NX. Доступ к нему обеспечивается последовательным выполнением

Основу этапов жизненного цикла изделий в промышленности составляют технологии создания трехмерной твердотельной модели свариваемого изделия. Практически каждая среда для проектирования изделий в промышленности содержит в своем составе блок CAD. Позволяющий используя те или иные приемы создавать достаточно реалистичные модели промышленных изделий [32].

«Модули сварки позволяют проектировать сварные соединения с использованием широко применяемых в промышленности методов сварки.

Конструктор может спроектировать точечную сварку, роликовый сварной шов и дуговую сварку различной формы (проточки, пазы, ребра и т.д.). После создания модели автоматически создаются чертеж и сопровождающая документация. Модуль поддерживает также создание клеевых соединений» [10].

«Модуль предназначен для моделирования сварных соединений. Модуль предоставляет информацию о сварных швах и соединениях для выполнения анализа методом конечных элементов. В настоящее время не поддерживает моделирование пайкой, болтами и клепкой. В приложении автоматически создается 2D документация и аннотации на основе 3D элементов сварки» [15].

Активируя последовательно в окне моделирования такие команды как Menu, Insert, Weld assisnant, переходим в предоставляемые программной средой возможности по проектированию сварных соединений.

Перечень предоставляемых программой возможностей достаточно обширен. Это стыковые соединения, groov weld, угловые соединения, fillet weld. Наш кронштейн предусматривает тип сварного соединения Т – тавровые соединения, и подпятники, воспринимающие сосредоточенные силы соединены с верхним поясом балки нахлесточными соединениями. Для выполнения виртуальных швов данным инструментарием программы достаточно активировать пункт меню fillet weld. Предоставляемые указанным сервисом возможности в плане создания сварных соединений обеспечивают выполнение как тавровых соединений так и нахлесточных [33].

Активируем последовательно в окне моделирование такие команды как Menu, Insert, Weld assisnant и далее fillet weld указываем размер катета сварного соединения, Z, указываем плоскости, где должен быть расположен сварной шов, рисунок 11. Появляется «фантом» сварного соединения – оранжевый треугольник – и после нажатия кнопки ОК или Apply виртуальное сварное сварное соединение выполняется.

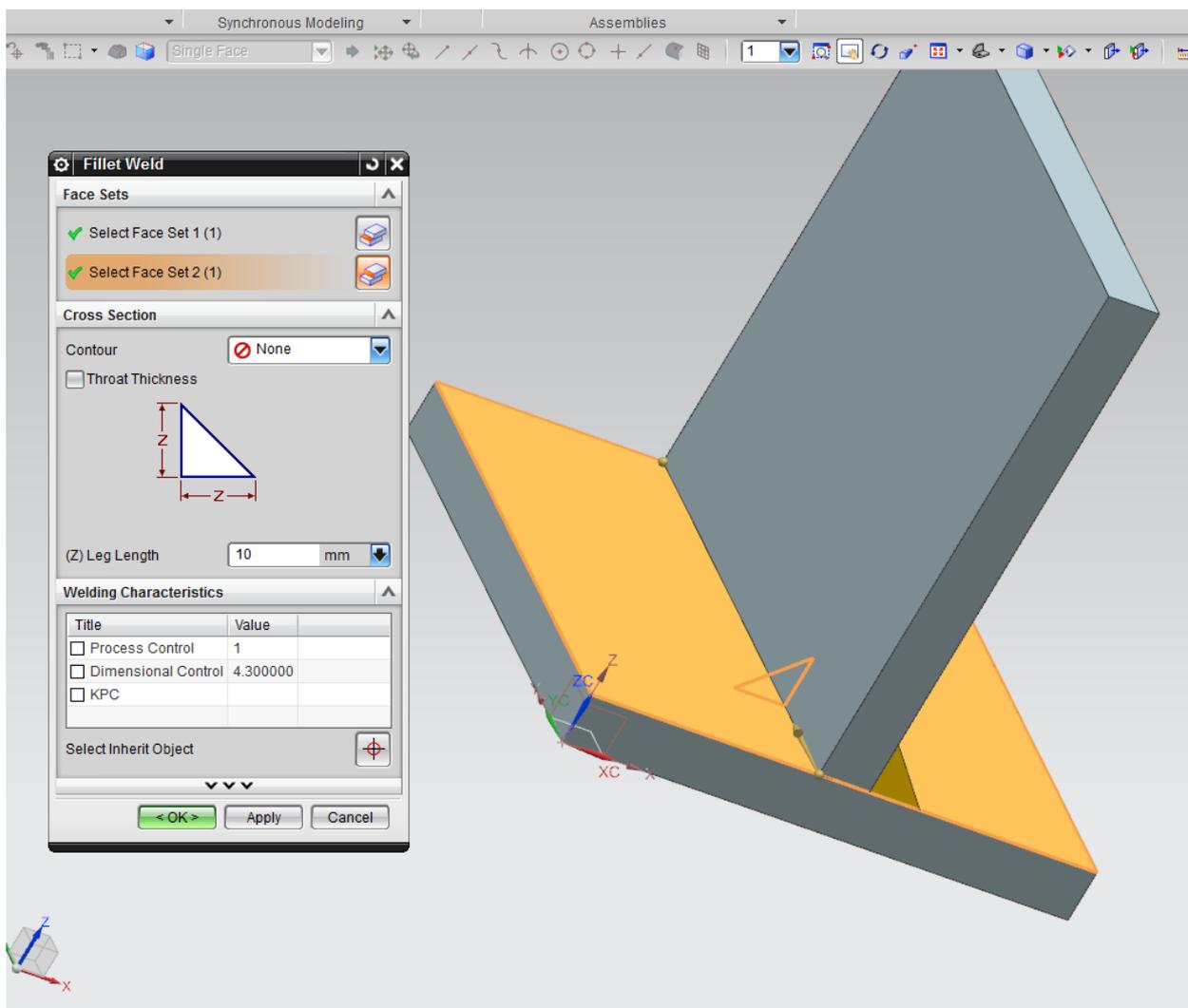


Рисунок 11 – Подготовленная к выполнению сварного соединения сборка

Рассмотрим возможности конструирования сварных соединений на двух примерах, кронштейн и балка. Обе металлоконструкции нашли широкое применение в различных отраслях машиностроения и строительства.

Кронштейн состоит из следующих деталей, кронштейн, рисунок 12, пластина, рисунок 13. Подпятник к которому прикладывается нагрузка, рисунок 14. Толщина деталей к которым технологией сварки должны быть наложены сварные швы составляет 10 мм. Поэтому катет шва принимаем 10 мм.

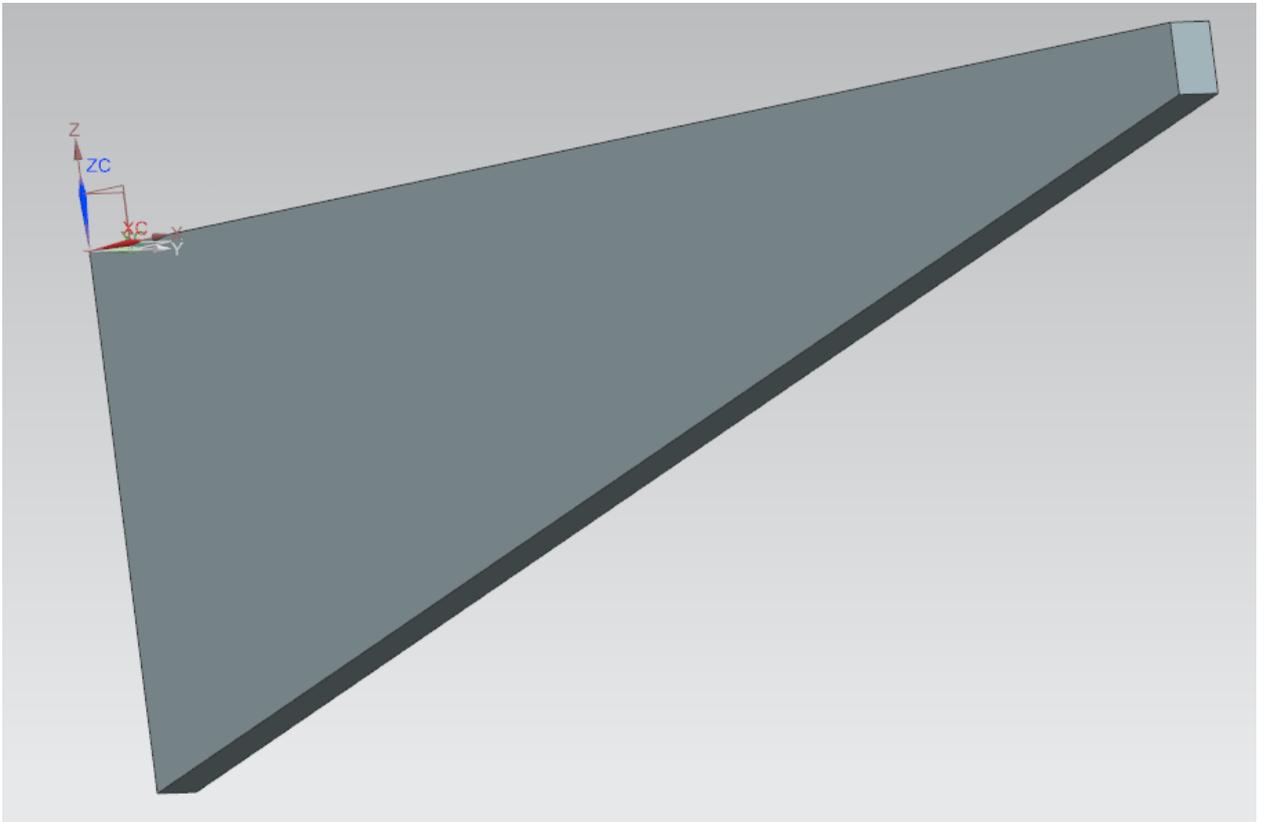


Рисунок 12 - Кронштейн

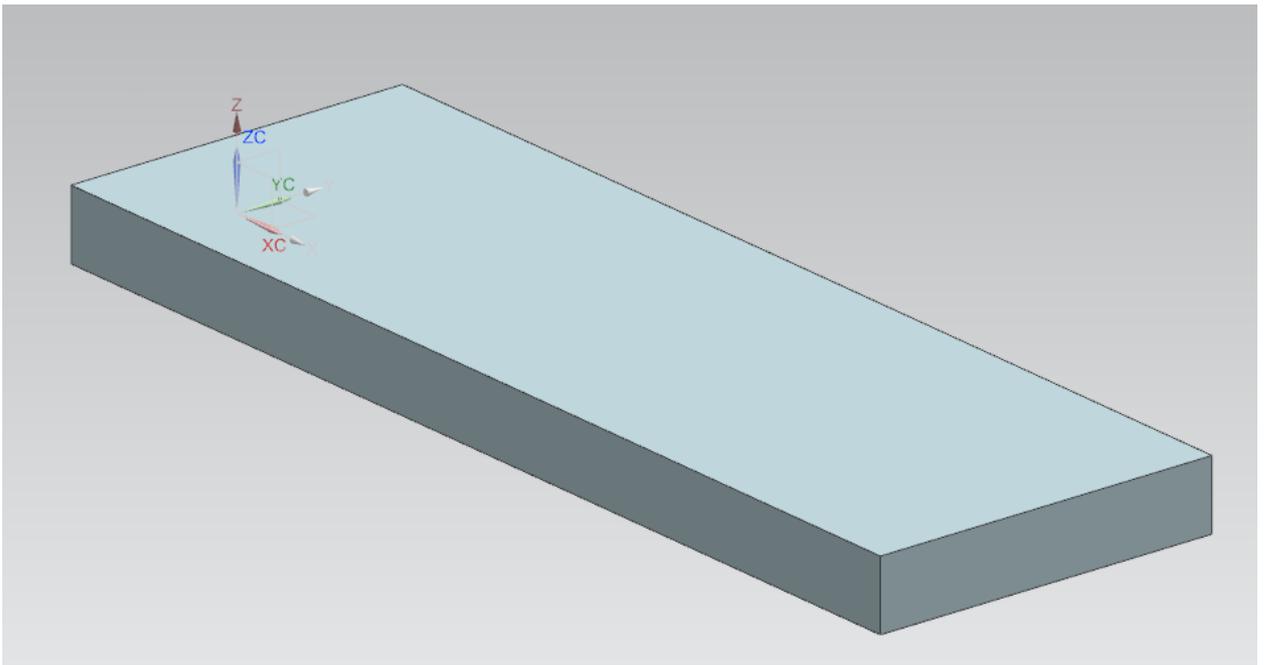


Рисунок 13 – Пластина

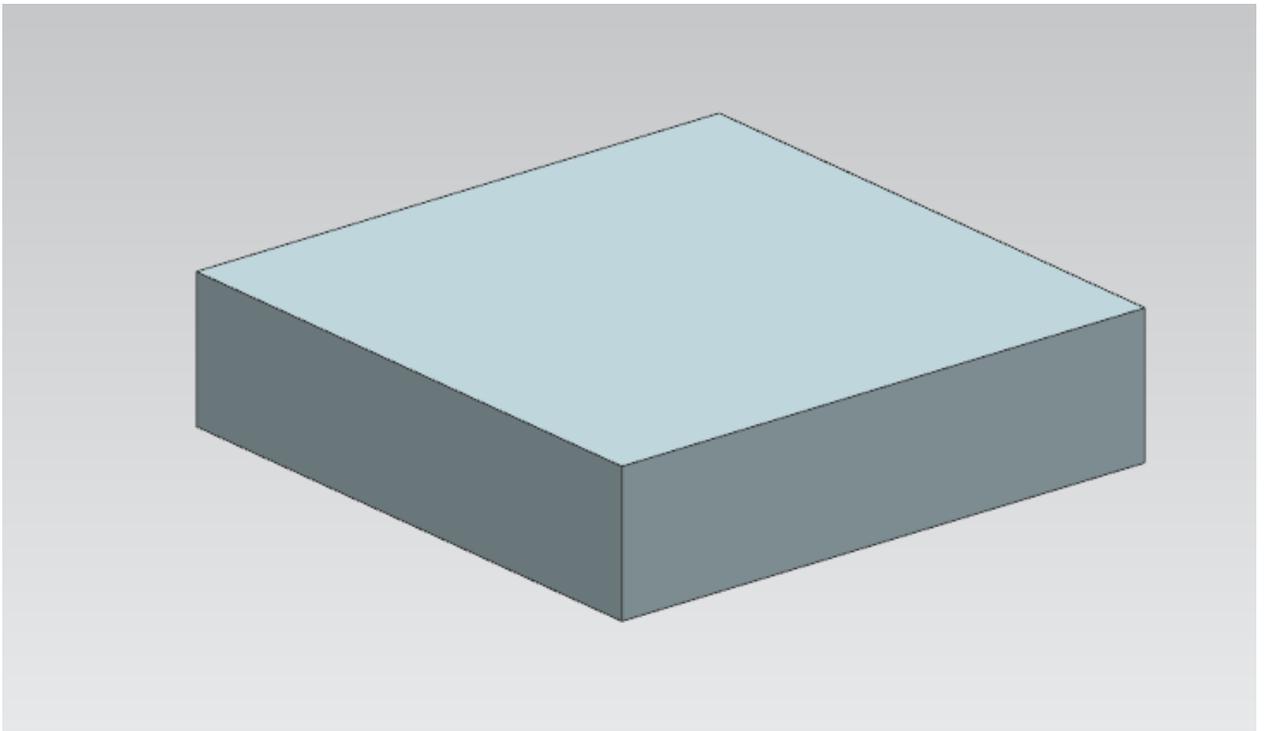


Рисунок 14 – Подпятник

Переходим в модуль сборки, за счет применения таких возможностей блока трехмерного моделирования сборок как «касание», «на расстоянии» в целом обеспечивается заданное положение элементов кронштейна друг относительно друга в пространстве, рисунок 15.

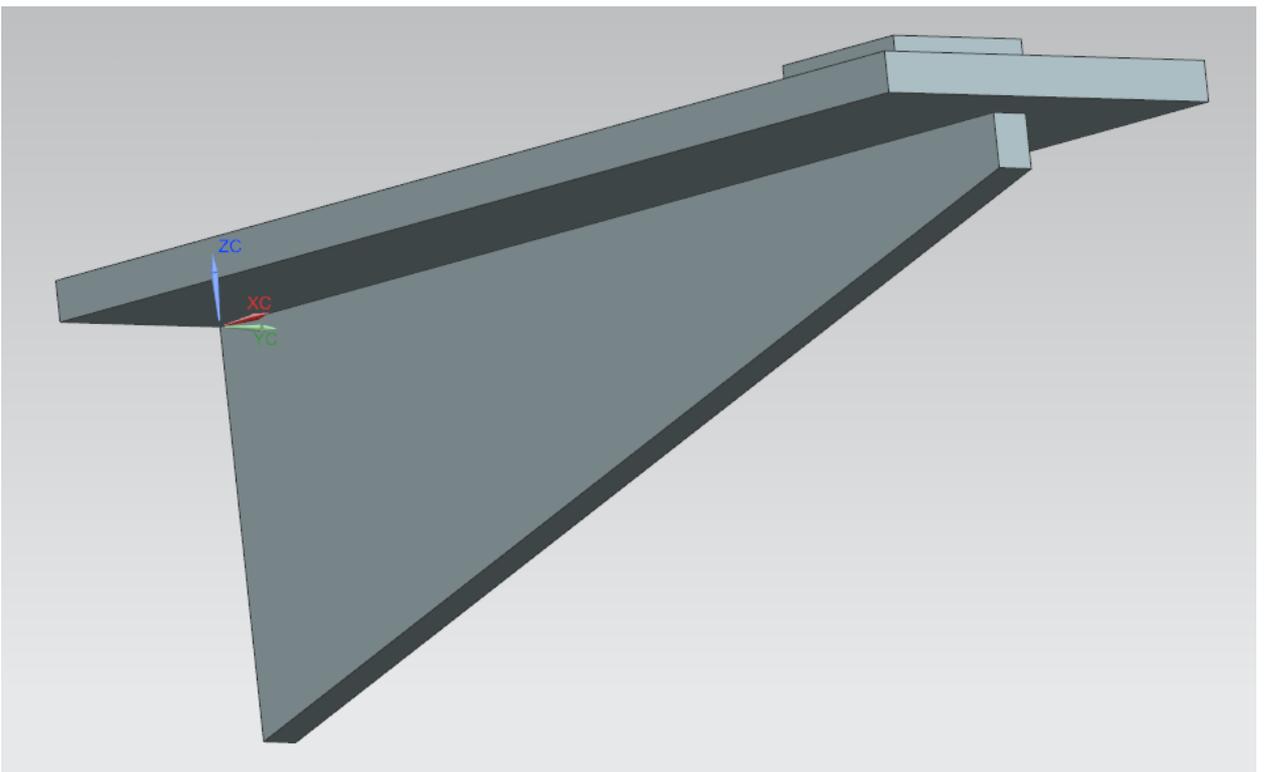


Рисунок 15 – Кронштейн без сварных швов

Активируем последовательно в окне моделирование такие команды как Menu, Insert, Weld assistant и далее fillet weld указываем размер катета сварного соединения, Z, указываем плоскости, где должен быть расположен сварной шов, результат работы показан на рисунке 16.

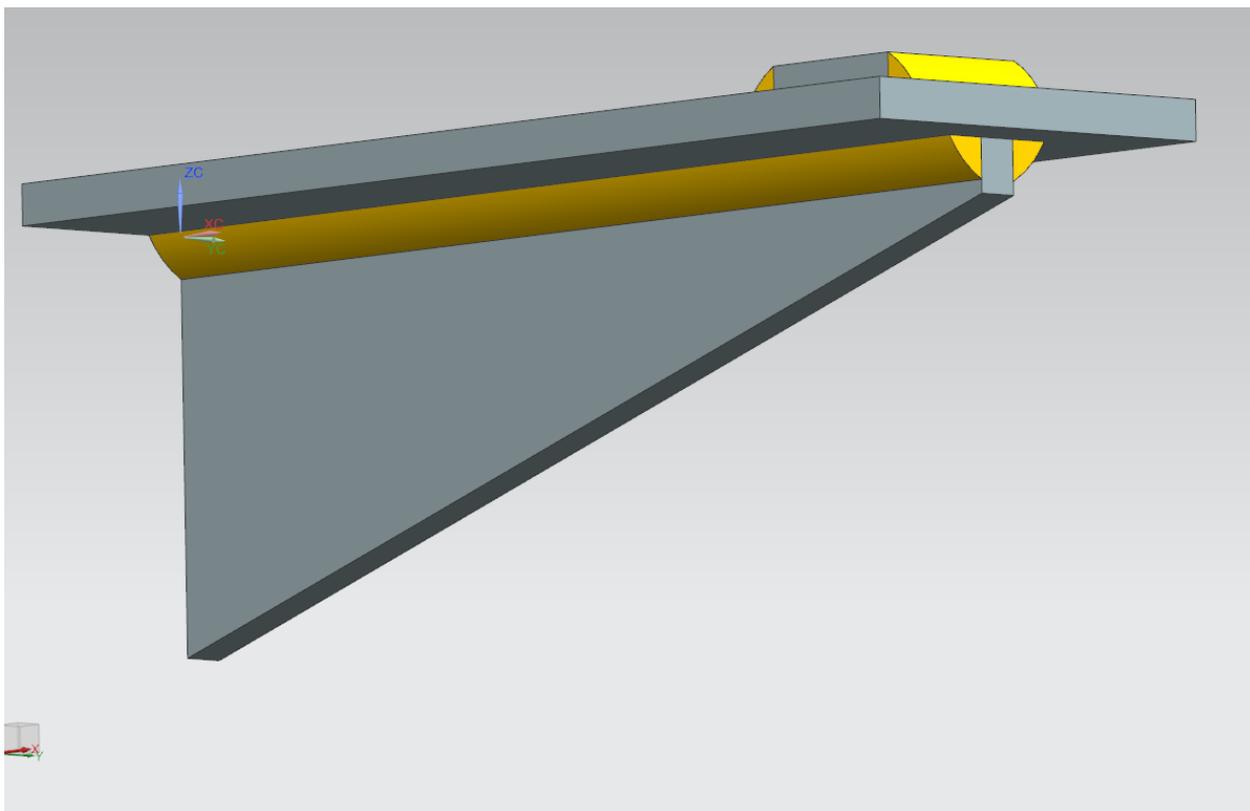


Рисунок 16 – Кронштейн со сварными швами.

Затем выполняем переход в модуль деформационно-прочностного анализа. Активируем последовательно File, New, в появившемся окне переходим на вкладку Simulation, и активируем на выполнение верхнюю строку NX Nastran, Fem. После выполнения указанных команд система обеспечивает возможность разбиения созданной трехмерной модели балки на конечные элементы и задать материал. Сначала появляется окно New Fem и окно CAD Part с превью модели кронштейна. В окне New Fem на выполнение активируется кнопка ОК и модель из окна CAD Part переносится в рабочее пространство экрана [46].

Программа предлагает для разбиения несколько вариантов конечных элементов. Из всего перечня выбираем принимаем 3D Tetrahedral. Разбиение модели на конечные элементы идет на объемные элементы тетраэдрической формы. Выделяем рамочкой модель балки и затем кликаем на кнопку 3D Tetrahedral. Появляется окно 3D Tetrahedral Mesh. В поле Element Size указываем размер конечного элемента нажимаем кнопку ОК и система выполняет разбивку модели балки на конечные элементы. При задании размера конечного элемента необходимо помнить о том, что малый размер элемента увеличивает время, необходимое для получения результата расчетов, однако с другой стороны, точность получаемых результатов возрастает с уменьшением размера элемента.

Кронштейн выполнен как сборка, следовательно, для него обязательной операцией является объединение сетки, на рисунке 17 не совпадают вершины некоторых пирамидок.

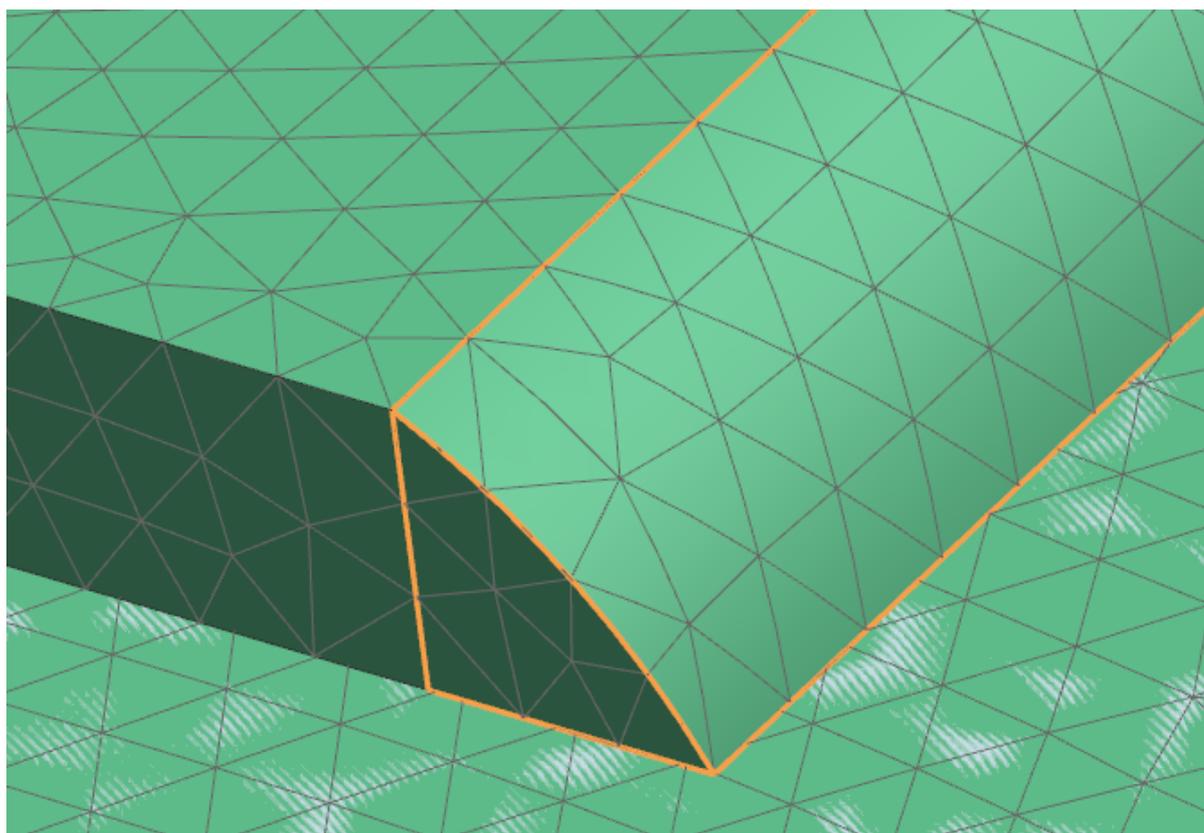


Рисунок 17 – Нет совпадения вершин пирамидок.

Следовательно при расчете каждый элемент балки будет рассчитываться самостоятельно, не в связи с остальными.

Активируем функцию Mesh Mating и дальнейшую работу ведем в окне Mesh Mating Conditions. Задаем тип объединения сетки, как объединять, и дистанцию поиска. После объединения сетки необходимо активировать кнопку Update для завершения процесса. Результатом перечисленных действий будет стыковка вершин пирамидок, т.е. все детали кронштейна объединены в монолит, рисунок 18.

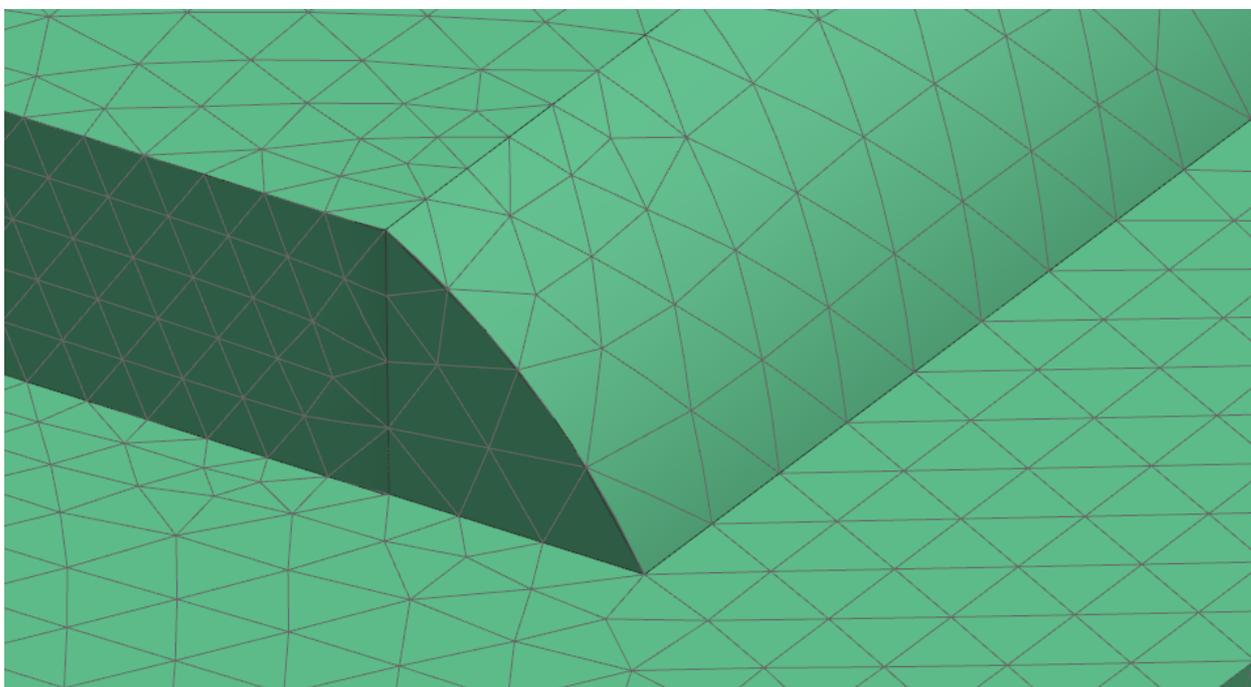


Рисунок 18 – Вершины пирамидок совпадают

После того, как выполнена разбивка балки на конечные элементы активируя кнопку More и далее Assign Materials назначаем для кронштейна материалы. Следует помнить, что сама по себе балка состоит из разных деталей, в том числе и сварные швы относятся к самостоятельным элементам сборки. Таким образом система предоставляет возможность для выполнения расчетов задавать для каждой конкретной детали свой материал. Назначаем

из предложенного программой перечня материалов зарубежный аналог нашей стали 3.

После того, как для рассматриваемой модели кронштейна назначены материалы переходим к следующему этапу работы. Ативируем последовательно File, New, затем активируем на выполнение следующую строку NX Nastran Sim. В появившихся окнах New Simulation и Solution последовательно отвечаем ОК и балка разбитая на конечные элементы попадает в рабочее пространство программы. Constrain Type Load Type Solve Results.

Задаем ограничения для кронштейна, прикладываем нагрузку, рисунок 19.

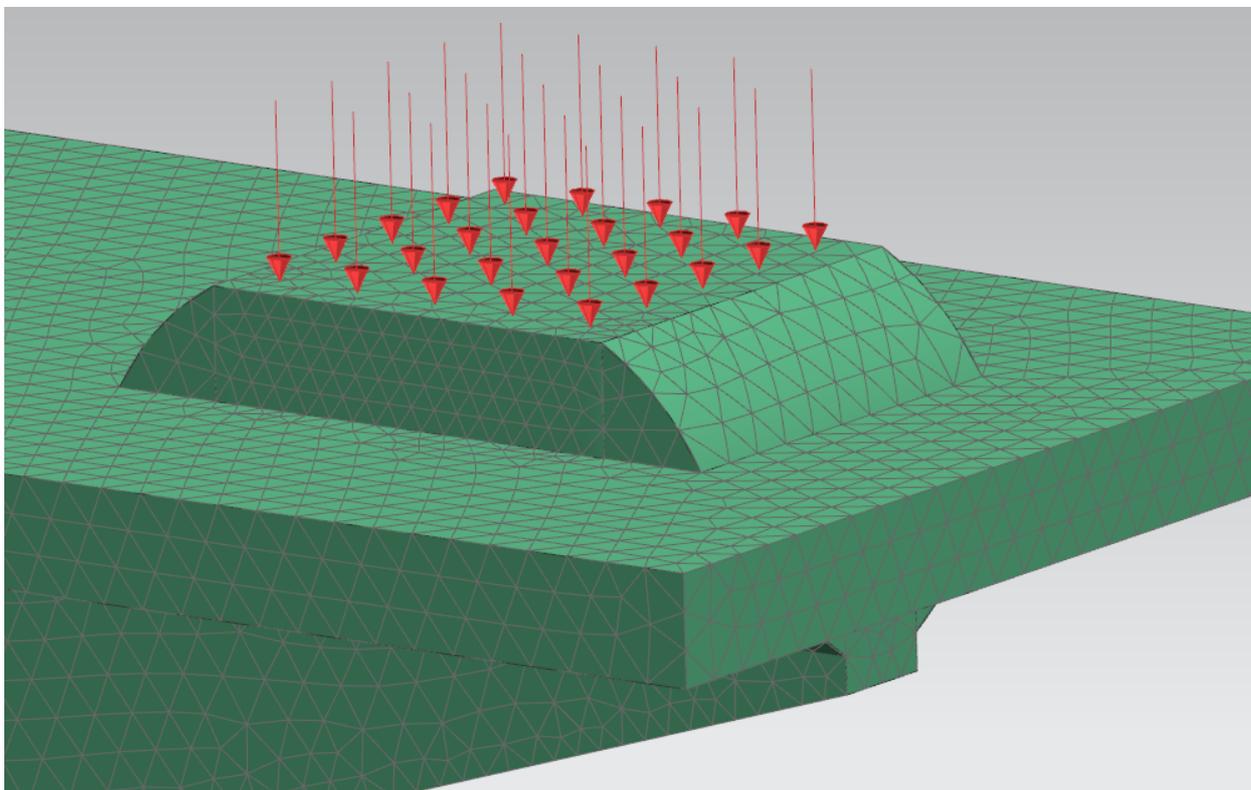


Рисунок 19 – К кронштейну приложена нагрузка.

Запускаем на выполнение расчеты активируя кнопку Solve, после некоторого времени программа выдает нам результаты расчетов, получить на экране компьютера результаты расчетов можно активируя на выполнение

кнопку Results, анализируем результаты деформационно-прочностного анализа, рисунок 20.

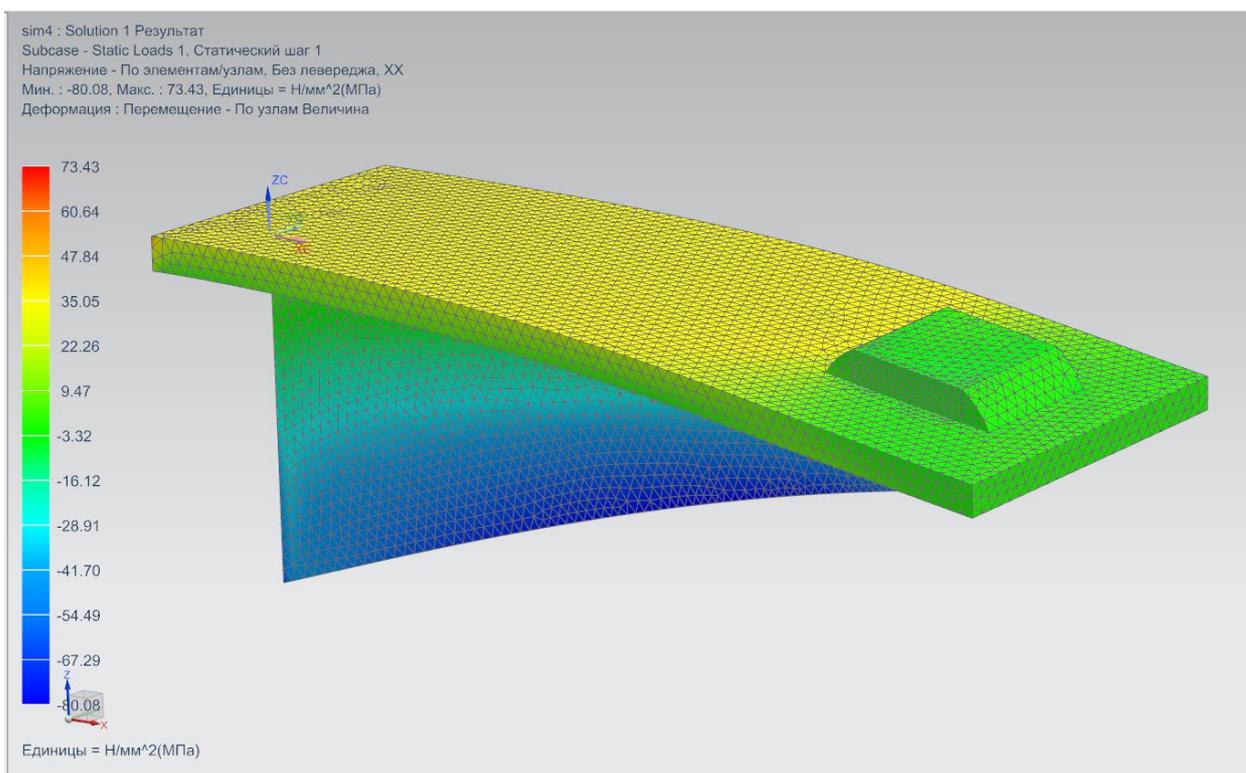


Рисунок 20 – Напряжения в анализируемом кронштейне

Теперь, рассмотрим возможности конструирования изделия «балка» в графической среде NX. Общий вид балки показан на рисунке 21. В данном случае за счет применения таких возможностей блока трехмерного моделирования сборок как «касание», «на расстоянии» в целом обеспечивается заданное положение элементов балки друг относительно друга в пространстве. При повороте изделия балка в пространстве взаимное расположение элементов конструкции неизменно, рисунок 22.

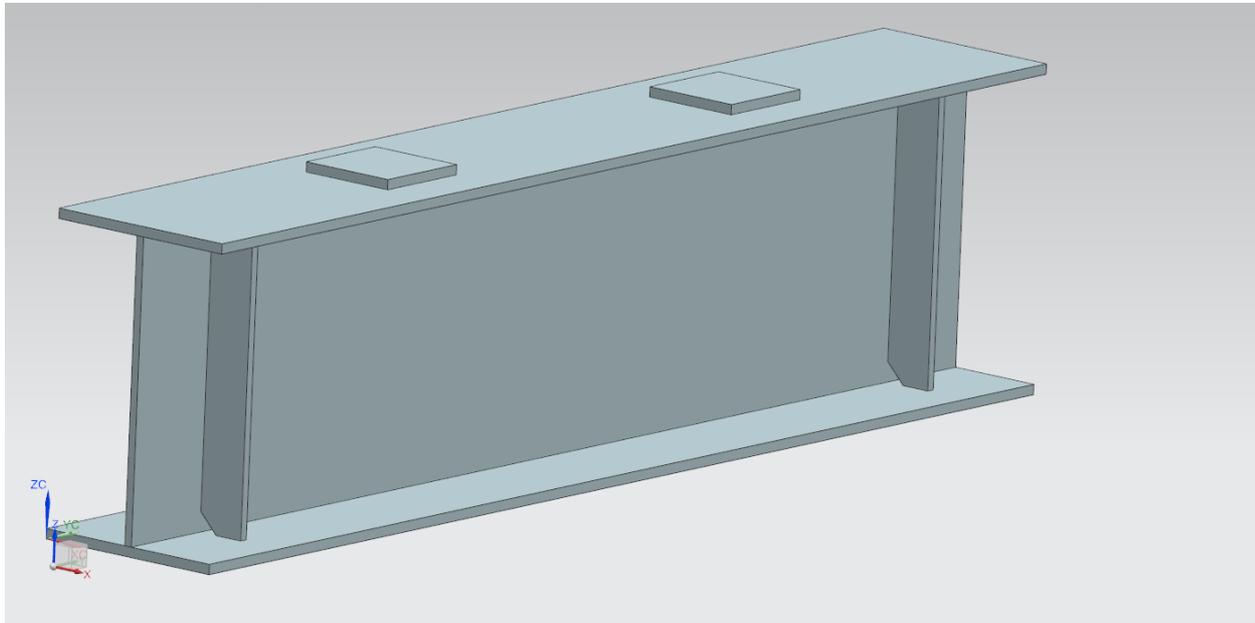


Рисунок 21 – Общий вид балки

Далее рассмотрены возможности пакета NX, предоставляемые технологу в плане проектирования технологии получения сварных швов и их исследования.

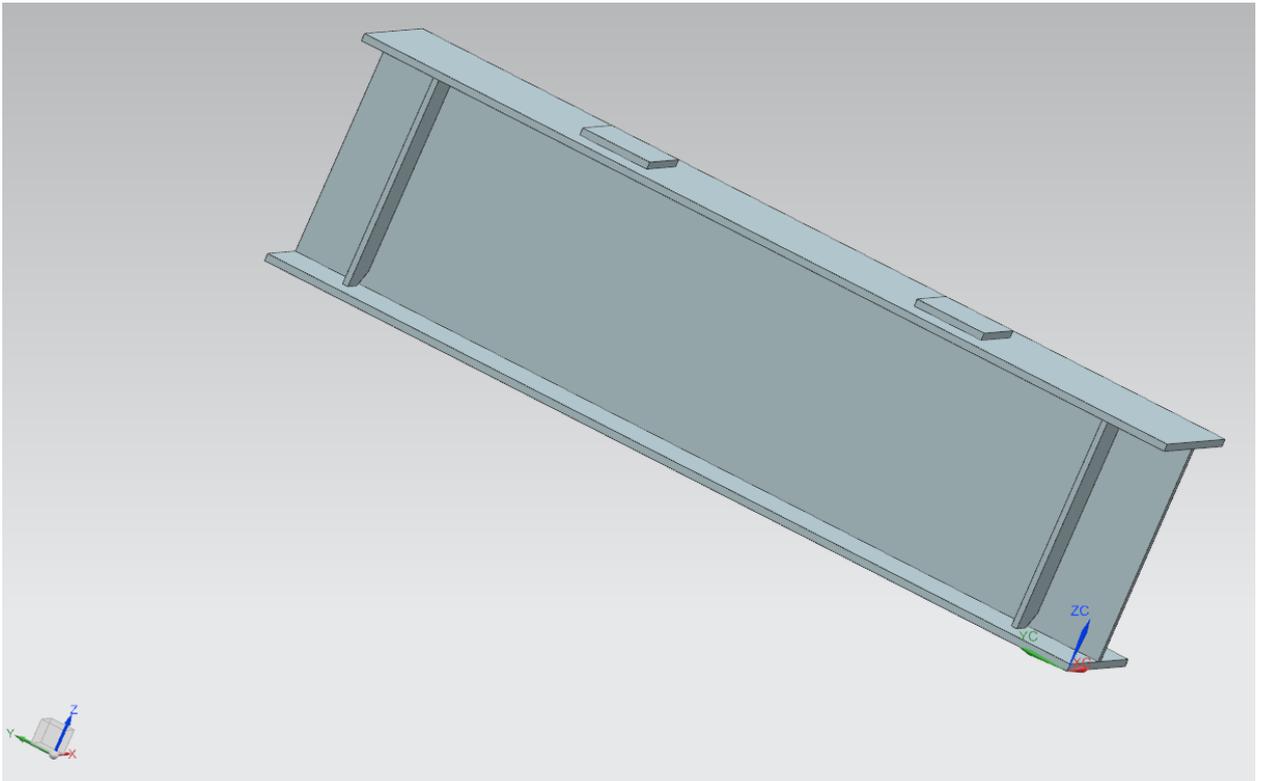


Рисунок 22 – Поворот балки средствами панели инструменты

Предоставляемые конструктору возможности пакета NX в этом направлении достаточно обширны. Однако совместимость российских стандартов, характеризующих геометрические параметры сварных соединений, таких как ГОСТ 5264-80, ГОСТ 14771-79, ГОСТ 8713-80, с зарубежными стандартами вызывает некоторые вопросы.

Тем не менее, балка с выполненными виртуальными сварными соединениями представлена на рисунке 23. Сварные соединения показаны на виртуальной модели желтым цветом. Поскольку изначально все пластины из которых выполнялась указанная металлоконструкция принимались толщиной 10 мм кате шва, Z, принимали 10 мм.

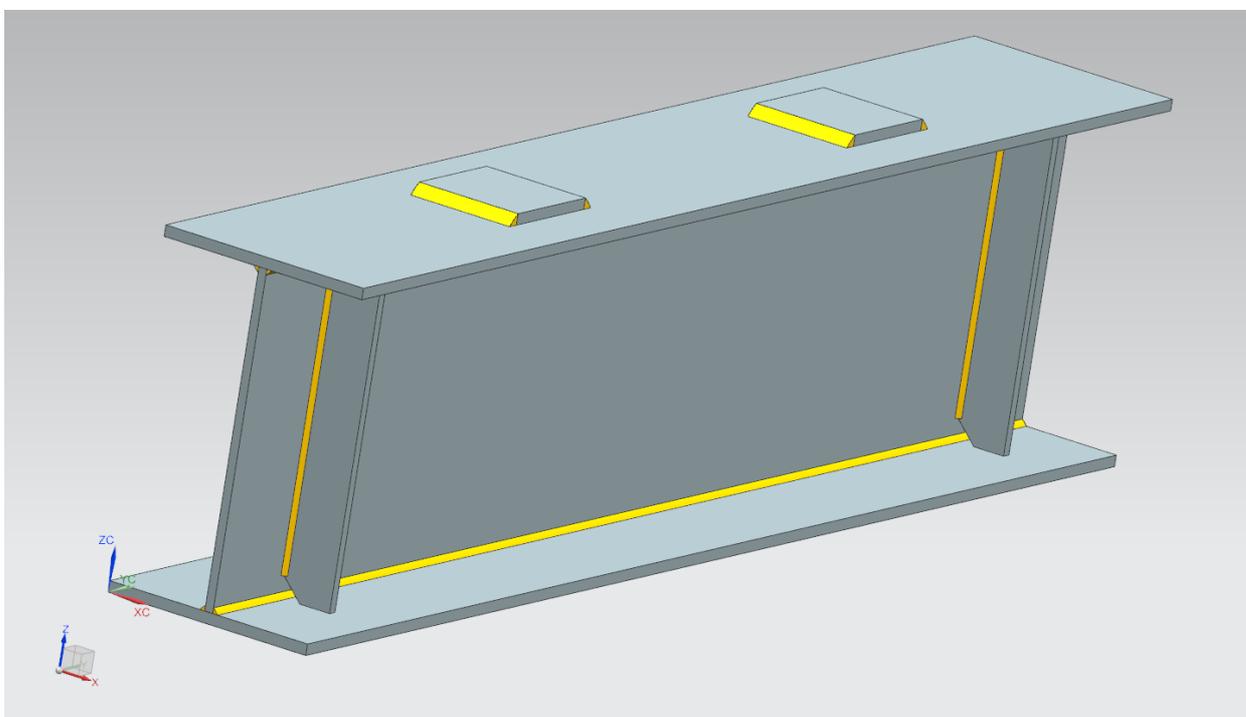


Рисунок 23 – Модель сварной балки со сварными соединениями

Следующий этап работы с виртуальной конструкцией переход в модуль деформационно-прочностного анализа. Активируем последовательно File, New, в появившемся окне переходим на вкладку Simulation, затем активируем на выполнение верхнюю строку NX Nastran, Fem. После выполнения указанных команд система обеспечивает возможность разбиения

созданной трехмерной модели балки на конечные элементы и задать материал. Сначала появляется окно New Fem и окно CAD Part с уменьшенным вариантом модели балки. В окне New Fem на выполнение активируется кнопка ОК и модель из окна CAD Part переносится в рабочее пространство экрана.

Из предлагаемых программой вариантов разбиения модели на конечные элементы принимаем 3D Tetrahedral. Разбиение модели на конечные элементы идет на объемные элементы тетраэдрической формы. Выделяем рамочкой модель балки и затем кликаем на кнопку 3D Tetrahedral. Появляется окно 3D Tetrahedral Mesh. В поле Element Size указываем размер конечного элемента нажимаем кнопку ОК и система выполняет разбивку модели балки на конечные элементы. Задавая размер конечного элемента следует помнить о том, что малый размер элемента увеличивает время, необходимое для получения результата расчетов, однако с другой стороны, точность получаемых результатов возрастает с уменьшением размера элемента.

Для балки выполненной по системе сборки обязательной операцией является объединение сетки, на рисунке 24 не совпадают вершины пирамидок.

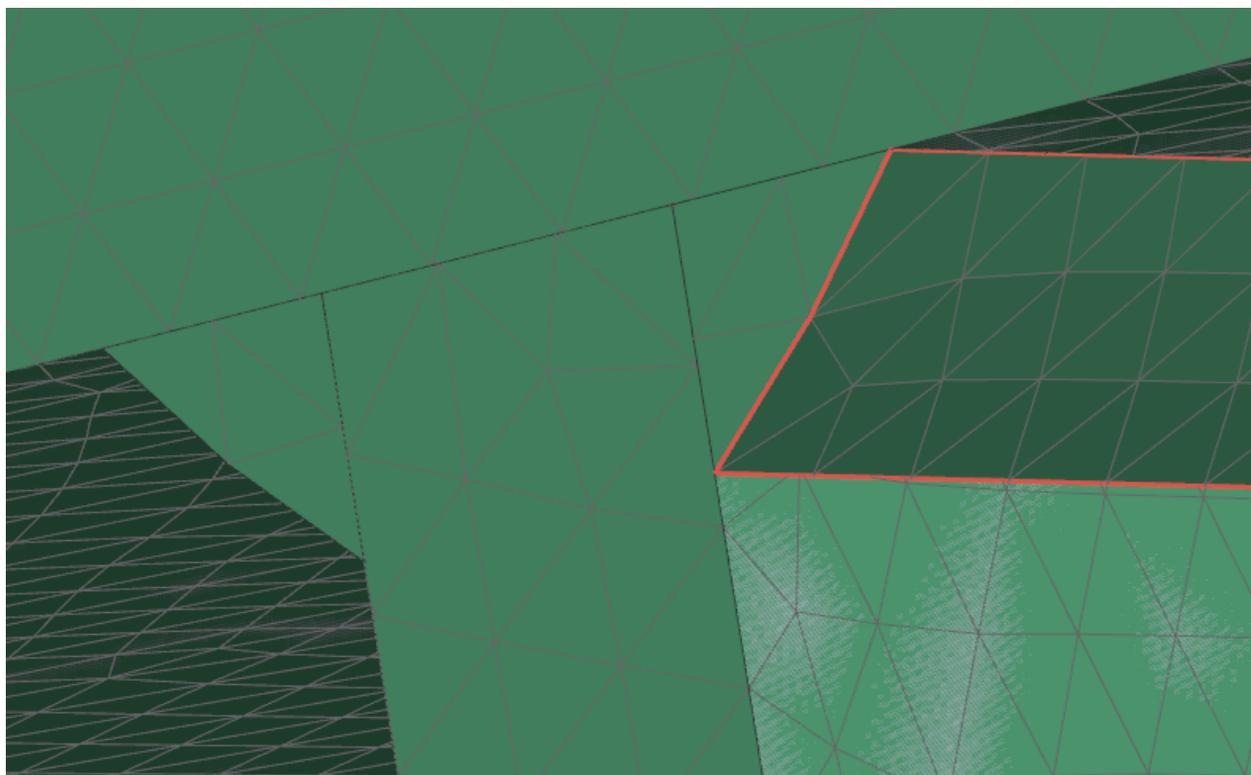


Рисунок 24 – Вершины пирамидок не совпадают

Следовательно при расчете каждый элемент балки будет рассчитываться самостоятельно, не в связи с остальными.

Активируя кнопку Mesh Mating дальнейшую работу ведем в окне Mesh Mating Conditions. Задаем тип объединения сетки, как объединять, и дистанцию поиска. После объединения сетки необходимо активировать кнопку Update для завершения процесса. Результатом перечисленных действий будет стыковка вершин пирамидок, т.е. все детали балки теперь объединены в монолит, рисунок 25.

После того, как выполнена разбивка балки на конечные элементы активируя кнопку More и далее Assign Materials назначаем для балки материалы. Следует помнить, что сама по себе балка состоит из разных деталей, в том числе и сварные швы относятся к самостоятельным элементам сборки. Таким образом система предоставляет возможность для выполнения расчетов задавать для каждой конкретной детали свой материал.

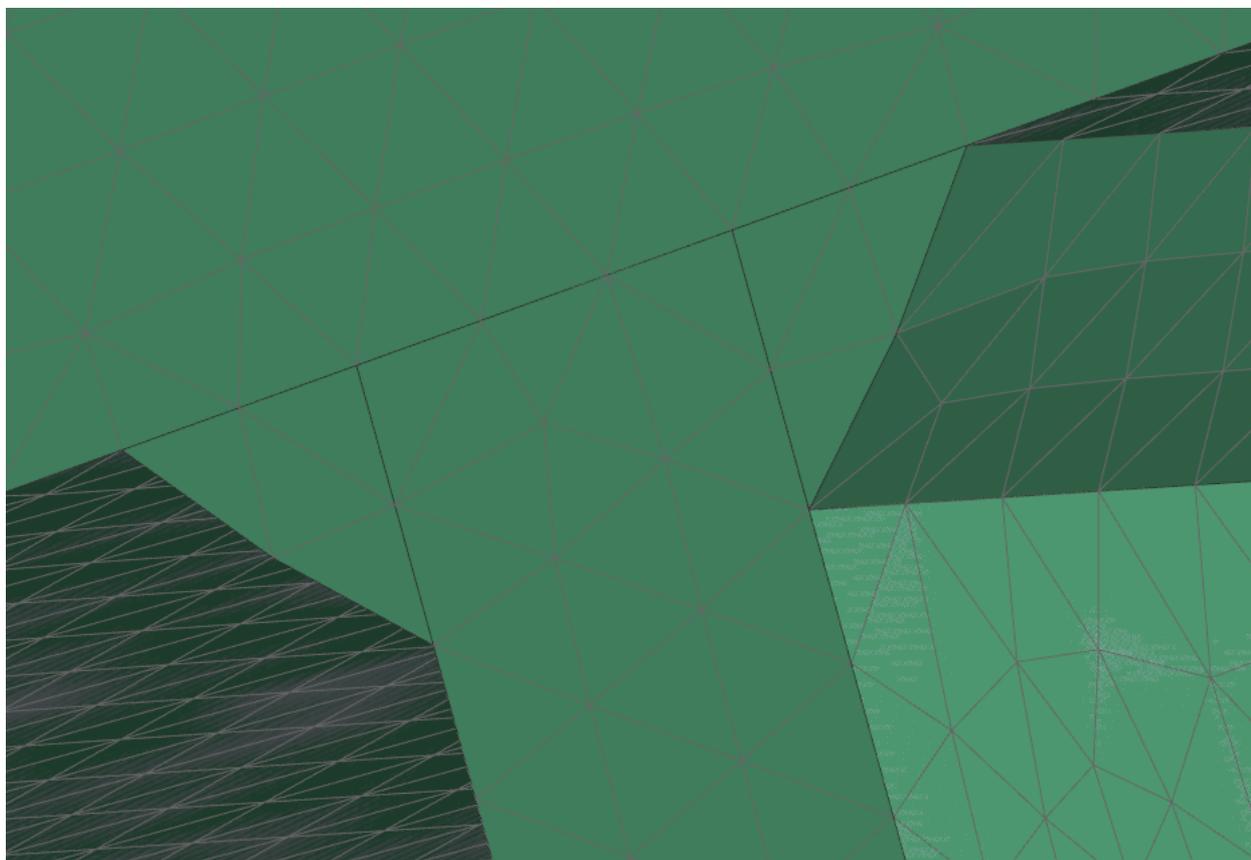


Рисунок 25 – Сетка объединена

После того, как для рассматриваемой модели балки назначены материалы переходим к следующему этапу работы. Ативируем последовательно File, New, затем активируем на выполнение следующую строку NX Nastran Sim. В появившихся окнах New Simulation и Solution последовательно отвечаем ОК и балка разбитая на конечные элементы попадает в рабочее пространство программы. Затем активируя Constrain Type получали фиксацию балки в пространстве. Командой Load Type прикладывали нагрузку к подпятникам, и активировали на выполнение командой Solve расчеты. Через какое то время система выполнив расчеты подсвечивает кнопку Results. Можно ознакомиться с результатами расчетов по методу конечных элементов, рисунок 26. Если рассмотреть сварные швы, рисунок 27, то получается что поясные швы недогружены.

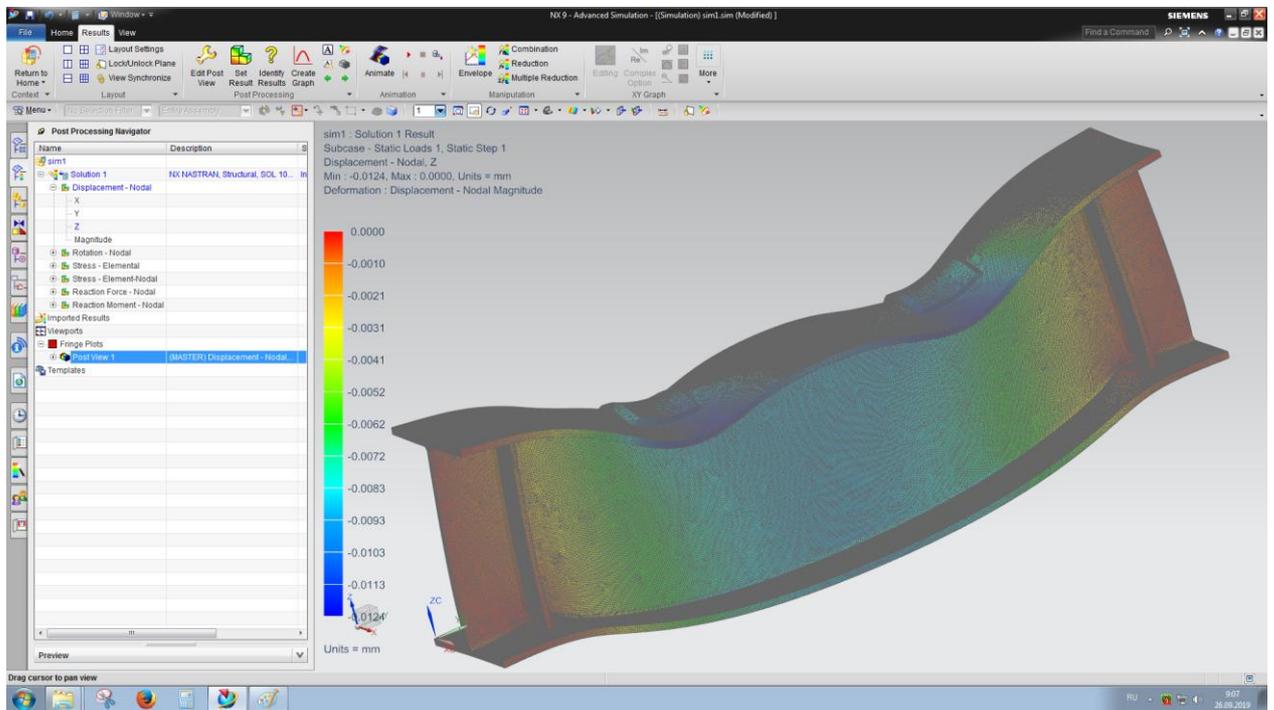


Рисунок 26 – Общий вид напряженно деформированного состояния балки

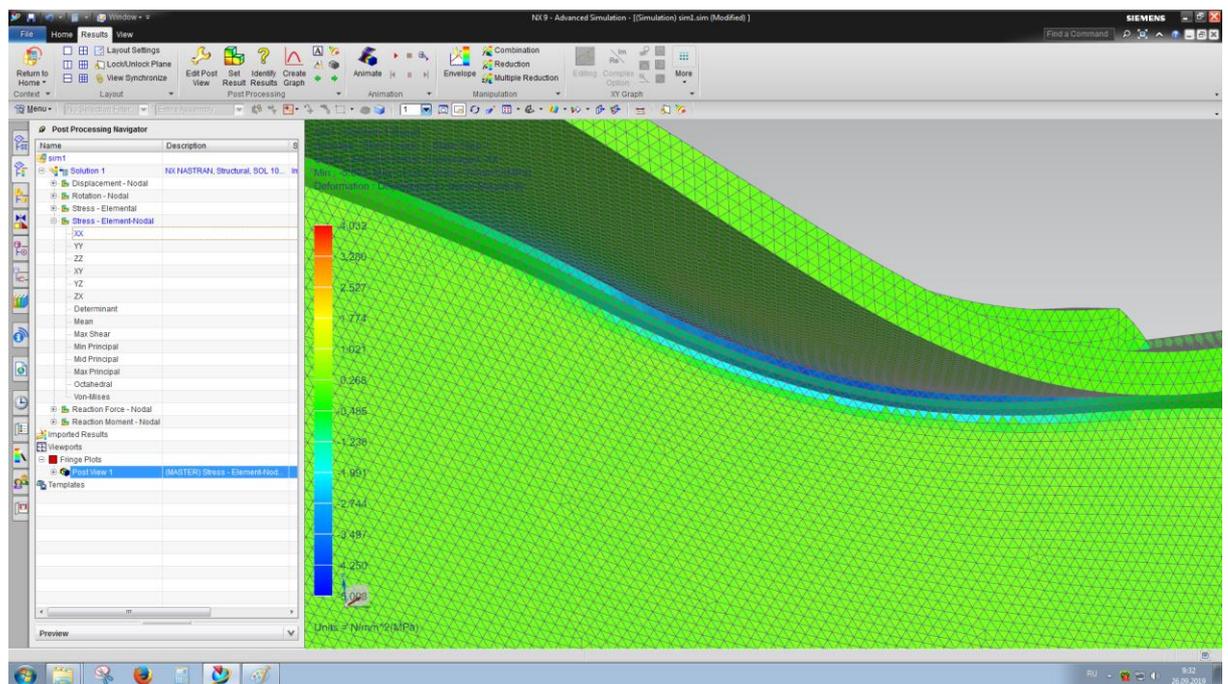


Рисунок 27 – Недогружен сварной шов

Анализ рисунка 27 позволяет конструктору сделать вывод о возможности уменьшения катета сварного соединения.

2.2 Создание дефектов типа трещина и непровар

Для того чтобы определить прочность сварного соединения необходимо принимать в расчет что наплавленный металл может по своему химическому составу отличаться от химического состава основного металла. Кроме того, структура наплавленного металла и околошовной зоны может иметь отличия от структуры основного металла. Таким образом сварное соединение по своим свойствам неоднородно. Кроме того, при определении прочности сварного соединения необходимо учитывать различия в геометрии сварного соединения. При переходе от основного металла к наплавленному по причине появления усиления сварного шва имеет место геометрическая неоднородность. В месте перехода от основного металла к наплавленному появляется концентрация напряжений, обусловленная геометрическими факторами. Также негативное влияние на распределение напряжений оказывают дефекты сварного соединения появление которых обусловлено технологическими нюансами. Размер и геометрия таковых может оказать влияние на общую прочность сварного узла. Используя методы трехмерного моделирования становится возможным создание виртуальной трехмерной модели сварного соединения, с имитацией технологических дефектов [1]. Здесь виртуальная модель сварного шва создается с использованием традиционных приемов трехмерного твердотельного моделирования.

Однако сейчас системы создания трехмерных твердотельных моделей программисты включают модуль создания моделей сварных соединений. В программной среде NX для активации модуля в окне моделирования такие команды как Menu, Insert, Weld assistant, переходим в предоставляемые программной средой возможности по проектированию сварных соединений.

Для выполнения виртуальных швов данным инструментарием программы достаточно активировать пункт меню fillet weld. Предоставляемые указанным сервисом возможности в плане создания

сварных соединений обеспечивают выполнение как тавровых соединений так и нахлесточных.

При исследовании в среде NX сварного узла методом конечных элементов сварной шов является самостоятельной трехмерной моделью, что обеспечивает возможность имитации дефектов сварного соединения [2].

Например, создана трехмерная модель соединения ТЗ согласно ГОСТ. Толщину соединяемых листов принимали 10 мм, размер катета шва – 10 мм. Для создания в соединении конструктивного непровара параллельно сварному шву создавали цилиндр. Данное соединение предусматривает конструктивный непровар. Для имитации непровара в корне шва создали трехмерную модель цилиндра, рисунок 28, и используя булевы операции вычли ее непосредственно из наплавленного металла, рисунок 29.

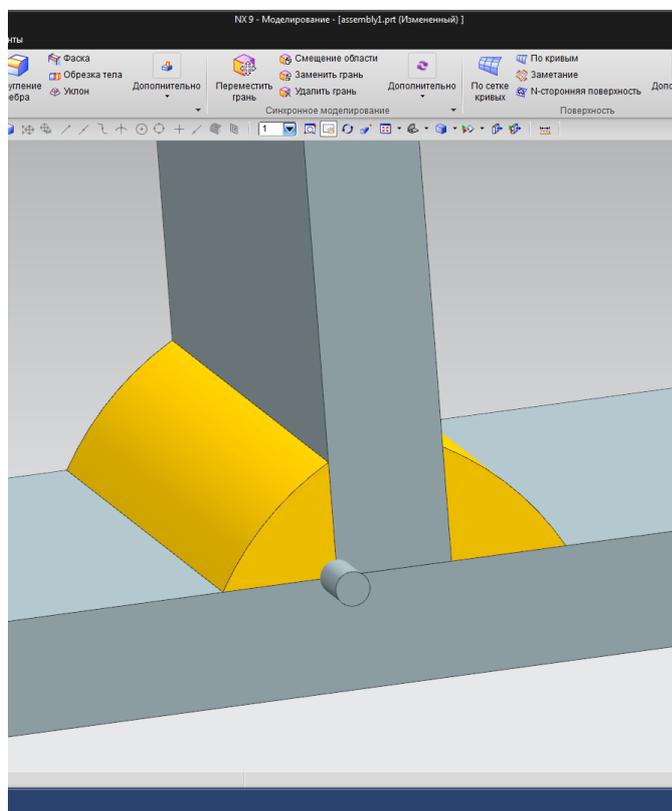


Рисунок 28 – Цилиндр в корне сварного соединения

Для имитации трещины в сварном соединении создали трехмерную модель клина, рисунок 30, и вычли ее из виртуальной модели наплавленного металла вычитали клин, рисунок 31.

Следует отметить, что непровары и трещины относят к опасным дефектам сварного соединения, существенно влияющим на их прочность.

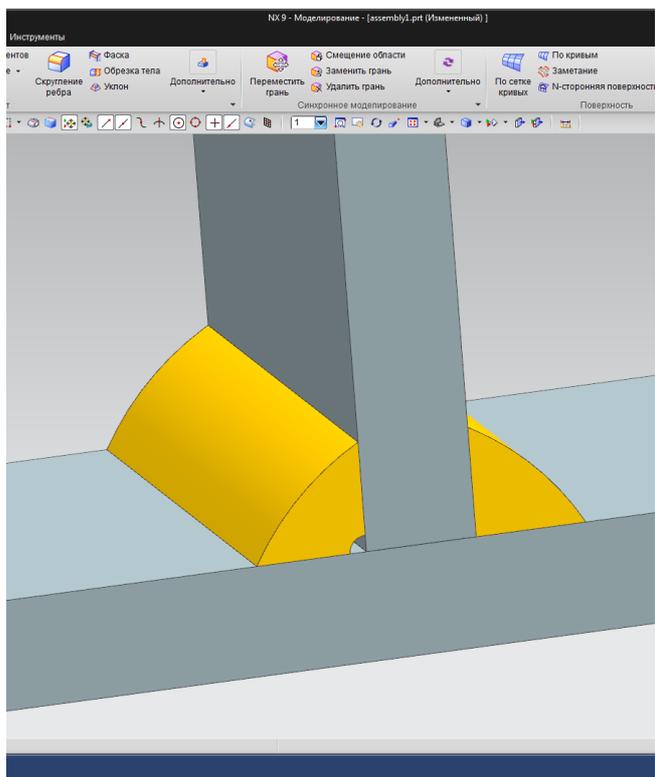


Рисунок 29 – Цилиндр вычтен – имитация непровара

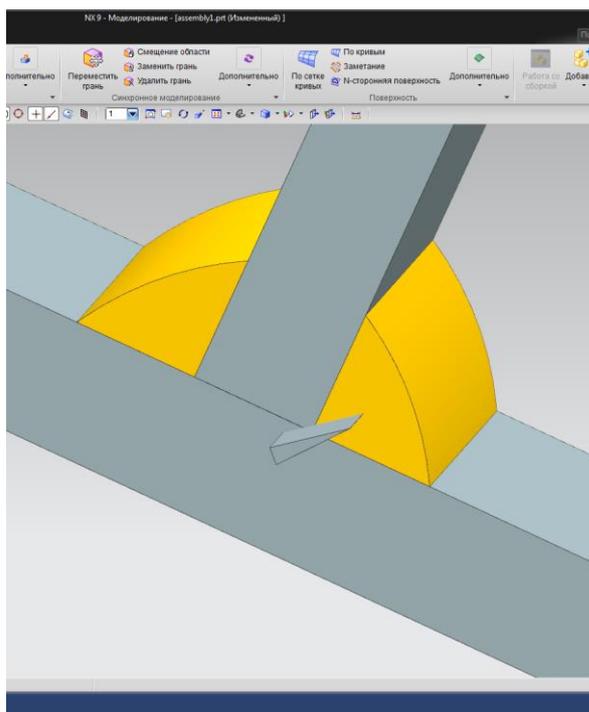


Рисунок 30 - Клин в сварном соединении

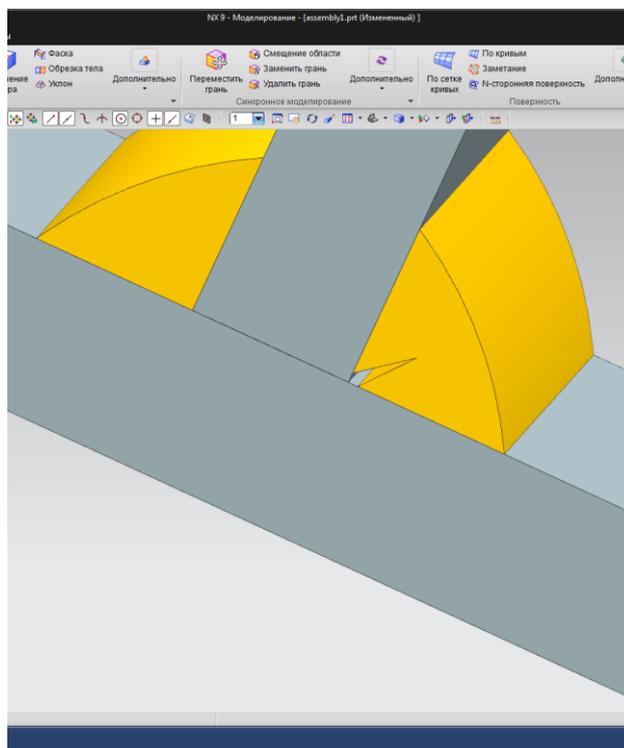


Рисунок 31 - Клинья вычтен – имитация трещины

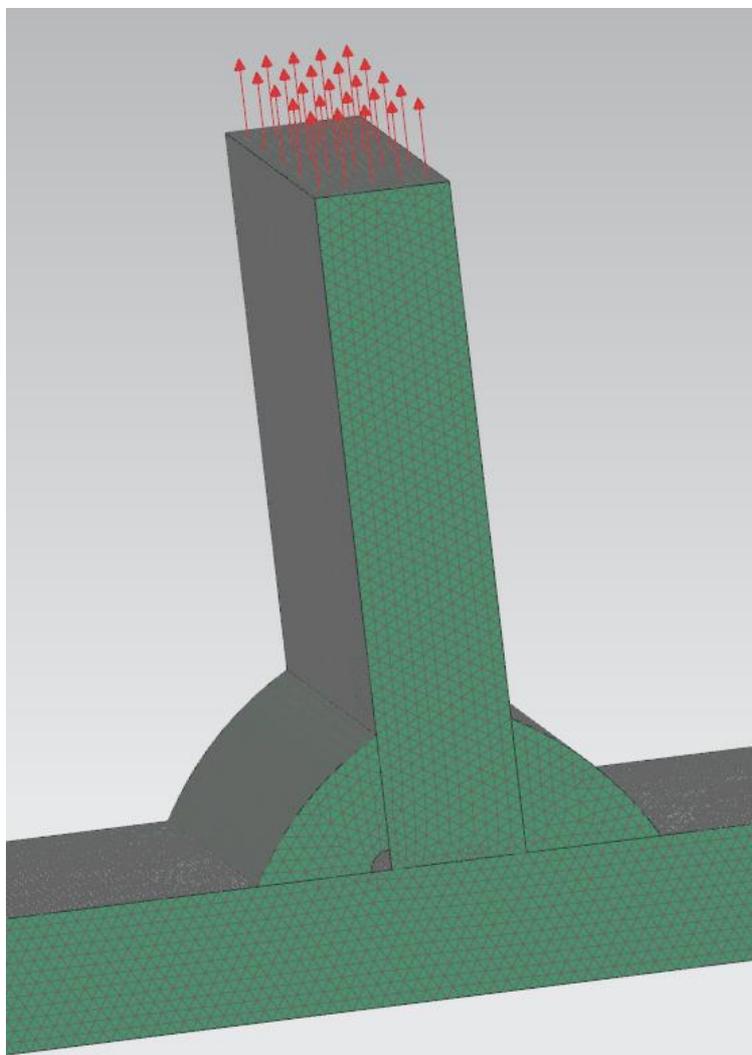
Следующий этап работы с виртуальной сварной конструкцией переход в модуль CAE. После последовательной активации File, New, переходим на вкладку Simulation, затем кликаем на верхнюю строку NX Nastran, Fem. Появляется окно New Fem и окно CAD Part с уменьшенным вариантом модели сварного соединения. В окне New Fem на выполнение активируется кнопка ОК и уменьшенная модель из окна CAD Part перемещается в рабочее пространство экрана.

Модель сварного соединения разбиваем на конечные элементы методом 3D Tetrahedral. В поле Element Size указываем размер конечного элемента 1 миллиметр и нажимаем кнопку ОК. Выполняется разбивка модели сварного соединения с дефектами на конечные элементы.

Активируя кнопку Mesh Mating дальнейшую работу ведем в окне Mesh Mating Conditions. После объединения сетки необходимо активировать кнопку Update для завершения процесса. Для модели сварного соединения

принимали одинаковый материал. Активировали кнопку More и далее Assign Materials принимали для соединения сталь 5кп.

Затем в модуле деформационно-прочностного анализа CAE исследовали распределение напряжений в дефектном сварном соединении. Переходим к следующему этапу работы. Активировали последовательно File, New, затем следующую строку NX Nastran Sim. В появившихся окнах New Simulation и Solution последовательно отвечаем ОК и балка разбитая на конечные элементы попадает в рабочее пространство программы. Нагрузку к данному сварному соединению прикладывали следующим образом, рисунок 32.



. Рисунок 32 - Приложение нагрузки к дефектному сварному соединению

2.3 Имитация прослоек в сварном соединении

Для имитации прослоек в сварном соединении применяли метод эскизирования. Свариваемые пластины получали методом создания параллелепипеда, рисунок 33.

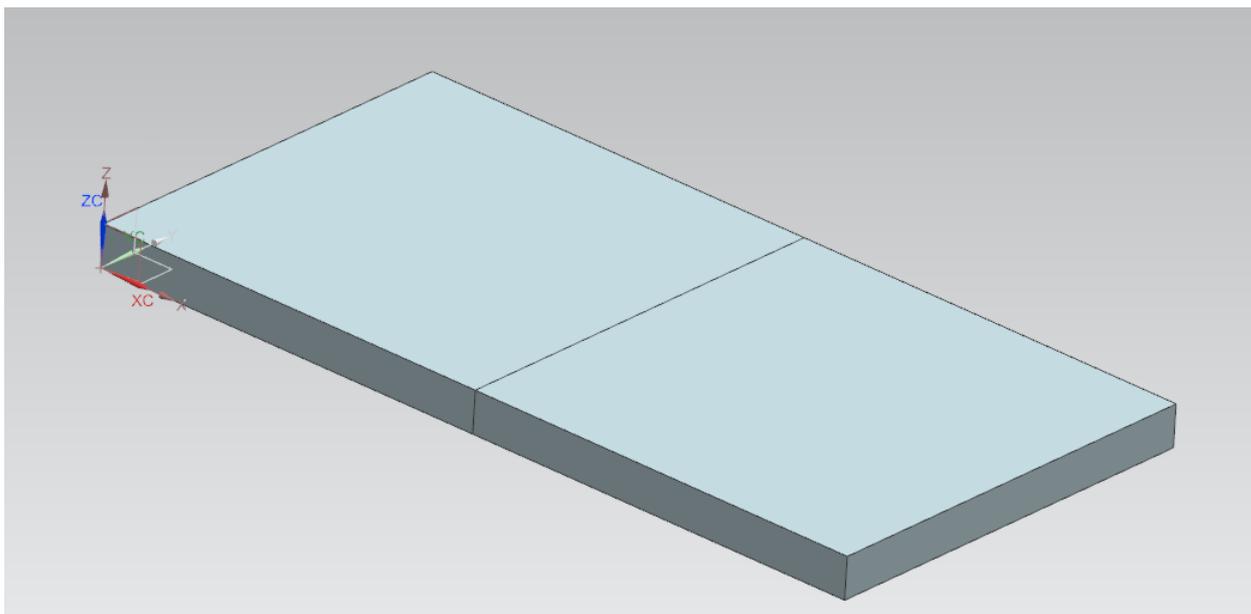


Рисунок 33 – Свариваемые пластины.

Эскиз сварного шва получали выполняя двумерный эскиз и перемещая его в пространстве на заданную протяженность. Модель сварного шва показана на рисунке 34. Трехмерная модель прослоек показана на рисунке 35.

Для получения трехмерной модели сварного шва в модуле эскизирование (sketch), выполняли эскиз по своей форме повторяющий поперечный срез сварного соединения. Затем выдавливали эскиз на требуемую величину.

Для получения трехмерной модели прослоек в модуле эскизирование (sketch), выполняли эскиз по своей форме повторяющий поперечный срез прослойки. Затем выдавливали эскиз на требуемую дистанцию.

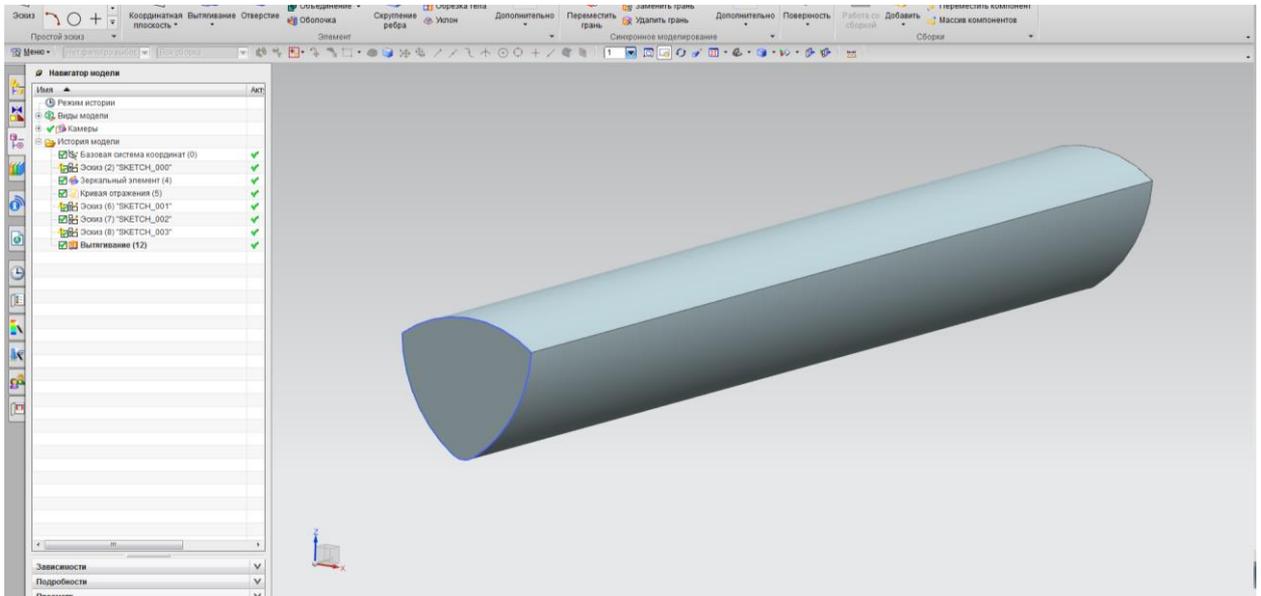


Рисунок 34 – Трехмерная модель сварного шва.

Трехмерная модель прослоек, рисунок 35.

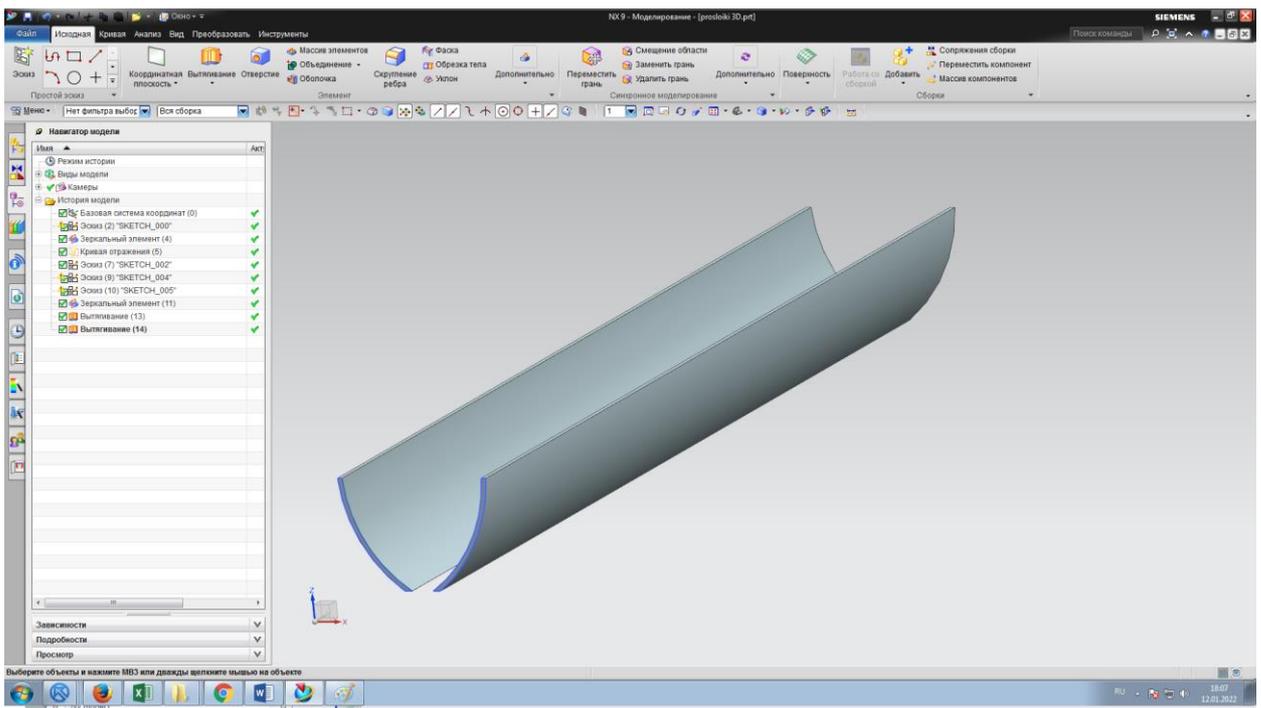


Рисунок 35 – Трехмерная модель прослоек

Сварной шов в целом показан как сборка, рисунок 36.

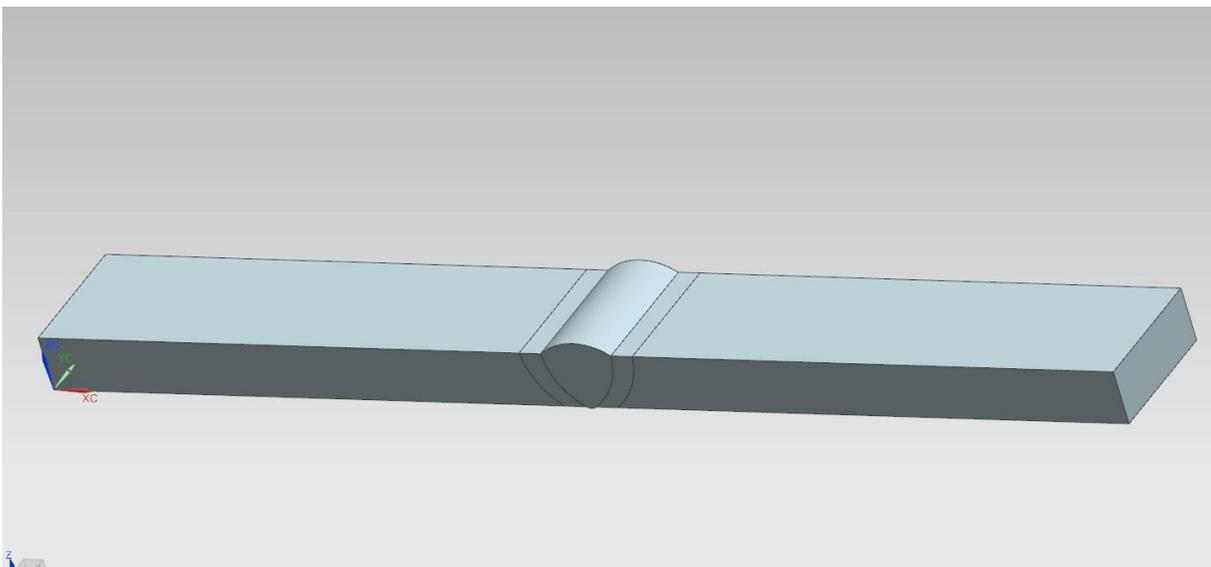


Рисунок 36 - Сварной шов

После разбиения его на конечные элементы, необходимой операцией является объединение сетки. После активации функции объединить сетку, получается следующая картина, рисунок 37.

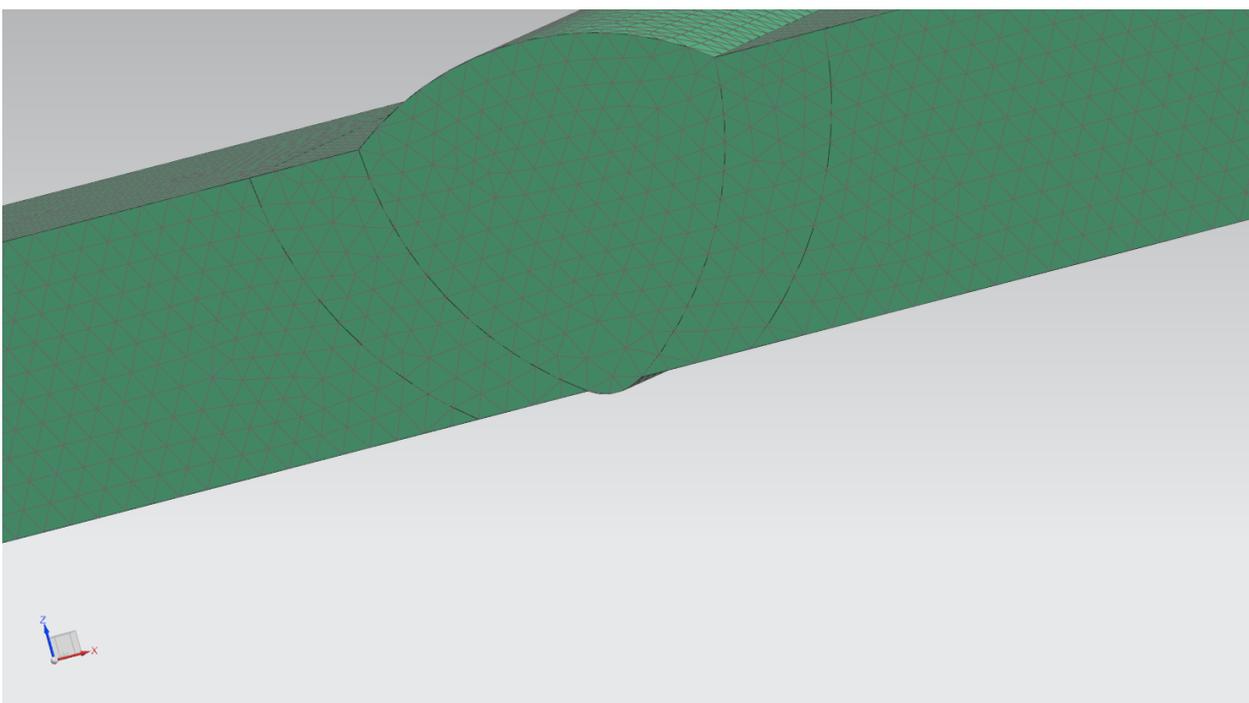


Рисунок 37 – Сетка объединена

Выводы по разделу

Делая вывод по разделу 2 можно сказать что разработанная методика может быть применена для создания трехмерных моделей сварных швов. Причем возможно применение создаваемых моделей для исследования дефектов типа непровар, трещина. Также возможно исследование слоев, появляющихся по причине термического воздействия цикла сварки. Слои возможны как прочнее и тверже чем основной металл, так и меньшей прочности но большей пластичности.

Для исследования дефектов типа непровар и трещина создавали трехмерную модель указанных дефектов и проведением булевых операций вычитали трехмерные модели указанных дефектов из тела сварного шва.

Для построения модели сварного шва и слоев применяли операции эскизирования (sketch). Трехмерную модель сварного шва получали выполняя двумерный эскиз и перемещая его в пространстве на заданную протяженность.

3 Результаты исследования по методу конечных элементов

3.1 Исследование дефектов типа трещина и непровар

Поскольку сварной узел с имитацией непровара выполнялся как сборка, При работе в модуле FEM придерживались следующей последовательности. Связывали воедино сетку различных деталей входящих в сборку. Запускали на выполнение функцию Mesh Mating, в окне Mesh Mating Conditions задавали значения объединенной сетки. Затем активировали кнопку Update. Напряжения в сварном соединении без дефектов показаны на рисунке 38.

Распределение напряжений после выполненных расчетов в сварном узле с имитацией непровара показано на рисунке 39. На рисунке показан «срез» непосредственно в районе дефекта. Достигается данный эффект активацией функции «Изменить вид постпроцессора». Устанавливается секущая плоскость и задаются ее координаты. На основании полученных данных можно сделать вывод, что концентрация напряжений непосредственно в районе дефекта достигает 2.

Напряжения в сварном узле с имитацией трещины приведены на рисунке 40. Также в данном случае концентрация напряжений достигает 3.

Учитывая, что в настоящее время некоторые приборы ультразвукового контроля сварных швов обеспечивают прорисовку сварных соединений с созданием трехмерной модели шва с учетом выявленных при контроле дефектов, становится возможным исследование прочности методом конечных элементов модели данного сварного соединения. Имитация в трехмерной модели выявленных дефектов позволит получать более точные значения эксплуатационных характеристик сварного соединения.

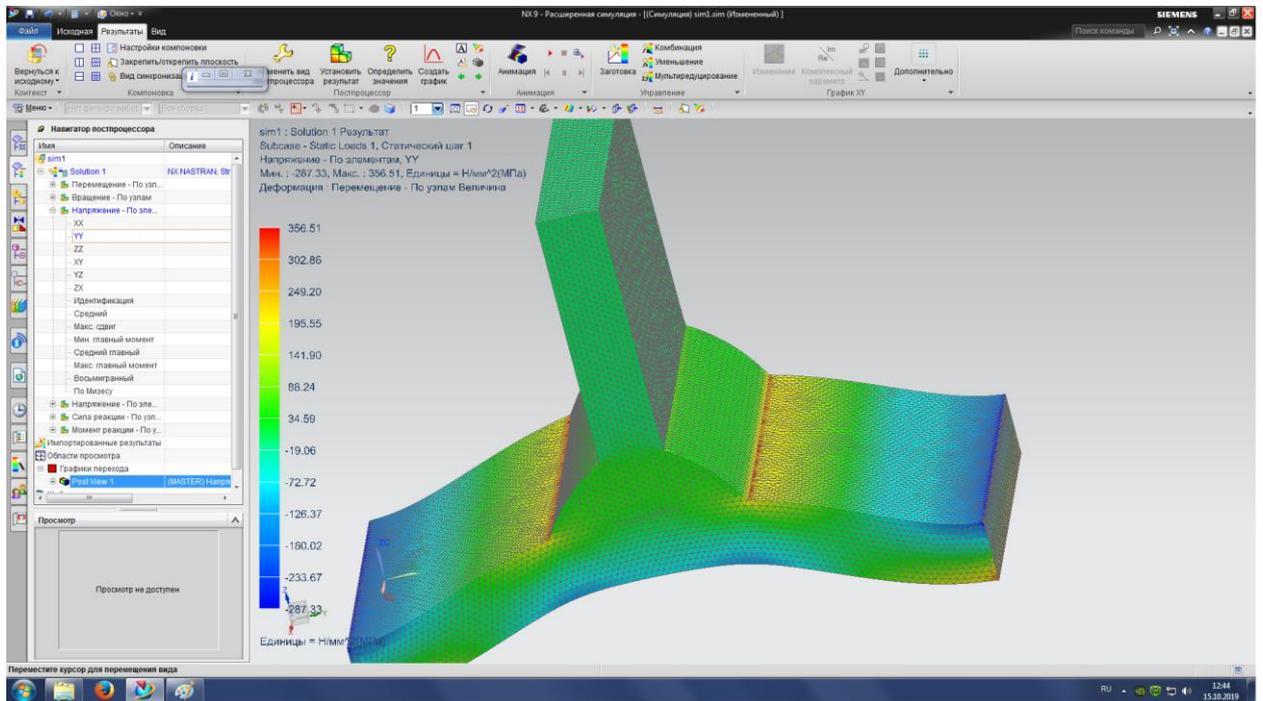


Рисунок 38 – Распределение напряжений в соединении без дефектов

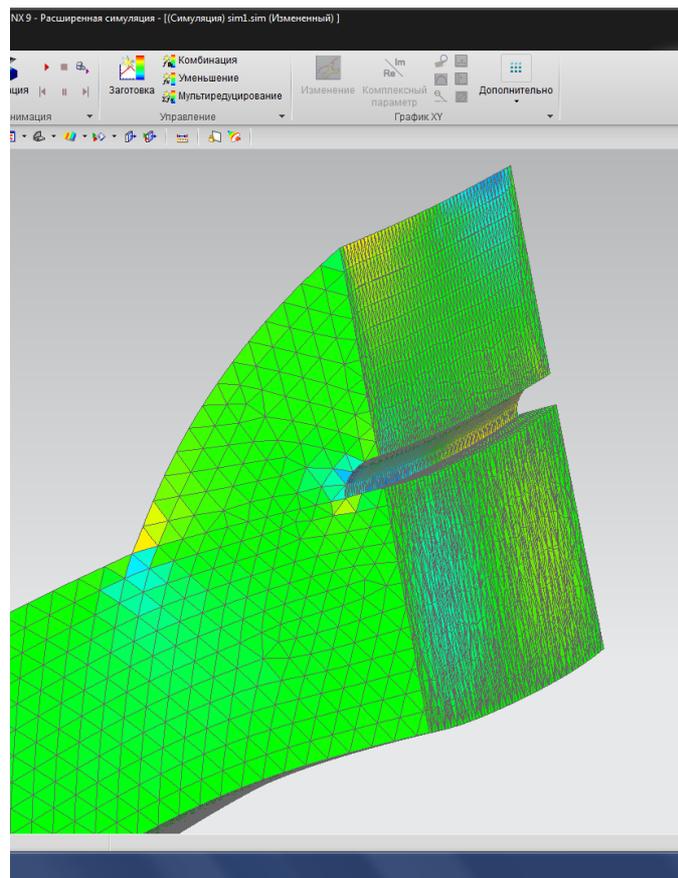


Рисунок 39 - Распределение напряжений в районе дефекта непровар

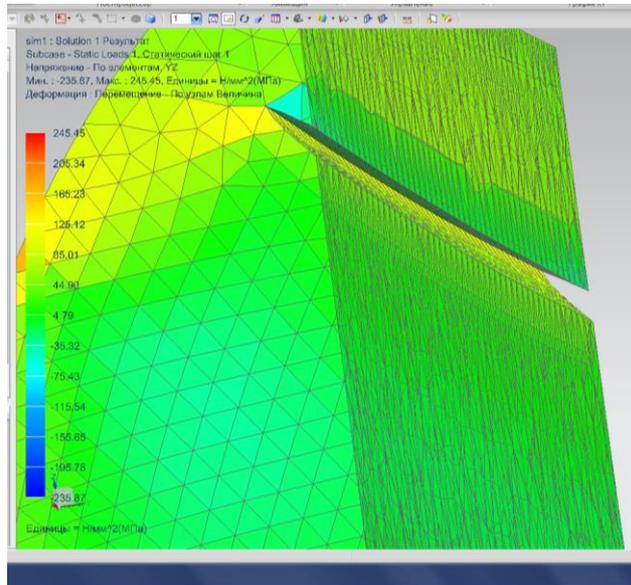


Рисунок 40 - Распределение напряжений в районе дефекта трещина

В целом исследования трехмерных моделей сварных швов показывают совпадение с теоретическими положениями.

3.2 Исследование мягких прослоек

Мягкие узкие прослойки представляют следующую картину напряженно-деформированного состояния, рисунок 41.

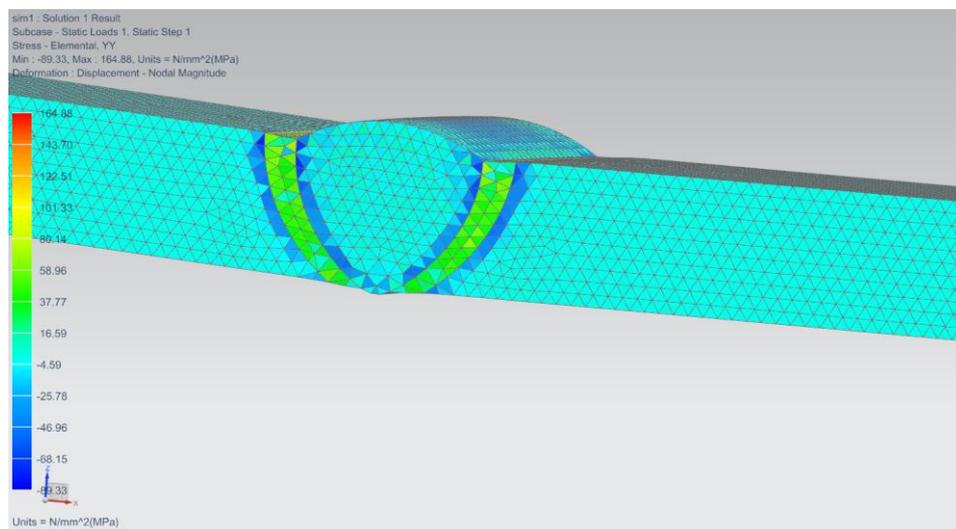


Рисунок 41 – Напряженно-деформированное состояние узкой мягкой прослойки

В ситуации с узкой прослойкой напряжения в самой прослойке больше, чем в окружающем металле и сварном шве, Область сварного шва и основного металла, прилегающая к прослойке подвержена сжатию.

Мягкие широкие прослойки обеспечивают следующую картину напряженно-деформированного состояния, рисунок 42.

Деформации пластичной широкой прослойки изображены на рисунке 43. Данный рисунок получен за счет активации функции edit postprocessor view. Далее увеличивая масштаб рисунка в плане деформаций получаем следующий вид.

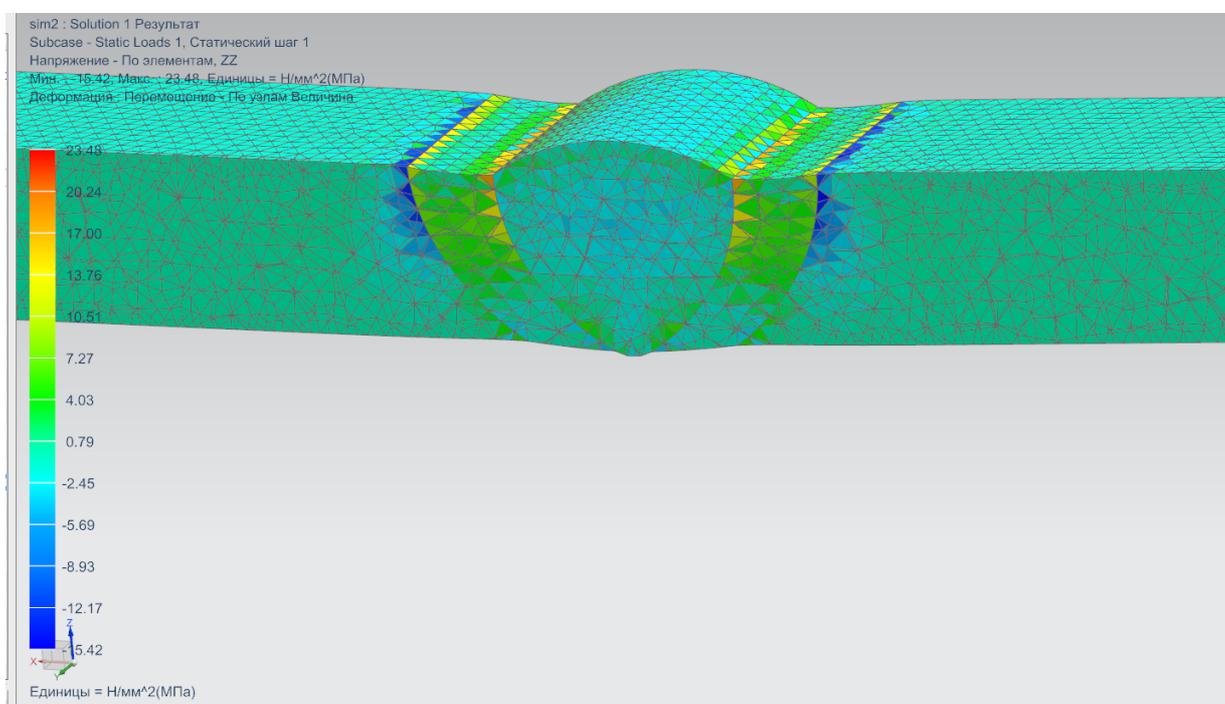


Рисунок 42 – Напряженно-деформированное состояние в соединении с широкой мягкой прослойкой.

Распределение напряжений в соединении с широкой мягкой прослойкой соответствует теоретическим положениям в верхней части сварного соединения. Теоретические положения согласно которым мягкая прослойка подвергается жесткому напряженному состоянию подтверждаются. Уровень напряжений в прослойке ориентировочно в два раза больше, чем по изделию в среднем. Максимальных значений

напряжения растяжения в мягкой прослойке достигают по границе линии сплавления в верхней части шва.

В верхней части шва применительно к основному металлу достигают и напряжения сжатия. В целом из рисунка следует, что прослойка работает в условиях объемного напряженного состояния.

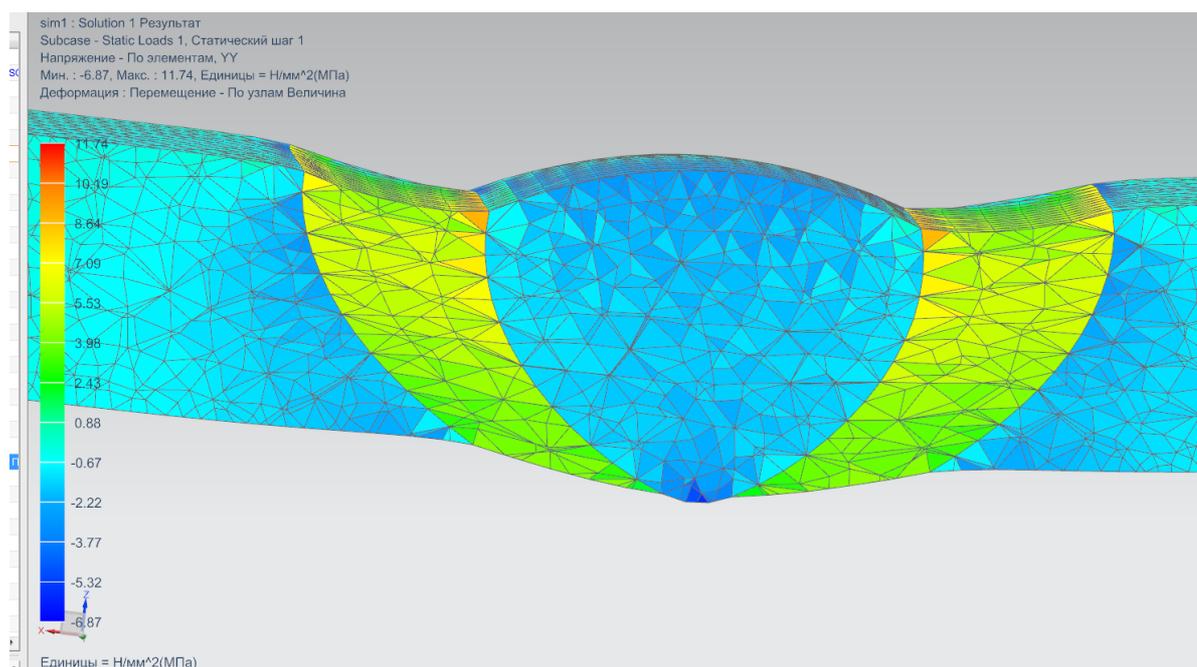


Рисунок 43 – Рисунок с увеличенным масштабом деформаций

Также применив функцию программы NX edit postprocessor view получаем «срез» сварных соединений по месту мягкой прослойки, параллельно оси шва. Для узкой прослойки картина получается следующая, рисунок 44.

Ранее отмечалось, что растяжение механически неоднородного сварного соединения создает в мягкой прослойке развивается жесткое объемное напряженное состояние трехосного растяжения. Однако в приконтактных участках твердого металла, где касательные напряжения на контактной поверхности имеют противоположное направление, в результате чего две компоненты нормальных напряжений являются сжимающими. Такое напряженное состояние является

более мягким, чем одноосное растяжение. Условие пластичности удовлетворяется при средних растягивающих напряжениях, заведомо меньших предела текучести твердого металла, т.е. последний как бы разупрочняется. Это явление О.Л. Бакши было названо эффектом смягчения твердого металла или «эффектом смягчения» [1].

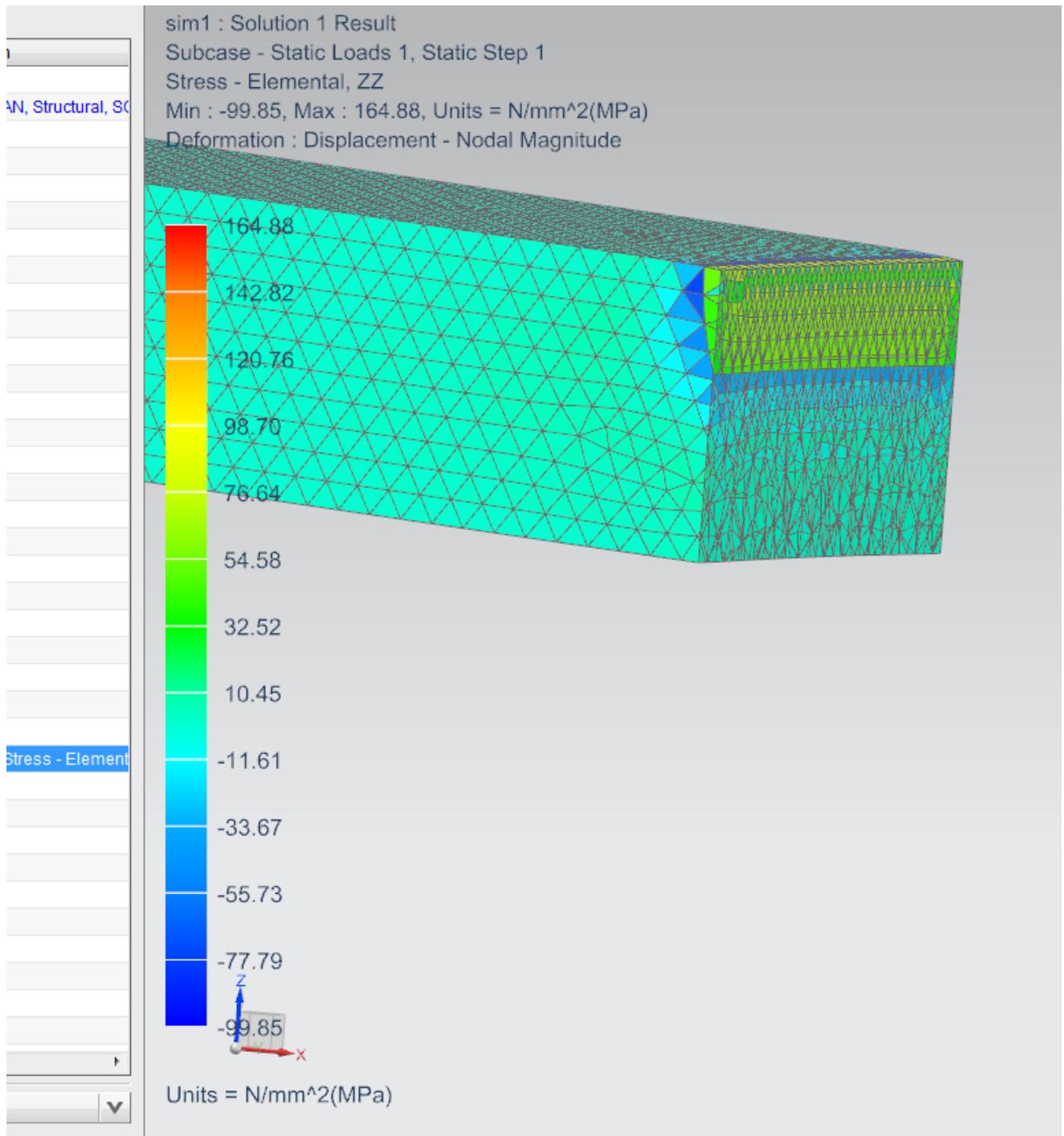


Рисунок 44 – Напряженно-деформированное состояние узкого пластичного слоя

Для широкой прослойки картина получается следующая, рисунок 45.

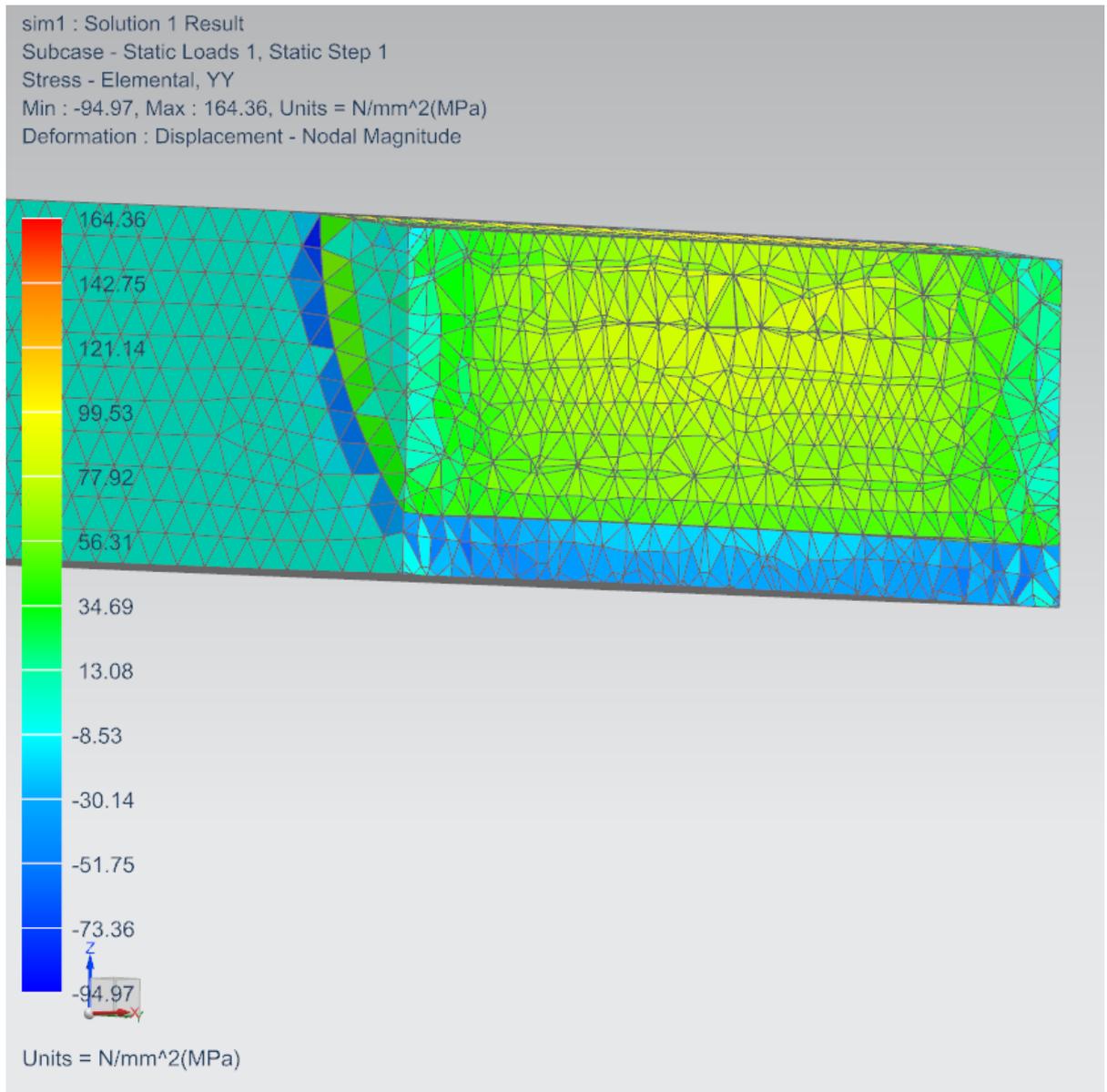


Рисунок 45 – Напряженно-деформированное состояние широкого пластичного слоя

В обоих случаях наблюдаются напряжения растяжения в самой прослойке, причем их величина значительно превышает напряжения в целом по детали и по сварному шву. Характер среза по функции edit postprocessor view не позволяет уверенно утверждать о наличии напряжений сжатия в прилегающей области

сварного шва, однако основной металл, прилегающий к области мягкого пластичного слоя сжат.

3.2 Исследование жестких прослоек

Жесткие прослойки обеспечивают следующую картину напряженно-деформированного состояния, рисунок 46. Анализ напряженно-деформированного состояния показывает, что в соединениях с жесткими прослойками максимум напряжений достигает в области перехода от основного металла к наплавленному, именно в этих местах и наблюдается зарождение и последующее развитие трещин, приводящих к разрушению сварных соединений, рисунок 47, рисунок 48.

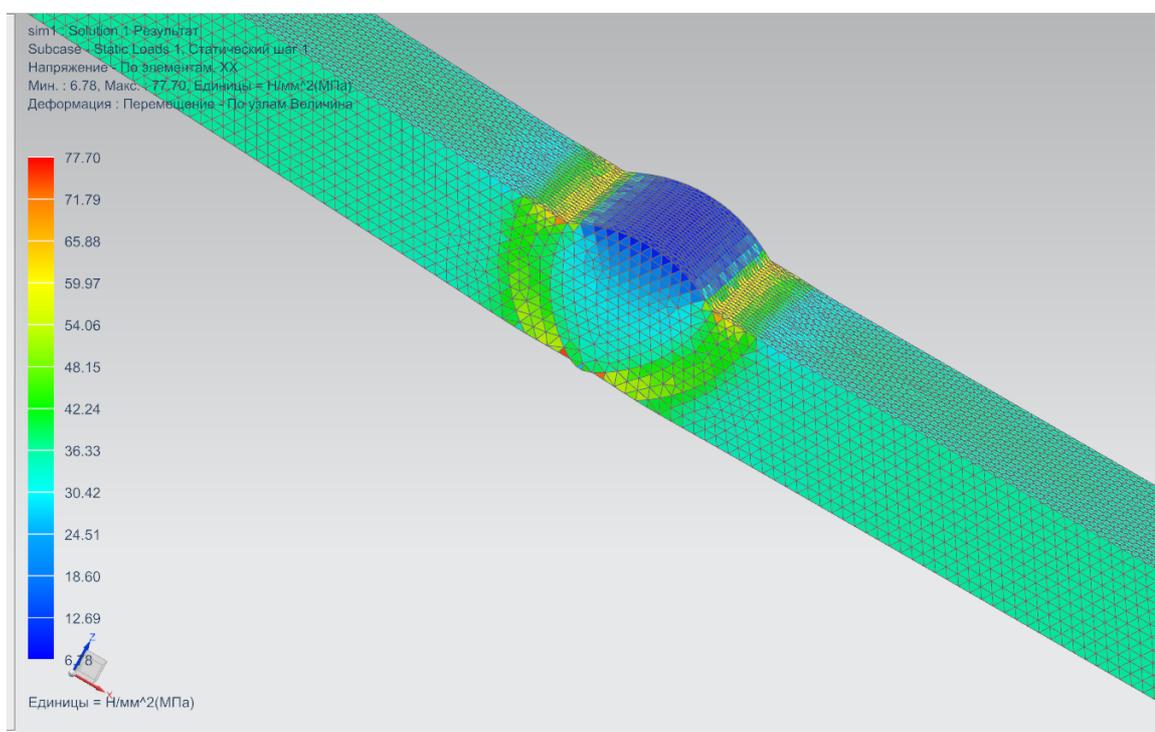


Рисунок 46 – Распределение напряжений в соединении с жесткой прослойкой

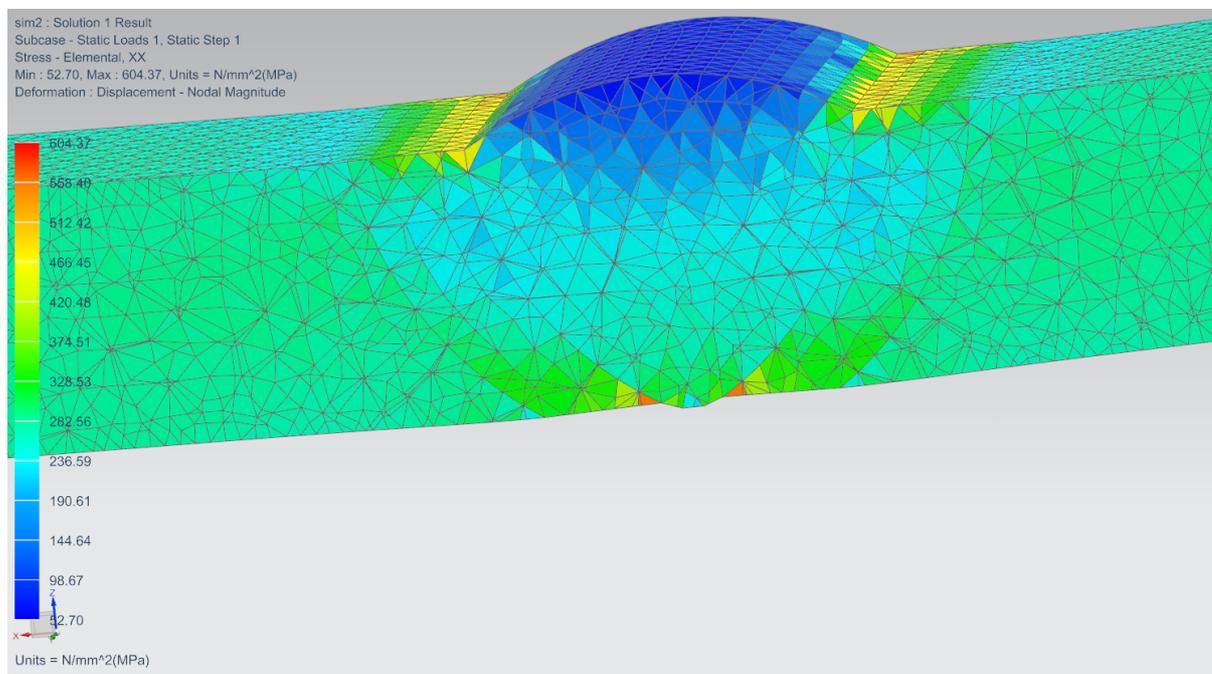


Рисунок 47 - Напряжения в соединении с широкой жесткой прослойкой

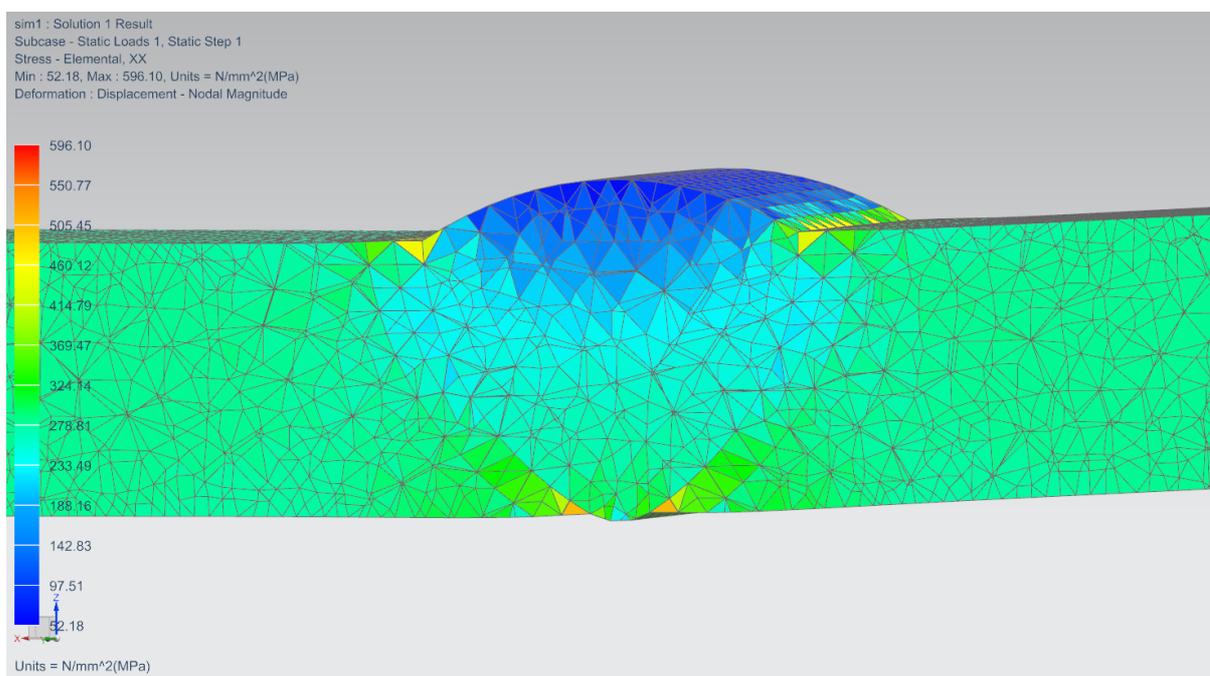


Рисунок 48 - Напряжения в соединении с узкой жесткой прослойкой.

В целом анализ напряженно-деформированного состояния сварных соединений с твердыми слоями позволяет сделать вывод, что напряжения достигают максимальных величин в области перехода от наплавленного металла к основному.

Выводы по разделу

В качестве вывода можно принять соответствие напряженно-деформированного состояния основным теоретическим положениям. Растяжение механически неоднородного сварного соединения создает в пластичной прослойке развивается объемное напряженное состояние трехосного растяжения. В приконтактных участках основного и наплавленного металла, где касательные напряжения на контактной поверхности имеют противоположное направление, в результате чего, согласно второму закону Ньютона, компоненты нормальных напряжений являются сжимающими. Такое напряженное состояние является более мягким, чем одноосное растяжение. Условие пластичности удовлетворяется при средних растягивающих напряжениях, заведомо меньших предела текучести твердого металла, т.е. последний как бы разупрочняется. Это явление О.Л. Бакши было названо эффектом смягчения твердого металла или «эффектом смягчения».

Исследования дефектов типа непровар и трещина также показали соответствие напряженно-деформированного состояния основным теоретическим положениям. Концентрация напряжений в районе указанных дефектов полностью соответствует основным теоретическим положениям.

4 Рекомендации по результатам исследований напряженно-деформированного состояния сварных соединений

4.1 Современный уровень развития технологий контроля

Совершенствование способов ультразвукового контроля сварных соединений магистральных трубопроводов идет в направлении применения многоэлементных ультразвуковых преобразователей. Данная методика ранее нашла широкое применение в медицинских исследованиях [40].

При исследовании сварных соединений с применением многоэлементных ультразвуковых преобразователей вдоль сварного соединения синхронно перемещаются два акустических блока. На рисунке 49 показан процесс контроля центральной области сварного соединения.

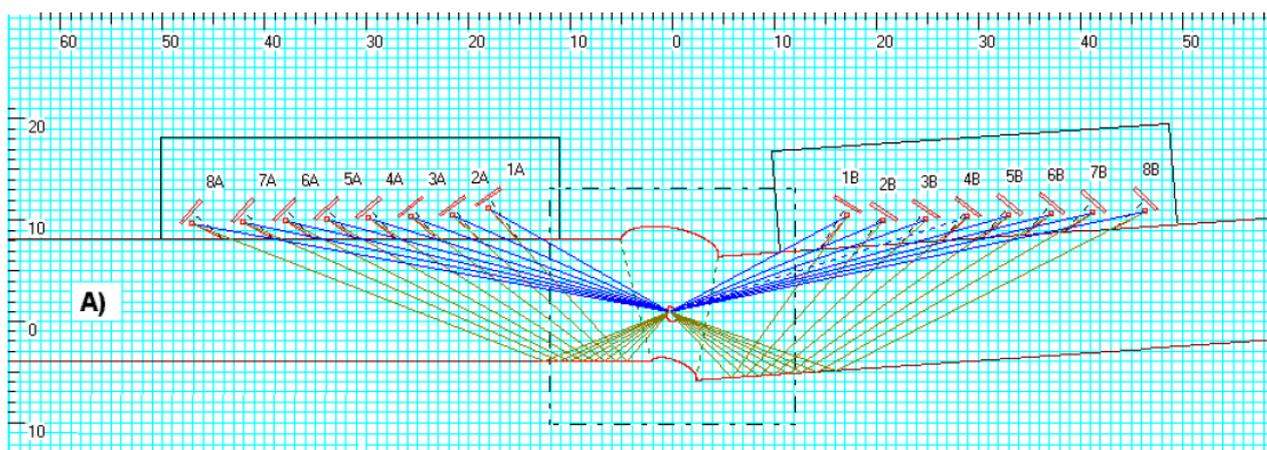


Рисунок 49 – Контроль центральной области сварного соединения

Для контроля верхней области сварного соединения ультразвуковые лучи посредством системы управления перенаправляются в верхнюю область сварного соединения. Для этих целей применяют компьютерные системы обработки информации и управления [40]. Выполняется указанный контроль отраженными от нижней границы детали лучами ультразвука, рисунок 50.

Для контроля ультразвуковыми методами нижней части сварного соединения ультразвуковой луч направляется непосредственно в нижнюю область, рисунок 51.

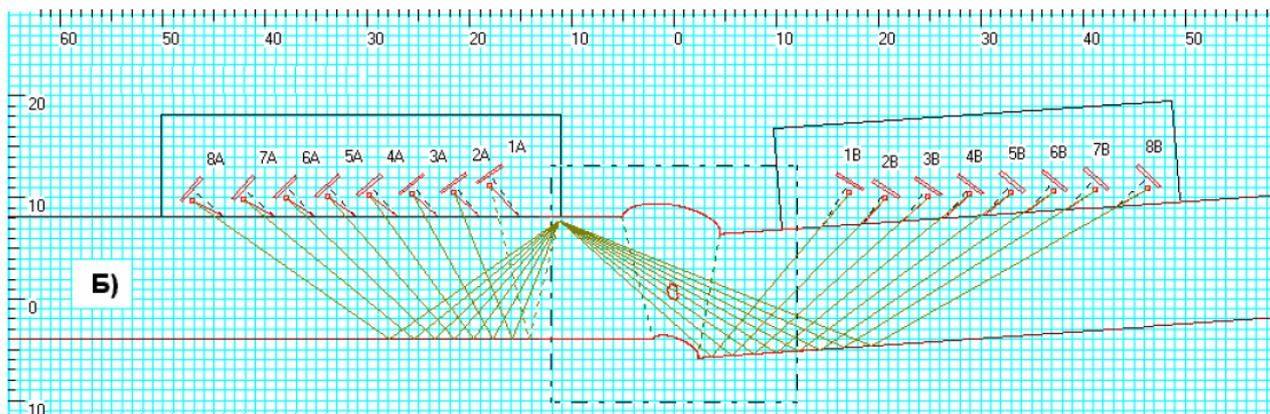


Рисунок 50 – Контроль центральной области сварного соединения

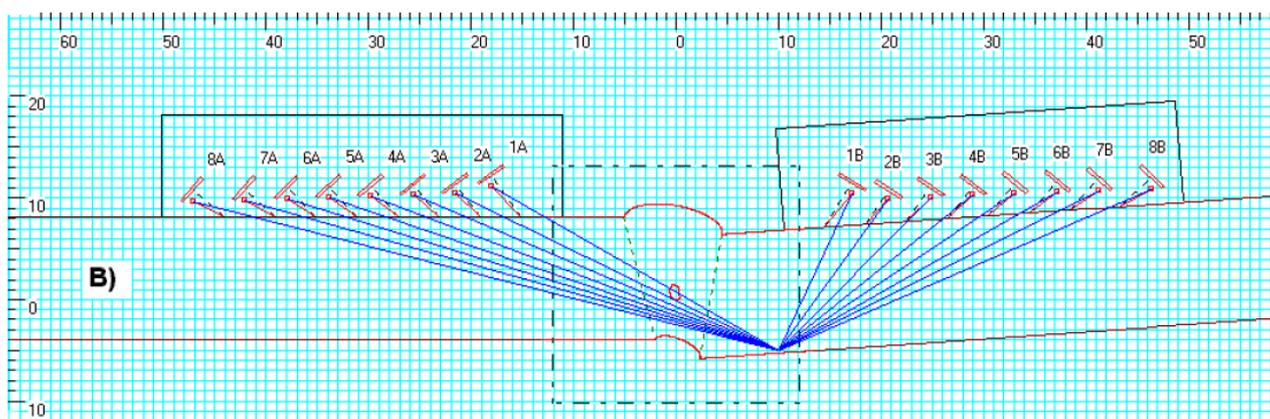


Рисунок 51 – Контроль нижней области сварного соединения

На рисунке 52 показан процесс контроля корня сварного соединения. Особенность данного процесса заключается в том, что корень сварного соединения контролируется дважды отраженными лучами.

Система управления подобного рода процессами показана на рисунке 53. Система включает в себя персональный компьютер, пьезоэлектрические преобразователи, подсоединенные к мультиплексору, информация от каждого пьезоэлектрического преобразователя передается в модуль

обработки.

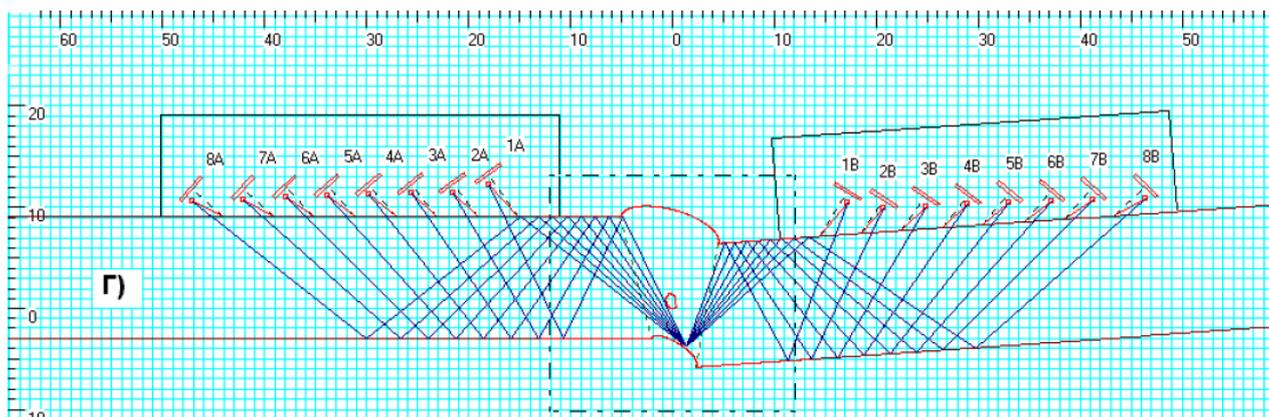


Рисунок 52 – Контроль корня сварного соединения

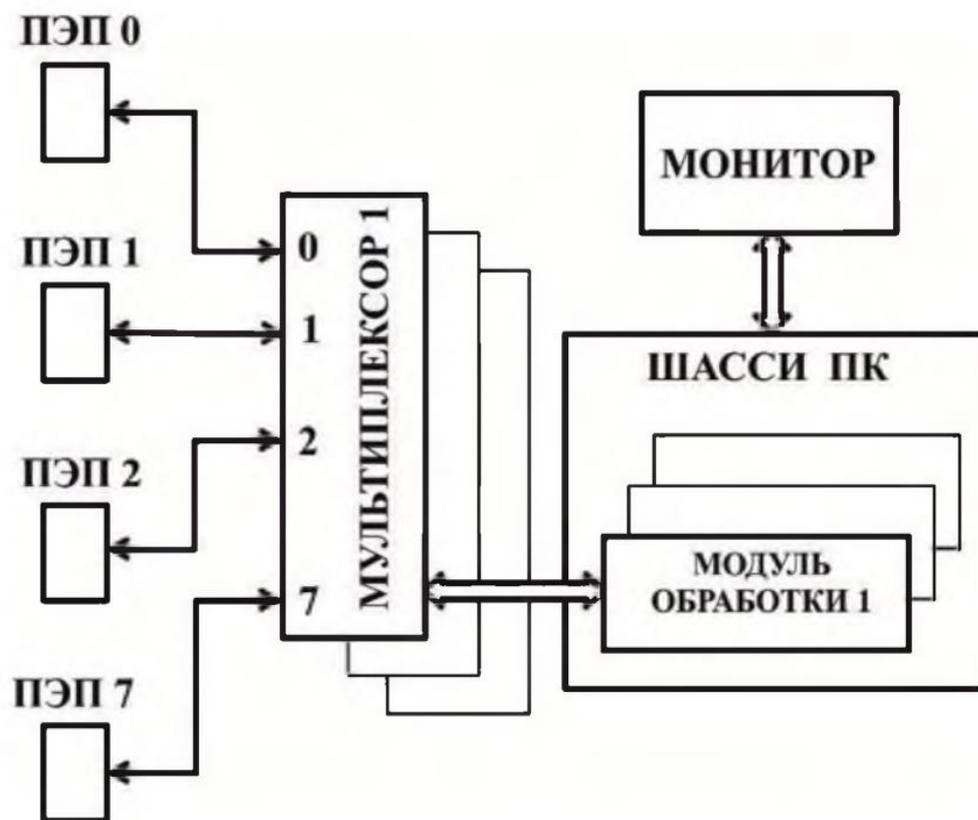


Рисунок 53 – Комплекс ультразвукового просвечивания

Для контроля сварных швов труб с помощью данного варианта комплекса необходима настройка параметров аппаратной части установки. Для выполнения настройки по эталонам обрабатываются информация о дефектах местоположение которых и размеры заданы. Для обработки информации от эталона на компьютер установлено специальное программное обеспечение. По итогам обработки сигналов от эталона они заносятся в память вычислительной машины и передаются в модульные дефектоскопические блоки компьютерного комплекса. «Принятые сигналы оцифровываются и подвергаются предварительной обработке в УВДК. Эта обработка позволяет выделить в строб-импульсе максимальный сигнал A_d , осуществить защиту от несинхронных помех и сформировать файл данных контроля» [18].

Окончательная обработка информации настройки по эталонам производится программой, предназначенной для отображения на дисплее комплекса ультразвукового просвечивания. Затем подключается программа обрабатывающая информацию по техническим условиям на дефектность сварного соединения. И наконец в дело вступает программа которая формирует протокол. Данная программа выполняет обработку информации из массива по техническим условиям на дефектность и результатом ее работы является, соответствует ли сварной шов техническим требованиям или не соответствует. При этом программа в состоянии обеспечить печать паспорта на каждое сварное соединение с указанием дефектности сварного шва. Помимо указанных функций программа обеспечивает выдачу технологических рекомендаций для исполнителей сварных соединений. Причем, соединение с инверторными источниками питания локальной сетью позволяют корректировать режимы сварки после контроля предыдущего стыка.

Соответствие результатов контроля сварного соединения истинному распределению дефектов обеспечивается стабильностью параметров в зависимости от температуры. Поэтому непосредственно компьютер следует

оберегать от резких перепадов температур. Также важную роль играет периодическая метрологическая проверка комплекса. Таковая проверка должна проводиться каждые четыре часа. При этом для выполнения проверки необходимо применение стандартных образцов предприятия. Если по результатам проведенной проверки с использованием стандартных образцов предприятия получен отрицательный результат, общее количество сварных соединений, выполненных в течение последних четырех часов контролируется повторно, на вновь настроенном приборе.

Дефектность сварных швов труб должна соответствовать требованиям соответствующих стандартов. Как Российских так и стандартов ИСО.

В настоящее время в стандарты введен такой браковочный критерий как количество малых дефектов на определенной длине сварного соединения. Ранее сварное соединение подвергали выбраковке если амплитуда сигнала, отраженного от дефекта превышала заданную величину. Следовательно, выявленный дефект представляет опасность для сварного соединения. Развитие технологий ультразвукового контроля за счет применения многоканальных устройств позволяет увеличивать вероятность выявления дефектов, в том числе и мелких. Вероятность выявления мелких дефектов возрастает за счет использования на производстве многоканальных дефектоскопических комплексов. Второй путь повышения вероятности выявления позволит проводить обработку принятых сигналов по заданным критериям, что значительно расширяет метрологические возможности установок, уменьшает перебраковку или пропуски дефектов и повышает надежность контроля сварных швов труб.

Чувствительность контроля, устанавливаемая при настройке установок, определяется действующими стандартами для труб ISO 3183, DIN EN 10246-15, DIN EN 10246-8, API 5L. Перечисленные стандарты регламентируют при производстве напорных труб большого диаметра, полученных дуговой сваркой, производить контроль сварного шва ультразвуковыми методами.

Контроль проводится для определения следующих типов дефектов: продольных, поперечных и объёмных дефектов.

Эталонные отражатели, применяемые в соответствии с API 5L: для продольных дефектов - внутренние и внешние в виде прямоугольного паза длиной 50 мм, шириной 1 мм, глубиной 5% от толщины стенки (или не менее 0,2 мм и не более 1,6 мм). Положение ПЭП: параллельно шву снаружи и изнутри на таком расстоянии между собой в продольном направлении, чтобы получить отдельные показания для внутренних и внешних дефектов;

При контроле поперечных дефектов - внутренний и внешний прямоугольный паз длиной 20 мм, шириной 1 мм, глубиной 5% от толщины стенки, но не менее 0,2 мм и не более 1,6 мм. Паз, выполненный поперек шва изнутри и снаружи на таком расстоянии, чтобы получить отдельные показания для внутренних и наружных дефектов. Альтернативно, чувствительность можно устанавливать, используя сквозные радиальные отверстия, диаметром 1,6 мм;

При контроле расслоений на концевых участках труб, используется плоскодонные сверления диаметром 3, 5, 8 мм (в зависимости от толщины стенки), засверленные с внутренней стороны стенки трубы на 25%, 50% и 75% толщины стенки в середине линии сканирования краевой полосы концевого участка трубы р/с пьезоэлектрического преобразователя, настроенного на контроль расслоений.

Выводы по разделу

Проникновение компьютерных технологий на сварочные участки позволяет выполнить построение трехмерных твердотельных моделей дефектов и расчетом по методу конечных элементов определить работоспособность сварных швов магистральных трубопроводов.

Заключение

В соответствии с проведенными компьютерными исследованиями можно сделать вывод, что выполняя регулирование размеров механических неоднородностей можно оценивать соответственно реальным условиям эксплуатации сварные соединения компьютерными методами. В настоящее время расчет сварного соединения выполняется исходя из условия, если выполнен контроль физическими методами, и соединение выполнено с применением автоматических методов сварки, то обеспечивается равнопрочность наплавленного металла и основного. Однако используя технологические приемы можно создать пластичные прослойки которые будут повышать работоспособность сварного соединения путем создания в них сложного напряженного состояния. При этом происходит перераспределение напряженного состояния сварного соединения.

В общем случае под оптимизацией понимается комплекс мероприятий, направленных на достижение экстремального уровня некоторого обобщенного показателя качества [40]. Под мероприятиями при этом понимаются математические приемы поиска экстремальных значений. Что касается обобщенных показателей то из технических показателей такими являются характеристики надежности, а из нетехнических - экономическая эффективность, непосредственно связанная со стоимостью материала и технологическими затратами.

Регулируя геометрические параметры сварного стыкового соединения трубопровода и степень механической неоднородности данного соединения, можно выполнить сварное соединение, в котором шов будет являться мягкой прослойкой» наличие которой не только не снизит прочность самого соединения» но, как показывают экспериментальные исследования, повысит его несущую способность за счет образования пластических деформаций и перераспределения поля напряжений.

Анализ сварных соединений выполненных с наличием дефектов показывает, что напряжения для дефектов типа непровар или трещина возрастают в 2-3 раза. Что является доказательством того, что коэффициент концентрации в дефектах достигает 2-3.

Анализ сварных соединений с мягкой прослойкой показывает, что прилегающая область основного металла работает в условиях сжатия.

Вместе с тем зона сплавления характеризуется высоким уровнем напряжений.

Таки образом выполненные результаты компьютерного моделирования подтвердили теорию расчета сварных соединений и их можно применять на практике.

Для применения на практике следует усовершенствованные методы контроля сварных соединений посредством ультразвуковых методик подключить к блоку трехмерного моделирования, на основе получаемых трехмерных моделей дефектов сварного соединения выполнять проверку качества шва методом FEM.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Абдуллин, И. Г. Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем: диагностика и прогнозирование долговечности / И.Г. Абдуллин, А. Г. Гареев, А. В. Мостовой. – Уфа : «Гилем», 1997. – 177 с.
2. Алешин, Н.П., Лысак В.И., Лукьянов В.Ф. Современные способы сварки: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. 59 с.
3. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. М.: Машиностроение. 2006. 368 с.
4. Аюшеев Т.В. Метод построения модели сплошного тела с применением обобщенной линейной интерполяции // Автоматизация и современные технологии. 2005. № 6. С. 35-40.
5. Васильев В.И., Ильященко Д.П. Разработка этапов технологии при дуговой сварке плавлением: учебное пособие. Томск: Издательство ТПУ, 2008. 96 с.
6. Виноградов В.С. Технологическая подготовка производства сварных конструкций в машиностроении. М.: Машиностроение. 1981. 224с.
7. Гончаров, П.С. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П.С. Гончаров, И.А. Артамонов, Т.Ф. Халитов, С.В. Денисихин, Д.Е. Сотник. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.
8. Гончаров, П.С. NX Advanced Simulation. Практическое пособие / П.С. Гончаров, И.А. Артамонов, Т.Ф. Халитов, С.В. Денисихин, Д.Е. Сотник. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 112 с.
9. Гончаров, П.С. NX для конструктора-машиностроителя / П.С. Гончаров, М.Ю. Ельцов, С.Б. Коршиков, И.В. Лаптев, В.А. Осюк. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 504 с.
10. Гридякина Д.В. Анализ дефектов сварных соединений и методы их устранения // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. С. 936-939.

11. Давыдов А.Н. Автоматизация машиностроительного предприятия на основе технологий компьютерной поддержки жизненного цикла изделий. Дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 – МГТУ «СТАНКИН», Москва, 2001. - 156 с.
12. Данилов, Ю.В. Практическое использование NX / Ю.В. Данилов, И.А. Артамонов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 332 с.
13. Ельцов, М.Ю. Основы расчета изделия на прочность в приложении NX Расширенная симуляция / М.Ю. Ельцов, П.А. Хахалев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. – 207 с.
14. Емельянова М.Г., Бакланова О.Е. Исследование методов бинаризации для решения задачи автоматического обнаружения дефектов сварных соединений // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2020. № 3. С. 90-94.
15. Ермолов И.Н., Рахимов В.Ф. К оценке эквивалентных размеров дефектов наклонными преобразователями // Дефектоскопия. 1989. № 11. С. 44 - 51.
16. Ефименко Л. А., Прыгаев А.К., Определение фактических механических свойств металла трубопроводов на основе измерения твердости: Учебное пособие - М : РГУ нефти и газа, 2007 – 18 с.
17. Карабчиев К. К вопросу о выборе геометрического моделировщика // САПР и Графика. 2002. - №4. - с. 108-110.
18. Климов А.С. Выпускная квалификационная работа бакалавра: Учебно-метод. пособие по выполнению выпускной квалификационной работы бакалавра по направлению подготовки 150 700.62 «Машиностроение». Тольятти: ТГУ, 2014. 52с.
19. Козулин, М.Г. Технология изготовления сварных конструкций. Учеб-метод. пособие к курсовому проектированию. - Тольятти: ТГУ 2008. 77 с.
20. Колганов, Л. А. Сварочное производство. Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. 512 с.

21. Коряченко В.Д., Фак И.И., Ткаченко А.А. Повышение достоверности результатов автоматического УЗ контроля сварных швов труб большого диаметра // Материалы IX Всесоюзной научно-технической конференции "Неразрушающие физические методы и средства контроля". - Минск, 1981- с. 115-117

22. Кусков К.В., Хучахмедов Р.А. Влияние допустимых дефектов сварного соединения на ресурс трубной стали 9Г2С при переменных нагрузках // В сборнике: НЕФТЬ И ГАЗ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Тюменского индустриального института. ответственный редактор: О.А. Новоселов. 2013. С. 102-104.

23. Мазур, И.И. Безопасность трубопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов. – М.: ИЦ «Елима». – 2004. – 110 с.

24. Мураховский В.И. Компьютерная графика. Популярная энциклопедия. М.: АСТ-Пресс, 2002. - 341 с.

25. Мухамадеев И.М., Низамов Р.А. Влияние дефектов на результаты параметризации микроструктур сварных соединений // В сборнике: Международная молодежная научная конференция "XXII ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ (школа молодых ученых)". Материалы конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации Российский фонд фундаментальных исследований Казанский национальный исследовательский технический университет им. АН. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). 2015. С. 269-271.

26. Негода, Е.Н. Оценка выносливости сварных конструкций при многоцикловом нагружении / Е. Н. Негода, А. А. Дзюба // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2013. – №2. – С. 18–31.

27. Потемкин А. Трехмерное твердотельное моделирование. — М.: Компьютер-пресс, 2000. 296 с

28. Рыбаков В.М. Дуговая и газовая сварка: Учеб. для сред. ПТУ. - 2-е изд. перераб. М.: Высш. школа, 1986. 208 с.

29. Сварка и резка в промышленном строительстве. Под ред. Малышева Б.Д. - М.: Стройиздат. 1977. 780с.

30. Сидоров В.Н., Ахметов В.К. Математическое моделирование в строительстве. – М.: Издательство АСВ, 2007. – 336 с.

31. Слепцов, О.И. Механические свойства сварных соединений стыков труб газопровода, изготовленного из стали 13Г1С-У / О.И. Слепцов, Н.И. Голиков, Н.М. Литвинцев и др. // Сварка и безопасность: материалы Всероссийской конференции: в 2 т. Т. 1. – Якутск : Офсет, 2012. – С. 242-245.

32. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М. Н.Степнов. М. : Машиностроение, 1985.- 231 с.

33. СТО Газпром 2-2.4-083-2006 Инструкция по неразрушающим методам контроля качества сварных соединений при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов: Утв. ОАО «Газпром» 30.10.06., Москва, 2007. – С. 108.

34. Тихонов, А. Н. Статистическая обработка результатов экспериментов / А. Н. Тихонов, М. В. Уфимцев. М. : Изд-во МГУ, 1988. - 174 с.

35. Терентьев Д.В., Цайтлер Е.А., Гаврилов И.Ю. Разработка метода определения дефектов в сварных соединениях с помощью дефектоскопа TUD 310 R56 // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2011. Т. 2. № 69. С. 168-170.

36. Уткин И.Ю. Роль микролегирующих элементов в формировании механических свойств околошовной зоны при сварке прямошовных труб большого диаметра групп прочности Х70–Х80: диссертация ... кандидата Технические науки: 05.16.01 / Уткин Иван Юрьевич; [Место защиты: Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П.Бардина].- Москва, 2016. 148с.

37. Федоров А.Л. Компьютерные технологии исследования свойств сложных сварных соединений, и имеющих технологические дефекты / А.Л.

Федоров, О.В. Шашкин // Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Тольятти, 2006. С. 135-138.

38. Федоров А.Л., Сафонов М.В. Исследование прочности сварных соединений с учетом дефектов в модулях САЕ // Фундаментальные основы механики. 2019. № 4. С. 194-197.

39. Чабуркин В.Ф., Канайкин В.А. Оценка опасности дефектов сварных соединений при диагностике газонефтепроводов.- Сварочное производство. 2000. №9. С. 41-44.

40. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. -М.: Тиссо, 2003. - 313 с.

41. Bemus P., Nemes L. Modelling and Methodologies for Enterprise Integration. London: Chapman and Hall, 1996. – 454 с.

42. Cayo, E.H., Absi Alfaro, S.C. Welding quality measurement based on acoustic sensing // Symposium Series in Mechatronics Universidade de Brasilia. 2008. Vol.3. Pp. 571-579.

43. Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design, Gerald Farin, Computer Science and Scientific Computing, ACADEMIC PRESS, INC., 1988;

44. Grosky W., Tamburino L. A., "A unified approach to the linear camera calibration problem", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. 12, no. 7, pp. 663-671, July, 1990.

45. Parrinello F., Borino G. Lagrangian finite element modelling of dam – fluid interaction: Accurate absorbing boundary conditions. // Computers and Structures, 85, 2007, pp. 932-943.

46. Ponce J., Healey G. Using generic geometric and physical models for representing solids // Image Understanding Workshop: Proc. of a Workshop Held at Cambridge (Massachusetts, April 88). Massachusetts, 1988. - Vol. 1. - 488 p.

47. Pratt M. J. Interactive geometric modeling for integrated CAD/CAM // Advances in Computer Graphics / Ed. by G. Enderle, M. Grave, F. Lillehagen. - Berlin: Springer-Verlag, 1986.-P. 363-380.

48. Yoshihiko N., Michihiro S., Hiroshi N., Atsushi I. Simple Calibration Algorithm for Nigh-Distortion-Lens Camera.IEEE Trans, on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol.14, No. 11, pp. 1095-1099, 1992.

49. Wang X., Bathe K. J. Displacement/pressure based mixed finite element formu-lations for acoustic fluid-structure interaction problems. // International Journal for Numerical Methods in Engineering., 1997, vol. 40, pp. 2001-2017.

50. White M.D. Russian PC Market Surges // World Trade. 1998. № 8. Aug. 11. p.

51. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. Volume 2. Butterworth-Heinemann, Sixth Edition, 2005, 736 pages.