

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

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ
Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении

(профиль)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Разработка и анализ сварной конструкции в NX Weld Assistant

Студент(ка)

Конденков А.В.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

Скрипачев А.В.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

Шенбергер П.Н.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы канд. техн. наук., доцент Е.Н. Почекуев

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

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д-р. техн. наук., профессор В.В. Ельцов

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

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2018

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Обзор существующих программ для 3D-моделирования и анализа сварных конструкций.	9
1.1 Основные задачи развития сварных конструкций	9
1.2 Понятие о CAD/CAM/CAE программах и их роли в производстве... ..	10
1.3 Возможности CAD/CAM/CAE программ в области сварки.....	13
1.4 Обзор программного обеспечения для проектирования и анализа сварных конструкций.....	17
1.5 Выводы по первой главе.....	25
Глава 2. Общие сведения о видах сварных конструкций и методах их проектирования и анализа.....	26
2.1 Общие сведения о видах сварных конструкций.....	26
2.2 Определение качества сварных конструкций, его обеспечение.....	27
2.3 Основы проектирования сварных конструкций.....	28
2.3.1 Выбор материалов для сварных конструкций.....	30
2.3.2 Виды соединений в сварных конструкциях.....	32
2.4 Виды сварки, оборудование.....	34
2.5 Возникновение деформаций и напряжений в процессе сварки, методы их устранения.....	42
2.6 Выводы по второй главе.....	47
Глава 3. Разработка 3D-модели сварной конструкции в NX Weld Assistant.....	48
3.1 Последовательность проведения построения сварной конструкции в NX Weld Assistant, создание деталей.....	48
3.2 Объединение созданных деталей в сборку.....	61
3.3 Работа со сборкой в приложении NX Weld Assistant.....	80
3.4 Выводы по третьей главе.....	101

Глава 4. Инженерный анализ 3D-модели сварной конструкции методом конечных элементов.....	103
4.1 Алгоритм работы в NX Advanced Simulation.....	103
4.2 Выводы по четвертой главе.....	120
Заключение.....	121
Список используемых источников.....	122

Введение

Актуальность темы исследования. Современное положение дел в области машиностроения подтверждает лидирующую позицию сварки металлов среди методов соединения металла в конструкции, так как сварка является важным технологическим процессом в большинстве сфер машиностроения.

Актуально направление развития новых методов проектирования сварных конструкций с помощью передовых лидирующих САПР, с целью повышения качества конструкции, снижения количества затрат сварочных материалов, избавления от испытаний в металле и т.д. Комплексный подход к проектированию в САПР, позволяет накапливать базы данных, увеличивая точность описания процессов и свойств, иметь большой выбор технологий, высокую точность при проектировании конструкции, и проводя компьютерный анализ модели повышать в итоге качество, которое крайне важно для обеспечения безопасности при использовании изготовленных конструкций на протяжении всего срока эксплуатации.

Примерно 2/3 всех соединений в промышленности образуются при помощи сварки и родственных процессов. Наиболее часто сварка – доступный, эффективный, в ряде случаев не имеющий аналогов способ создания неразъемных соединений, позволяет снижать расход ресурсов по сравнению с другими, дает возможность ускорить процесс сбора сложных и крупных конструкций по геометрии и форме, соответствующим предъявляемым требованиям.

Итоговая цель сварочного производства — выпустить качественную сварную конструкцию, соответствующую спроектированным геометрическим формам, механическим и физическим свойствам, а также своему назначению, которая являлась бы экономически выгодной.

Сварка представляет собой сложный физико-химический и металлургический процесс, во время протекания которого изменяются

характеристики свариваемых металлов, и образования различных напряжений, из-за претерпеваемых в околошовной зоне металла шва изменений перехода фаз, влекущих к изменению структуры.

На свойства и характеристики сварного соединения влияет большое количество разнообразных факторов, а также процессов, возникающих при сварке, такие как коробление, остаточные напряжения и т.д. Для того чтобы провести сварные работы, с получением качественного соединения, требуется выбрать оптимальную технологию, которая позволит обеспечить качество и эксплуатационные свойства сварной конструкции. Выбор оптимальной технологии — это ёмкая и трудная задача, и её решение методом проб и ошибок, не лучший вариант из-за времени и затрат ресурсов, когда цена ошибки непозволительна.

Если обратиться к САПР, то можно получить выход, заключенный в технологиях виртуального моделирования. Стремительное развитие вычислительной техники, образует быстро развивающийся рынок наукоемких компьютерных приложений, для разных областей знаний. Все это позволяет получать новые подходы к проектированию изделий и описанию технологий из различных сфер. Компьютерное моделирование выводит на новый уровень современного исследования, позволяет значительно сокращать количество проводимых физических экспериментов, заменяя их быстрым, эффективным и высокоточным компьютерным моделированием. Проектирование модели позволяет впоследствии использовать её для присвоения ей различных механических, физических и химических свойств и проведения над ней всевозможных расчетов и экспериментов. Это в высокой степени относится и к технологии сварочных процессов.

Сварные соединения представлены практически в любой индустрии. В некоторых её отраслях, встречается мало, в других – она является основным средством сборки изделия, но в любом случае, процесс получения сварного соединения является неотъемлемой частью производственного процесса. Моделирование сварки в электронном макете изделия, помимо дополнительной

внесенной информации, позволяет решить несколько утилитарных задач, а именно:

- Провести анализ сварного соединения с помощью средств инженерного расчета.
- Заложить параметры производственного процесса сварки (при наличии соответствующего оборудования).
- Автоматизировать получение сварочных аннотаций на чертежах.
- Организовать планирование процессов производства и расчет норм расхода материалов.
- Осуществлять визуализацию и контроль наложения сварных соединений.

Мощные вычислительные алгоритмы для расчетов базируются на методе конечных элементов. Однако без составления базы данных по описанию свойств материалов – материаловедческой базы – решение не являлось бы полноценным. В расчетах важным компонентом являются данные по металлам и сплавам, химические и механические свойства, описание фаз и структуры в различных состояниях, теплофизические свойства. Все эти параметры оказывают сильное влияние на формирования сварочных процессов и их результат. Таким образом, наиболее подробные и полноценные базы позволяют точнее предсказать поведение процесса, и проведя нужные исследования и расчеты привести оптимальный вариант достижения качественного сварного соединения.

Имея целью в производстве получить продукт, отвечающий требованиям эксплуатации, обладающий высоким потребительским спросом и качеством, видим необходимость в использовании программного обеспечения, которое позволит автоматизировать процесс проектирования и моделирования сварных конструкций, провести инженерный анализ на этапе проектирования, чтобы избежать ошибок в изготовлении образца. Проработать технологию таким образом, чтобы использовать рационально ресурсы, и обеспечить необходимое качество. Все это позволит также повысить безопасность, которая требуется при проектировании ответственных конструкций.

Набор необходимых задач, которые, должны быть решены за счет использования программного обеспечения:

- разработать планы сварочных работ, помочь определиться с наиболее оптимальным;
- соблюдать формы изделия в заданных допусках;
- максимально снизить внутренние усилия, возникшие во время сварки;
- предсказать, обнаружить и исключить отклонения от спроектированной геометрии из-за процессов происходящих вовремя сварки;
- снизить расход материалов при сварочных работах до минимально необходимого уровня;
- оставить самый минимум зажимного инструмента необходимый для устранения деформаций;
- повысить качество сварного изделия.

В связи с выявленной необходимостью применения методов имитационного моделирования для оценки поведения сварной конструкции в условиях ее эксплуатации, тема работы является актуальной.

Целью диссертации является разработка методики проектирования и анализа 3D-модели сварной конструкции с помощью инструментов NX Weld Assistant и NX Advanced Simulation.

Объектом исследования в работе является процесс 3D-моделирования и конечно-элементного расчета конструкций.

Предметом исследования является разработка 3D-модели и расчетной конечно-элементной модели монорельса изогнутой формы.

Научная новизна работы. Разработан алгоритм построения и конечно-элементного анализа в специализированных приложениях CAD/CAE системы.

Практическая ценность. Разработанный алгоритм построения позволяет повысить качество проектных работ при моделировании сварных конструкций. Предложенный алгоритм позволяет на этапе анализа МКЭ учесть ошибки проектирования, поможет оценить сварочные напряжения и деформации, что

снизит время изготовления конструкций, и исправления геометрии после сварки.

Личный вклад автора: заключается в постановке цели и задач работы; разработке доступного алгоритма построения и анализа сварных конструкций, который возможно использовать для внедрения на предприятие, в виде пошаговой инструкции.

Структура и объем магистерской диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с заключением, а также списка использованной литературы, включающим 36 наименований. Основная часть работы изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 140 рисунков и 5 таблиц.

Глава 1. Обзор существующих программ 3D-моделирования и анализа сварных конструкций

1.1 Основные задачи развития проектирования сварных конструкций

Одним из главных направлений в современной тенденции развития проектирования сварных конструкций является создание таких 3D-моделей, которые описывали бы все многообразие явлений, до такой степени совершенства, когда проведение эксперимента в живом металле, являлось бы редким исключением. Данная задача неразрывно связана с компьютеризацией инженерной деятельности во всех отраслях сварочного производства. Решение этой проблемы условно разделяют на пять направлений (рисунок 1.1):

- научные исследования;
- проектирование сварных соединений и узлов;
- проектирование технологий;
- управление технологическими процессами
- контроль сварных конструкций во время эксплуатации.



Рисунок 1.1 – Развернутая схема компьютеризации инженерии в сварке

1.2 Понятие о CAD/CAM/CAE программах и их роли в производстве

В настоящее время существуют потребности в использовании САПР в сварке. В машиностроении наблюдается рост требований, как в отношении сварочных материалов, технологий, так и в отношении методов проектирования, где особое внимание уделяется качеству разработки элементов сварных конструкций и их анализу. В настоящее время применяются передовые технологии САПР: их участие в процессе производства дает возможность увидеть и оценить конструктивные решения на этапе разработки рабочей модели, предсказать потребительские качества будущего изделия, скорректировать ошибки, используя подсказки интеллектуальных систем.

На Рисунке 1.2 схематически в виде взаимосвязанных шестеренок представлено, как спроектированная модель, проходит инженерный анализ, после чего, включаются в процесс инструменты проектирования технологии изготовления.

Создание сварных конструкций включает в себя несколько этапов:

- Проектирование.
- Расчет.
- Рациональное построение технологии изготовления.

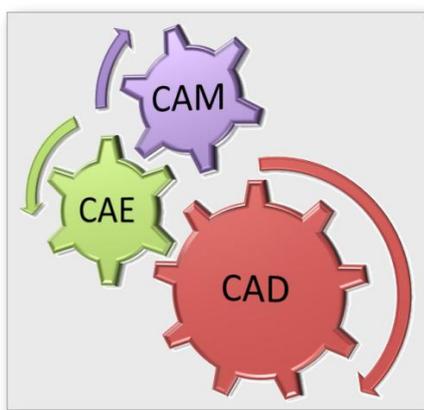


Рисунок 1.2 – Схематичное взаимодействие в САПР

CAD-системы (computer-aided design – компьютерная поддержка проектирования) разработаны, для решения конструкторских задач,

оформления документации (системы автоматизированного проектирования САПР). Современные САД-системы включают в себя блоки моделирования трехмерных объемных конструкции (деталей и узлов) и вывода чертежей, подготовки конструкторской документации (спецификаций, паспортов и т.д.). Передовые САПР способны обеспечить работу сквозного цикла подготовки в промышленности и производстве, разнообразных по сложности изделий.

САМ-системы (computer-aided manufacturing – компьютерная поддержка изготовления) предназначены для разработки технологии обработки деталей на станках, которые управляются числовым программным управлением (CNC-Speicher Numerical Control) и выдают программы для станков (фрезерных, сверлильных, токарных, шлифовальных и др.). САМ-системы или системы технологической подготовки производства, в настоящее время являются основными управляющими программами для станков, которые позволяют изготавливать с сокращенным циклом производства сложнопрофильные детали. В САМ-системах используют модели, созданные в САД-системе. САМ-программа так же может включать в себя модуль САД для решения некоторых задач, требующих построения дополнительной геометрии и т.п.

САЕ-системы (computer-aided engineering – поддержка инженерных расчетов) представляют обширный список программ, каждая из которых способна решать задачу или группу задач по инженерным расчетам. Расчеты могут быть абсолютно различными, например, на прочность, моделирование тепловых процессов, расчеты пневматических и гидравлических систем и машин, расчеты процессов штамповки. САЕ-системы используют для анализа модели детали, созданную в САД-системе. САЕ-системы в связи с родом их деятельности называют системами инженерного анализа.

САПР в настоящее время стали основным инструментом для работы инженеров во многих отраслях промышленности. В решении задач технологической подготовки производства широко используют САПР технологических процессов (ТП). Так его использование позволяет заметно

повысить качество спроектированных деталей и узлов, а также скорость проектирования.

САПР направлены на повышение общей функциональности в автоматизации технологического моделирования и описания процессов, выбора оборудования и средств оснащения, накопления баз данных в форме информационных массивов, выпуск различной сопровождающей документации и т.п. Методы автоматизированного проектирования в САПР уже достаточно отработаны, и их можно представить в виде следующего списка:

- проектирование с использованием баз данных;
- проектирование по существующему техпроцессу-аналогу;
- проектирование, где применяется часто повторяемые технологические решения;
- проектирование, которое основано на групповых и типовых техпроцессах;
- проектирование на основе технологического описания геометрии обрабатываемых поверхностей.

“Данные методы используются в различных видах производства” [1].

Эффективность разработки технологического проектирования сварки с использованием САПР потребует решения нескольких узконаправленных специализированных вопросов:

- автоподбор сварочных материалов по определенным заданным критериям;
- автоматизированное предложение использования конкретных оптимальных режимов сварки;
- автоматизированный расчет расходных материалов и сопровождающих процесс сварки ресурсов, нормирование.
- создание единого механизма для описания алгоритмов по различным способам сварки;
- получение такой среды для работы технолога, где объединились в себе необходимые конструкторские и технологические данные

необходимые в работе.

Развитие истории внедрения САПР в процесс производства можно представить, как три основных этапа, длительность каждого из которых, около 10 лет. Первый этап начался в 1970-е годы. Был получен ряд научно-практических достижений, результаты которых показали возможность проектирования объёмных, сложных промышленных изделий. Вторым этапом (1980-е) можно выделить появление и быстрый рост распространения САПР массового применения. Третий этап распространения начинается с 1990-х и продолжает своё развитие, а заключается в совершенствовании и расширении функциональности CAD/CAM/CAE-систем и их распространении с геометрической прогрессией в высокотехнологичных сферах.

Основные направления, в которых развиваются современные САПР следующие:

- Разработка систем, с интеллектуальной составляющей, образующих и расширяющих базы знаний, помогающих инженеру в принятии решений на основе имеющихся данных.
- Разработка систем, которые могли быть интегрированы, так что позволяли бы реализовать параллельное проектирование. Образование единой конструкторско-технологической модели данных.
- В создание и развитие индивидуальных систем. Эта концепция позволит снижать экономические показатели.

1.3 Возможности CAD/CAM/CAE программ в области сварки

Современный уровень технологий содержит в себе накапливаемую материальную базу и развивающиеся программные средства вычисления, что позволяет переходить от множественных простых не связанных моделей к качественной связанной многопараметрической модели. Результатом подобного перехода выступает одновременный учет пересечения параметров и явлений и реальное отображение протекающего технологического процесса в различные

моменты времени в зависимости от данных. Выходит, что благодаря этому повышается и уровень математической сложности, требующий специальных знаний. Для решения сложных типовых расчетов и принятия решений в инженерной практике создаются соответствующие специализированные программные средства автоматизации (рисунок 1.3).

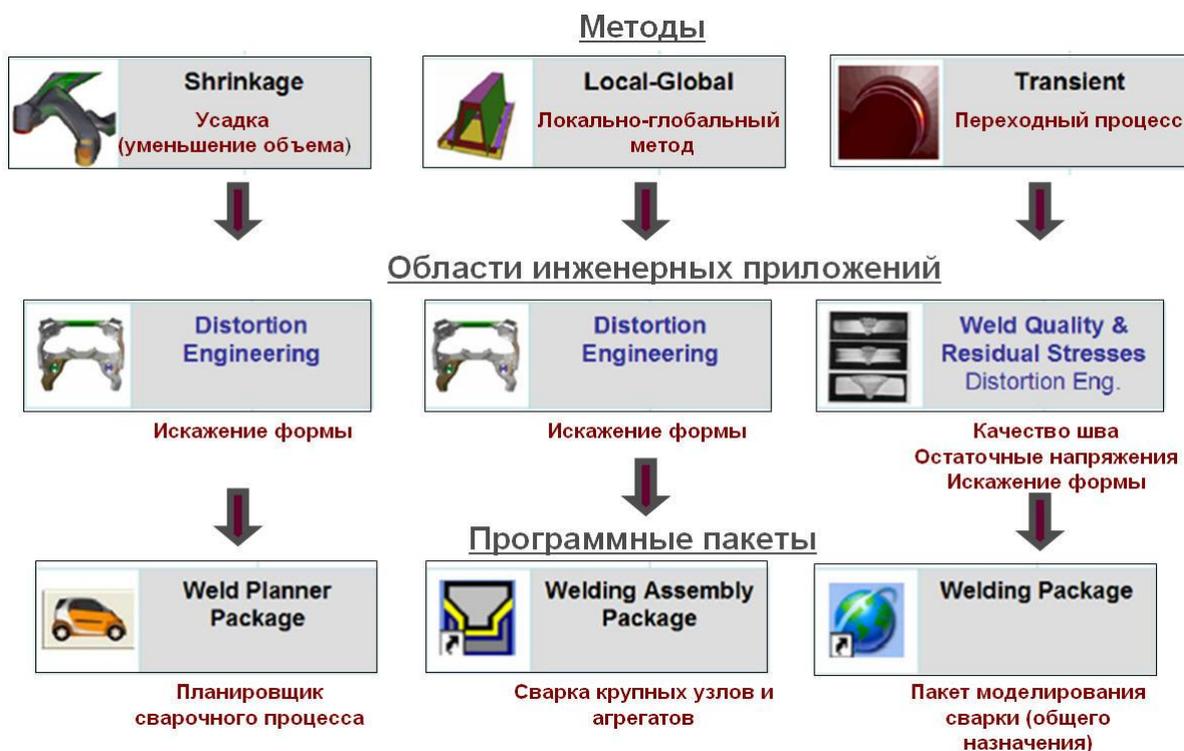


Рисунок 1.3 – Классификация последовательности выбора САПР для моделирования процессов сварки

Для анализа современные САПР позволяют получать модели несколькими способами:

- проектированием методами трехмерного 3D-моделирования;
- импортом уже готовых 3D-моделей из различных CAD;
- разработкой и моделированием детали с физического прототипа, пользуясь автоматизированным координатно-измерительным оборудованием.

Важным направлением в системах инженерного анализа является моделирование на основе численных методов, в частности с использованием метода конечных элементов. Моделирование широко используется для

описания физических процессов, которые протекают в условиях ускоренного нагрева и охлаждения металла при сварке (рисунок 1.4), поэтому, в качестве математической основы для современных вычислительных комплексов инженерного анализа применяется метод конечных элементов (МКЭ).

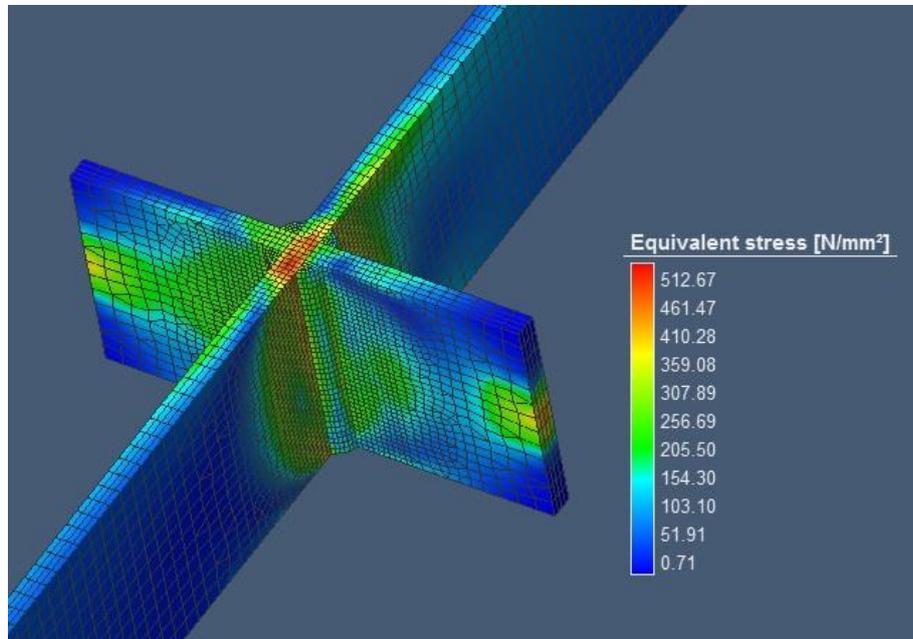


Рисунок 1.4 – Пример анализа модели методом конечных элементов

Современное моделирование во многом связано с изучением сварочных деформаций (рисунок 1.5).

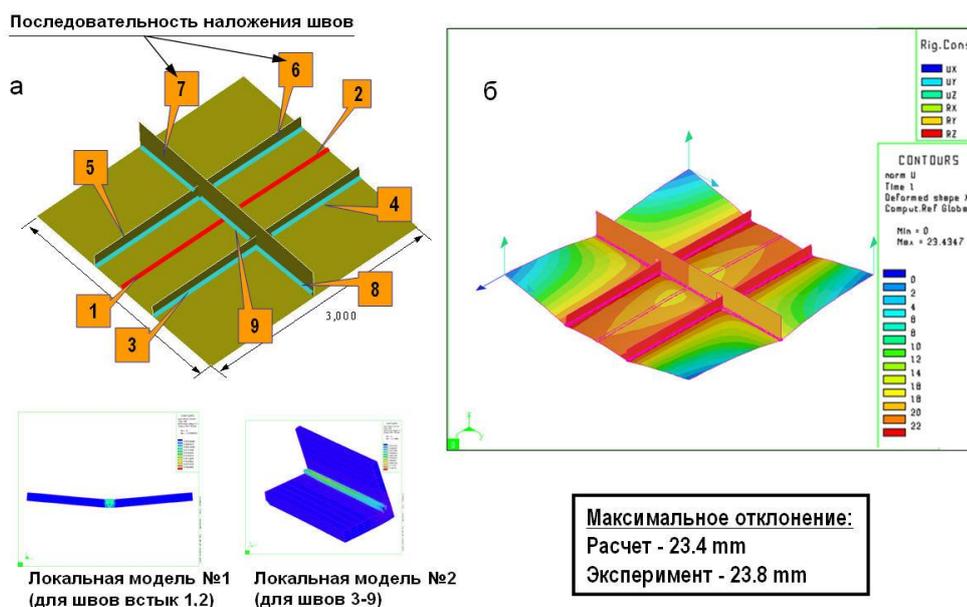


Рисунок 1.5 – Расчет остаточных сварочных деформаций и напряжений

Для решения многих задач требуется проводить совместно термический и механический анализы.

Современные разработки в моделировании процессов сварки достигли момента, когда могут решать вопросы надежности и долговечности сварных узлов и конструкций. Позволяют прогнозировать процесс появления и развития усталостных трещин.

САПР участвует и в анализе процессов, сопутствующих процессам сварки. К примеру, в эпоху жестких требований к созданию безопасных и безвредных рабочих условий, САПР позволяет рассчитывать уровень предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей области (рисунок 1.6), где идет сварка с участием человека. Программы позволяют рассчитать необходимое количество вытяжных устройств на рабочем месте, и мощность подачи чистого воздуха вентиляционными системами.



а

б

Рисунок 1.6 – Вредные рабочие условия: а - Работа с вытяжной установкой, б - работа с современным индивидуальным фильтром

Многие системы дают возможность описывать не только простые и типичные свойства материалов, но также и неоднородную структуру, что полезно для исследовательских разработок в сфере новых материалов.

Примером может служить описание слоистых, пористых материалов, а также материалов с включениями.

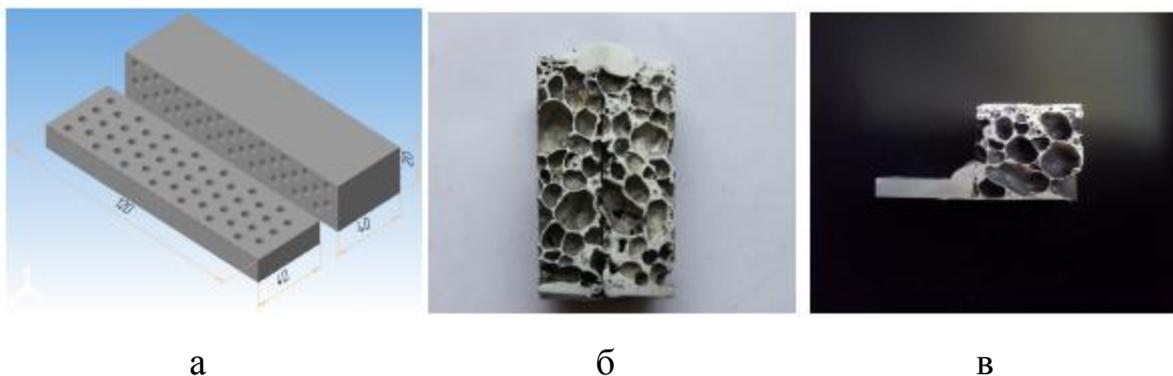


Рисунок 1.6 – Модель и результаты экспериментов с пористыми материалами: а – модель пеноалюминия; б – сварное соединение двух образцов пеноалюминия; в – сварное соединение сплошного алюминия с вспененным дюралюминием

В базах данных содержатся необходимые теплофизические сведения о материалах. Базы данных можно постоянно пополнять, а сами базы позволяют проектировать самые разнообразные композиционные материалы, которые можно исследовать и управлять структурой свариваемых образцов.

1.4 Обзор программного обеспечения для проектирования и анализа сварных конструкций

Для обзора САПР общего назначения, рассмотрим комплексы, где реализованы возможности проектирования процессов. Положение дел на рынке САПР складывается следующее: все стремятся сейчас охватить максимально обширную область направлений для проектирования и анализа, однако подход к реализации этой задачи компании разработчики выбирают различный. Реализуют предложения в виде отдельной программы, работающей с определенным пакетом САПР, или многими модулями с возможностью приобретать их по отдельности, или комбинировать только необходимые для своего производства, а также собрать их в один полноценный пакет.

Таблица 1.1 – Рынок программ САПР

Класс САПР	Продукт	Компания
Тяжелый	NX	Siemens PLM
	CATIA	Dassault Systemes/IBM
	Pro/Engineer	PTC
Средний	Зарубежные системы	
	SolidEdge	Siemens PLM
	SolidWorks	SolidWorks
	Inventor и Mechanical Desktop	Autodesk
	Cimatron	Cimatron
	think3	Think3 S.p.A.
	CadKey	CadKey
	PowerSolutions	Delcam
	Отечественные продукты	
	КОМПАС(CAD/CAM/CAE/PDM)	«Аскон»
	T-Flex (CAD/CAM/CAE/PDM)	«Топ Системы»
	КРЕДО (CAE)	НИЦ АСК
Легкий	AutoCAD	Autodesk
	SurfCAM 2D	Surfware
	DataCAD	DataCAD
	IntelliCAD	CADopia
	TurboCAD	IMSI

Среди наиболее известных и крупных комплексов на нашем рынке является компания АСКОН. Она предлагает такие продукты как Компас-3D и ВЕРТИКАЛЬ (рисунок 1.7). В данных продуктах реализованы возможности моделирования и проектирования, внедрена система расчетов режимов сварки.

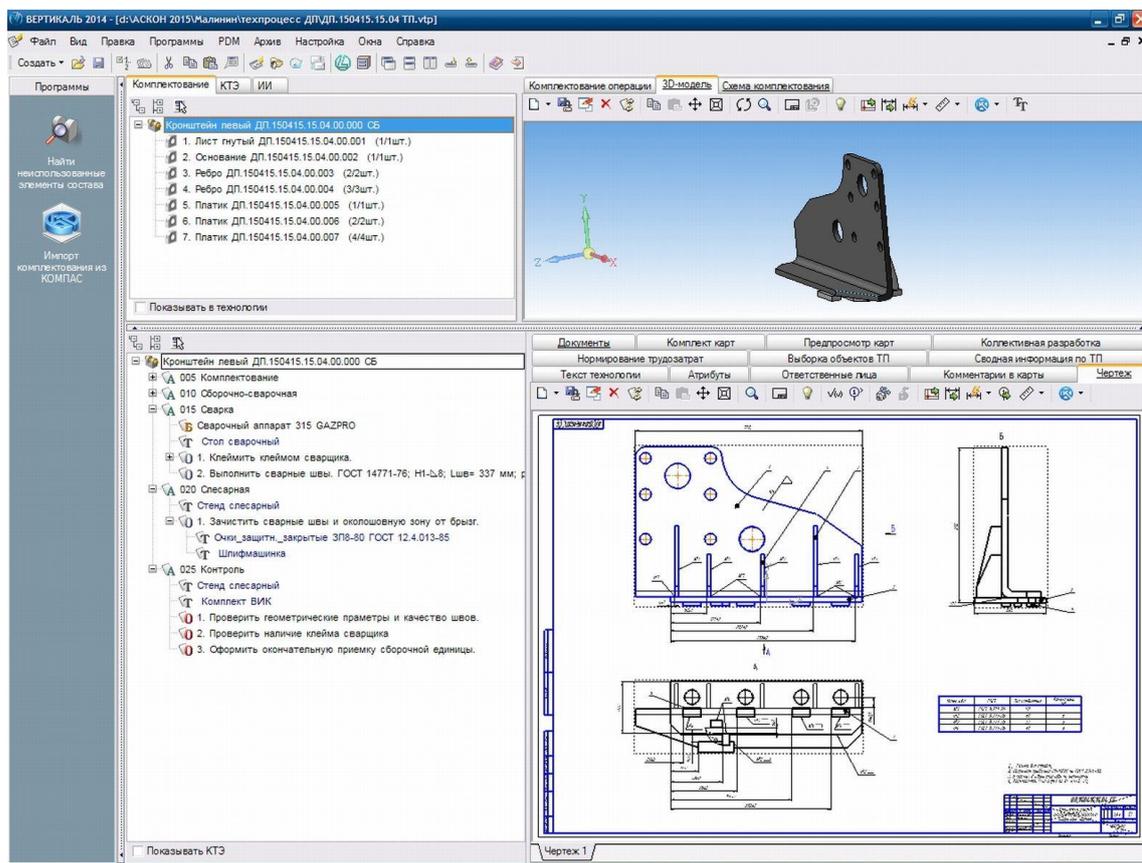


Рисунок 1.7 – Пример продукта ВЕРТИКАЛЬ от АСКОН

Продукция АСКОН постоянно развивается и старается расширять свои возможности, перенимать уже отточенные достижения других разработчиков, однако пока отстают от зарубежных конкурентов.

Еще один отечественный разработчик компания СПРУТ-Технология (рисунок 1.8), предлагающая возможность проектирования, автоматизации технологии, однако модуль инженерного анализа пока не был представлен их компанией. Не смотря на это, программа даёт качественные, красивые и реалистично точные симуляции процессов обработки. Так же имеет комплекты документации, для многих технологических процессов включая сварку. Интегрируется прямым обменом данными о моделях с различными другими CAD.

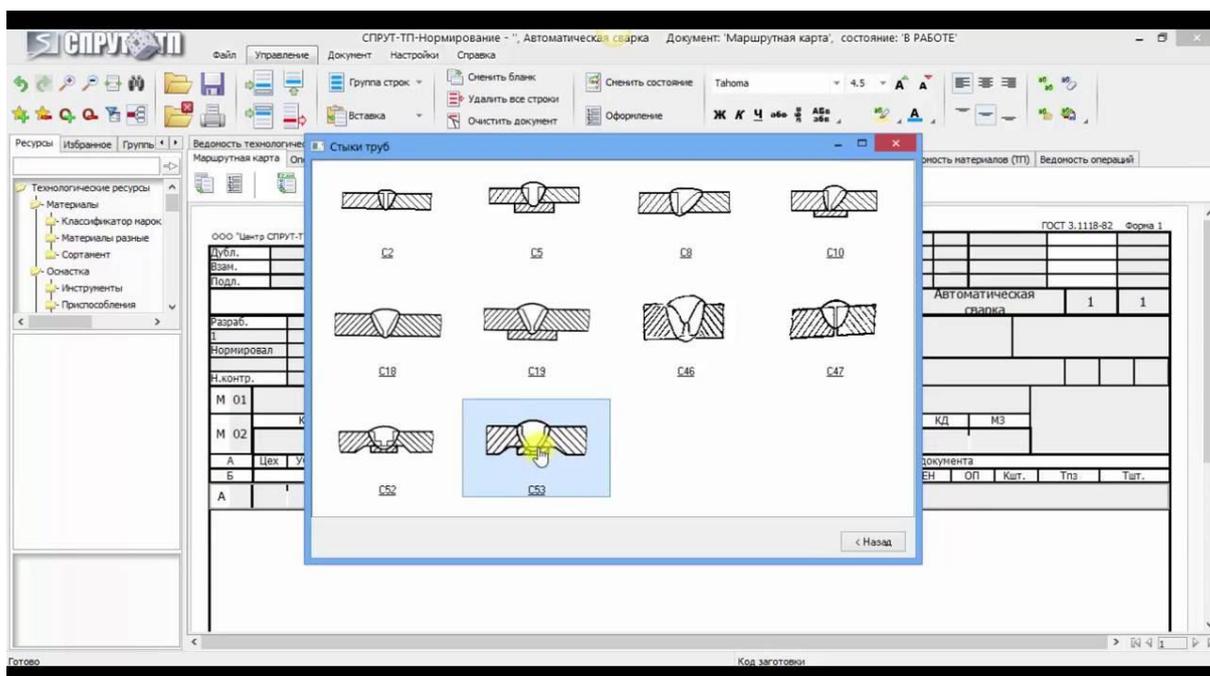


Рисунок 1.8 – Пример баз о сварке для проектирования технологических процессов

Autodesk – предлагает продукт под названием AutoCAD (рисунок 1.9). Данный комплекс достаточно сильный, и развитый, имеет много преимуществ и интересных возможностей. Главным минусом отметим снова отсутствие, какого-либо модуля САЕ-анализа. В арсенале компании есть программа INVERTOR, которая имеет возможности анализа, но до не давнего времени она не развивалась, и в данный момент значительно отстала и требует разработки.

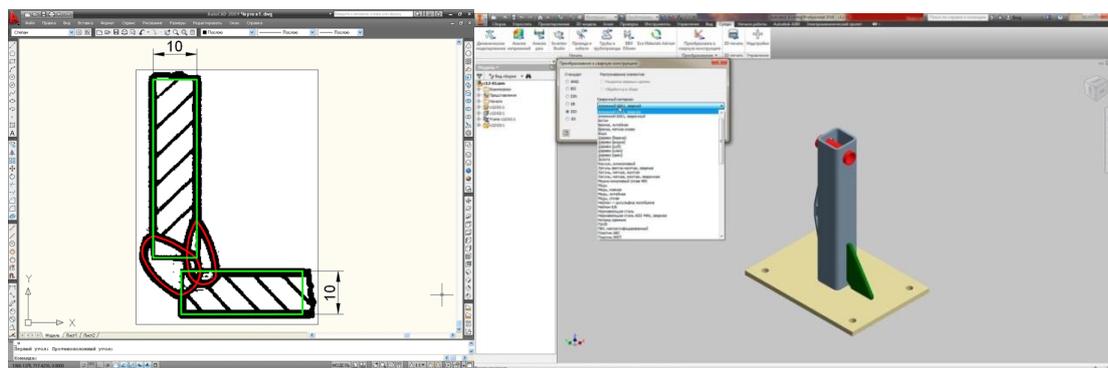


Рисунок 1.9 – Примеры эскиз шва и преобразование конструкции в сварную

Компания DASSAULT SYSTEMES представляет такие САПР как: CATIA и SolidWorks (рисунок 1.10).

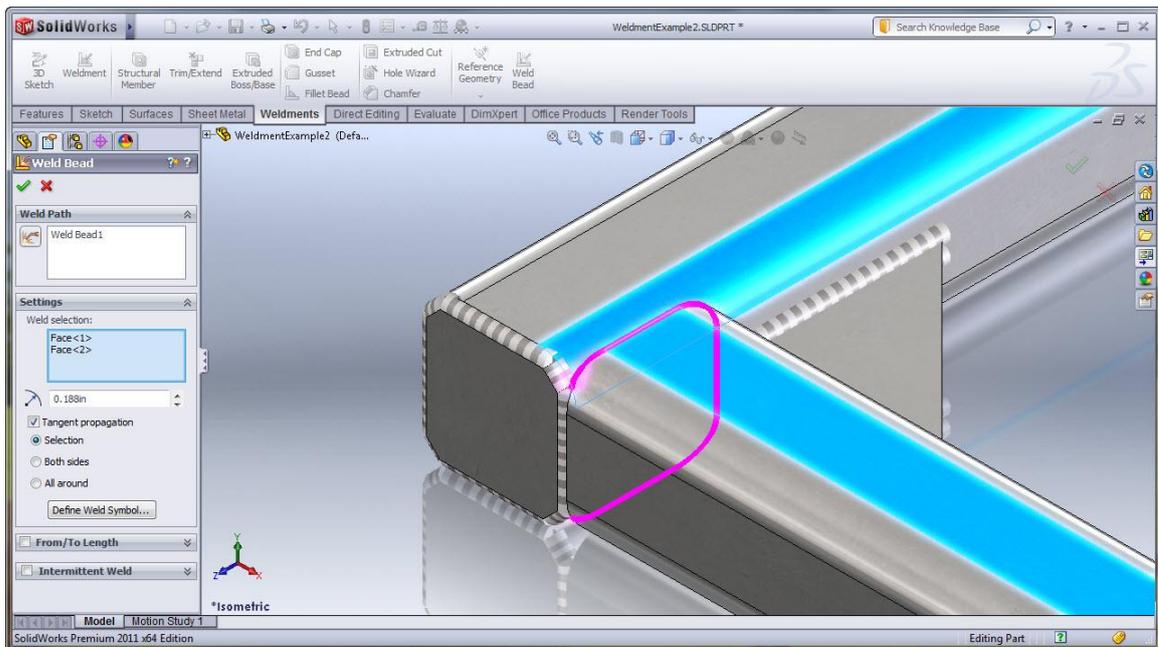


Рисунок 1.10 – Пример нанесения сварных швов и их визуализации в SolidWorks

SolidWorks обладает достаточно мощными инструментами САЕ-анализа (рисунок 1.11), однако полные возможности расчетов разбиты на несколько модулей, каждый из которых приобретается отдельно.

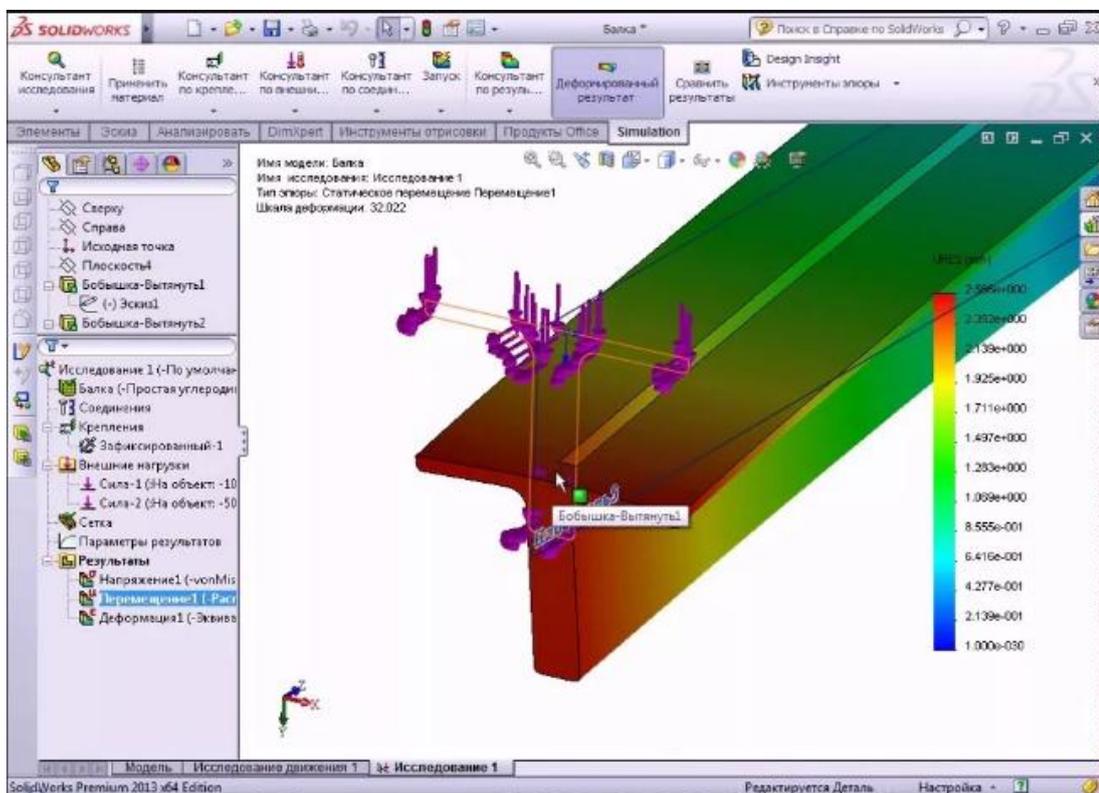


Рисунок 1.11 – Пример расчета консольной балки

CATIA – крупнейший лидер среди САПР предлагающих инновационные разработки в сфере моделирования. Благодаря развитию и накоплению данных, обладает различными уже готовыми описаниями процессов из многих отраслей, включая сварку (рисунок 1.12).

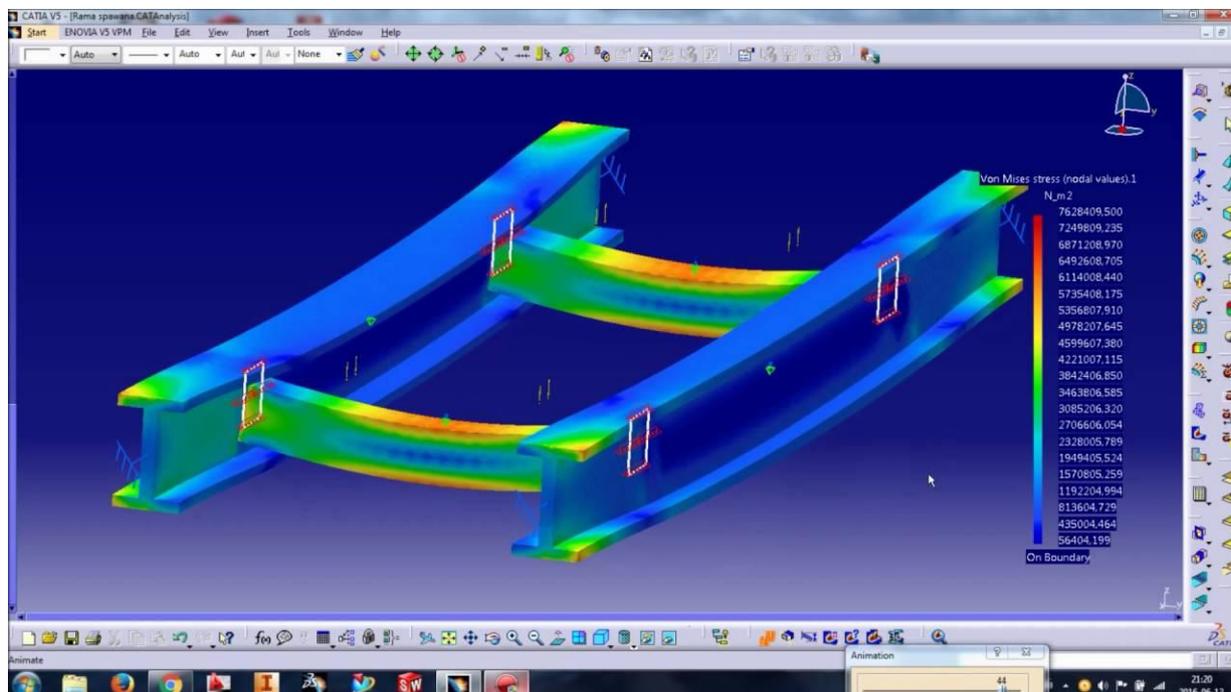


Рисунок 1.12 – Анализ сварной конструкции в САТИА

Принцип работы модуля сварки в САТИА следующий: создаётся сборка и назначаются связи, далее переходите в модуль сварки и накладываете сварные швы, функциональность модуля позволяет сделать все, что требуется. Нет необходимости предварительно задумываться о разделке деталей под сварку, это делается автоматически, есть возможность выбрать ручной режим, если уже выполнена разделка заранее. Функционал модуля позволяет позиционировать детали, это значит, что вы можете собрать их в сборке предварительно, не окончательно, отдать другому участнику проекта, и он сможет с позиционировать их по своему усмотрению.

NX – разработка компании Siemens PLM Software. Является флагманом среди CAD/CAM/CAE-систем, прямым конкурентом САТИА и Creo Elements/Pro. NX мощный инженерный продукт, рассчитанный на решение масштабных задач и проведение сложнейших и ресурсоёмких расчетов.

Возможности анализа в NX представлены приложениям пре- и постпроцессинга, построенном на общей базе платформы приложений NX CAD. Набор средств анализа подключен к интерфейсу расчетных решателей. Решателями могут выступать пакеты сторонних разработчиков, и пакет NX Nastran (рисунки 1.13-1.14).

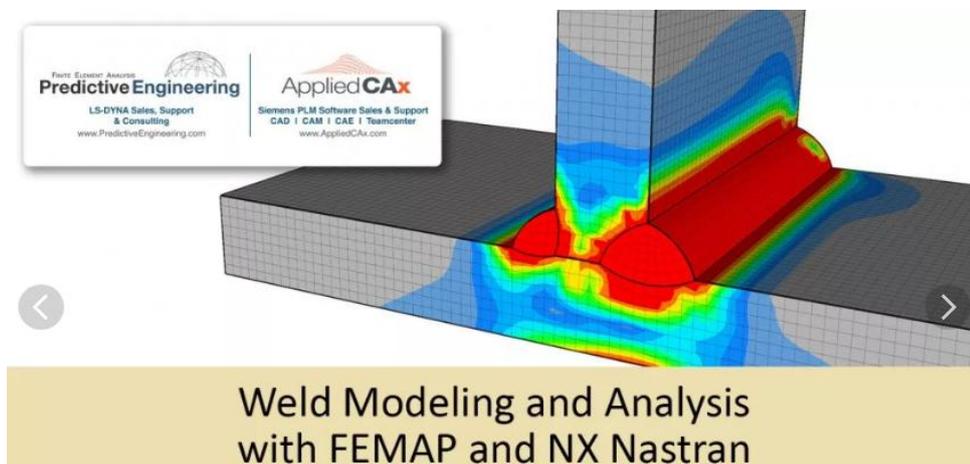


Рисунок 1.13 – Пример анализа сварного соединения в NX Nastran

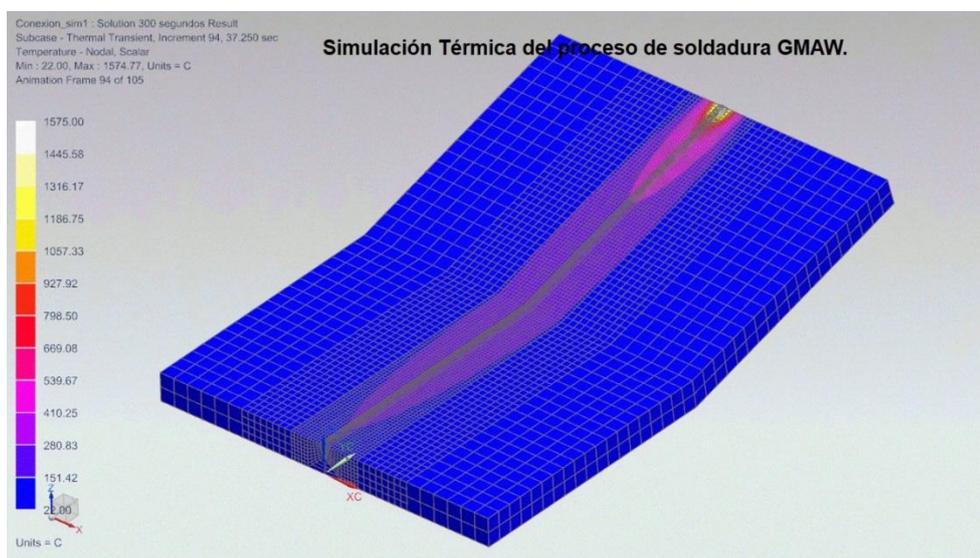


Рисунок 1.14 – анализ деформации в результате процесса сварки в NX Nastran

NX – система твердотельного гибридного моделирования, состоит из комплекса конструкторско-технологических модулей:

- пакета твердотельного гибридного моделирования;
- мощных средств визуализации и анимации;

- модуля высокоскоростной технологической обработки для любых типов оборудования;
- модуля инженерного анализа.

В пользу выбора пакета NX считаю нужным отнести открытый мощный программный интерфейс, что позволяет полностью интегрировать в NX личное разработанное под собственные нужды программное обеспечение. Присутствует необходимый обмен данными с другими системами, с поддержкой различных форматов данных.

Моделирование в NX предлагает гибкий методологический подход, и создаёт возможность выбора конструктором наилучшего варианта между каркасной, поверхностной или твердотельной моделью, параметрическим, прямым или динамическим моделированием с использованием эскизов. Удобна функция прямого моделирования, когда наложение геометрических ограничений, позволяет перестраивать твердое тело, не изменяя дерево построения. Есть набор инструментов для анализа в объеме сборки, для повышения качества конструкции с устранением выявленных проблем.

Модуль создания сварных конструкций –NX Weld Assistant (рисунок 1.15) относится к специальным решениям, реализованным в NX. Особо хочется отметить, что Siemens даёт высшим учебным заведениям, бесплатные лицензии на полный пакет NX.

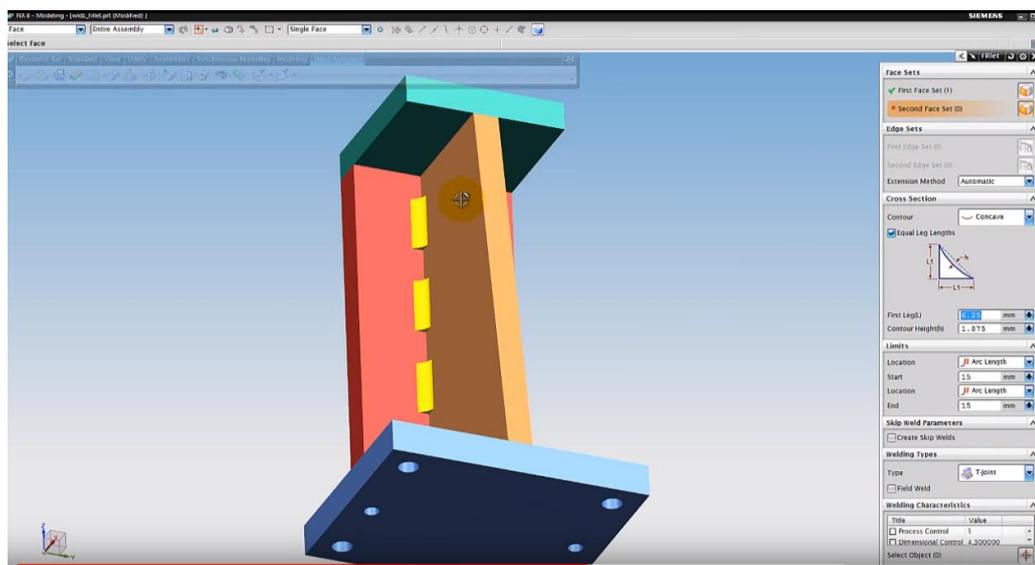


Рисунок 1.15 – Моделирование сварных швов в NX Weld Assistant

1.5 Выводы по первой главе

Применение САПР для сварочного производства направлено на существенное повышение качества и скорости технологического проектирования.

Современные возможности моделирования стремительно развиваются и готовы моделировать процессы, повышая точность, чтобы в будущем отказаться от реальных испытаний в пользу смоделированных ситуаций.

Анализ конструкции на этапе проектирования позволяет устранить последствия технологического процесса сварки, закрепляя конструкцию в проблемных местах, сэкономив на исправлении геометрии из-за деформации.

САПР открывают возможности в исследовании и создании новых материалов, на основе технологий сварочного производства, минуя трудоемкие натурные физические испытания.

Глава 2. Общие сведения о видах сварных конструкций и методах их проектирования и анализа

2.1 Общие сведения о видах сварных конструкций

Сварные конструкции – конструкции, выполненные с использованием сварки, соединяющей отдельные детали. Существует несколько видов классификации сварных конструкций по различным признакам и параметрам. Например, исходя из способа получения заготовок для конструкции, они могут быть:

- листосварной или листоштамповсварной конструкцией;
- листовой;
- кованосварной;
- штамповсварной;
- стержневой.

В зависимости от месторасположения использования можно поделить на следующие типы:

- судовые;
- строительные
- авиационные;
- вагонные;
- транспортные; и прочие [1].

Есть классификация и по признаку, зависящему от определенных характерных особенностей работы сварной конструкции. Представим её более детально:

1. Балки, являются конструкционными деталями, предназначены для работы на поперечный изгиб.
2. Колонны. Работают на сжатие, с продольным изгибом.
3. Конструкции решетчатообразные – состоят из стержней, которые соединяются в узлах так, чтобы они испытывали сжатие или растяжение.

Такие конструкции бывают разных видов – это и мачты, и фермы, и арматурные сетки и т.д.

4. Конструкции, которые эксплуатируют под сильным давлением. При изготовлении таких конструкций очень важно выполнение требований по герметичности соединений. К таким конструкциям обычно относят трубопроводы всех назначений, различного вида сосуды и емкости.
5. Корпусные транспортные конструкции. Эти конструкции подвергаются в основном динамическим нагрузкам. Они должны иметь высокие показатели жесткости и небольшой вес. К таким конструкциям относятся корпуса вагонов, кузовов автомобилей и пр. [2].

Остановимся на делении сварных конструкций как на стержневые, листовые и машиностроительные:

1. Стержневые конструкции - каркасы строительных зданий, специальные конструкции.
2. Листовые конструкции – конструкции, с повышенными требованиями к прочности, коррозионной стойкости и герметичности - резервуары, газгольдеры, котлы.
3. Машиностроительные конструкции – высокоточные конструкции- валы рамы, станины и др.

Как видим из всевозможных классификаций, к любому виду сварных конструкций применимы высокие требования по качеству, так как они являются ответственными конструкциями, иногда несущими.

2.2 Определение качества сварных конструкций, его обеспечение

Заметим, что любая деталь, узел, конструкция или сооружение обязаны отвечать требованиям *надежности* и *работоспособности* в течение срока службы и эксплуатации. *Работоспособностью* называют такое состояние конструкции, при котором все параметры соблюдены в соответствии с конструкторской и нормативной документацией и их значения способны

выполнять поставленную задачу. *Надежности* дадим определение как свойство объекта сохранять в допустимых пределах значения всех своих параметров во времени. Тем самым сохранять способность выполнения прямых функций при работе в заданных режимах и условиях применения. Надежность представляет собой комплекс сочетания нескольких или всех сразу свойств типа безотказности, долговечности, ремонтпригодности и т.п. Современные реалии таковы, что любые приборы, машины, конструкции в независимости от своих высоких характеристик будут обесценены при ненадежной работе. Надежность складывается на каждом этапе создания и жизни конструкции. Обеспечение надежности конструкции во многом обусловлено – качеством, а потеря надежности обусловлена в основном из-за разрушения (статического, усталостного), изнашивания и недостаточной *жесткости*.

Для оценивания работоспособности и надежности сварных конструкций необходимо указать критерии, по которым их оценивают – условия и показатели. Определим важнейшие из них:

1. Прочность
2. Жесткость
3. Износостойкость
4. Коррозионная стойкость
5. Виброустойчивость, и др.

Для расчета и проектирования обычно применяют один или два критерия, остальные считают не имеющими практического значения для конкретных заданных условий, или удовлетворенными заведомо.

2.3 Основы проектирования сварных конструкций

Для того что бы приступить к проектированию сварных конструкций необходимо знать следующее:

1. Теорию сварочных деформаций и напряжений.
2. Методы расчета сварных соединений и конструкций

3. Способы обеспечения технологичности
4. Знать материаловедение, и характеристики сварочных материалов, которые будут использоваться
5. Особенности работы цельных сварных конструкций и отдельных элементов

Потребуется навыки умения определять условия нагрузки на цельные сварные конструкции и отдельные элементы. Проводить расчет возникающих сварочных напряжений и деформаций, и подвергать их анализу. Применять в конструировании сварных конструкций расчеты с учетом нагрузок, и обеспечением требований по технологичности и экономичности производства.

Проектирование сварных конструкций при помощи САПР включает в себя несколько этапов:

1. Формулировка технического задания на проектирование, которое составляют, учитывая возможности и условия производства

2. Эскизное проектирование, целью которого будет разработка оптимального проекта нового изделия по параметрам, полученным на основе предварительных исследований. Эскизное проектирование предусматривает анализ с помощью компьютерных САД большого числа конструктивных решений. Проводя анализ выбранных решений, убеждаемся, в правильности разработанного проекта нового изделия еще до его изготовления и эксплуатации. На стадии эскизного проектирования собираются в изделие все его составляющие узлы и определяются геометрические характеристики.

3. Техническое проектирование. На этой стадии рабочего проектирования проводится кропотливая детальная конструкторская проработка всех систем и узлов нового изделия. Изготавливается полный комплект чертежей. Проверяется техническое задание и сверяется с ним результат. САПР здесь применяется для повышения статических и динамических характеристик узлов изделия, подготовки чертежей и спецификаций.

4. Изготовление. Здесь САПР используют для выбора определенного технологического варианта изготовления изделия; написания программ к

станкам и автоматам; рационализации последовательности сборочных и транспортных операций, назначения параметров режима сварки и т.п.

Весь процесс автоматизированного проектирования рассматривается как интерактивный, дающий возможность разработчику быстро проверить гипотезу (вариант модели проекта), оценить ее в многошаговом процессе оптимизации и приступить к конструкторской и технологической проработке проекта. В каждой гипотезе предлагается модель объекта, являющаяся теоретическим и аналитическим представлением проекта. Эта модель анализируется в блоке «Анализ».

2.3.1 Выбор материалов для сварных конструкций

От правильного выбора материала многое зависит, поэтому что он является одним из основных параметров при проектировании сварных конструкций. Материал определяет работоспособность изделия. От выбора материала зависит технология изготовления конструкции и стоимость изделия.

Зная условия эксплуатации, можем получить исходными данные для выбора материала, также материал должен иметь технологические свойства, подходящие для использования процессов сварки выбранной технологии.

При выборе материала учитывают комплекс условий: первоначальные затраты на материал, технологическую обработку (в т.ч. сварку) возможность последующего ремонта и т.д.

К материалам, используемым при изготовлении сварных конструкций, можно отнести стали, цветные сплавы, а также пластмассы, композитные материалы. Но основное место при проектировании и производстве сварных конструкций занимают конструкционные стали и цветные сплавы [3].

Металлы имеют различные свойства свариваемости, от которой зависит, на сколько сложнее и дороже производить сварку деталей. При выборе материала следует подбирать наиболее оптимальный вариант чтобы достичь необходимых свойств конструкции, при меньших затратах на приобретение

металла и его сваривании. Пример деления сталей и распределения по группам свариваемости представлен в таблице 2.1.

Всего групп свариваемости четыре, характеризуются и отличаются они условиями сварки:

- I. Без ограничений, в широком диапазоне режимов сварки независимо от толщины металла, жесткости конструкции, температуры окружающей среды.
- II. Сварка только при температуре окружающей среды не ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, толщине металла не менее 20 мм при отсутствии ветра.
- III. Сварка с предварительным или сопутствующим подогревом до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в жестком диапазоне режимов сварки.
- IV. Сварка с предварительным и сопутствующим подогревом, термообработкой после сварки.

Таблица 2.1 – Разделение марок сталей по группам свариваемости

ГРУППА СВАРИВАЕМОСТИ	Сзк, %	МАРКИ СТАЛЕЙ		
		Углеродистые	Легированные	Высоколегированные
I Хорошая	До 0,25 вкл.	ВСт1; ВСт2; ВСт3; ВСт4; Стали 08; 10; 15; 20; 25	15Г; 20Г; 15Х; 15ХА; 20Х; 15ХМ; 20ХГСА; 10ХСНД; 10ХГСНД; 15ХСНД	08Х20Н14С2; 20Х23Н18; 08Х18Н10; 12Х18Н9Т; 15Х5
II Удовлет- ворительная	Свыше 0,25 до 0,35 вкл.	ВСт5; Стали 30; 35	12ХН2; 12ХН3А; 20ХН3А; 20ХН; 20ХГСА; 30Х 30ХМ; 25ХГСА	30Х13; 12Х17; 25Х13Н2
III Ограниченная	Свыше 0,35 до 0,45 вкл.	ВСт6 Стали 40; 45	35Г; 40Г; 45Г; 40Г2; 35Х; 40Х; 45Х; 40ХМФА; 40ХН; 30ХГС; 30ХГСА; 35ХМ; 20Х2Н4МА	17Х18Н9; 12Х18Н9; 36Х18Н25С2; 40Х9С2
IV Плохая	Свыше 0,45	Стали 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85	50Г; 50Г2; 50Х; 50ХН; 45ХН3МФА; ХГС; 6ХС; 7Х3	40Х10С2М; 40Х13; 95Х18; 40Х14Н14В2М; 40Х10С2М

2.3.2 Виды соединений в сварных конструкциях

Виды соединений в сварных конструкциях отличаются для разных типов конструкций. Рассмотрим наиболее распространённые из них.

Стыковые. Стыковое соединение представляет собой соединение двух трубных или двух плоских элементов, примыкающих торцевыми частями как на рисунке 2.1. Отличаются высокой прочностью при динамических и статических напряжениях. Подходят к выполнению любыми видами сварки.

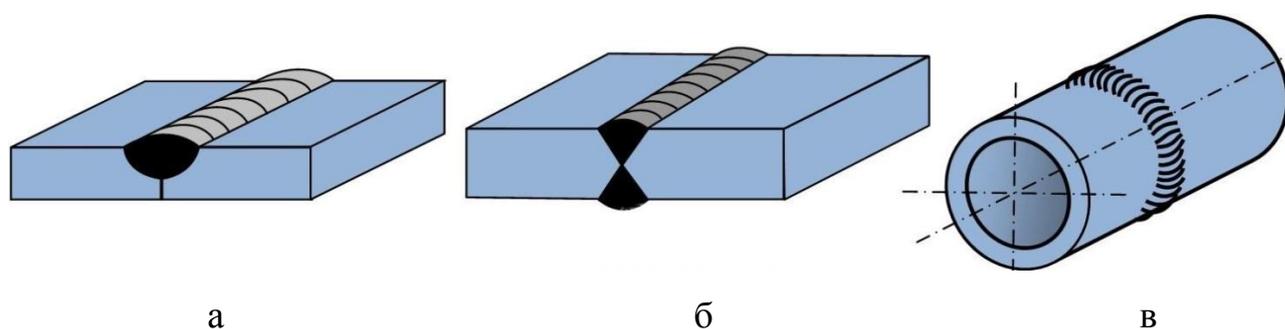


Рисунок 2.1 – Стыковое соединение: а - с односторонней разделкой кромок; б - с двухсторонней разделкой кромок, в - стыковое соединение трубы

Нахлесточные соединения. Применимы для элементов толщиной не более 60 мм. В данном виде соединения, детали расположены параллельно друг другу, с частичным перекрытием (рисунок 2.2). Преимуществом данного соединения является отсутствие требований к точным размерам при подготовке. Не рекомендуется к применению при динамических нагрузках, или в агрессивных средах.

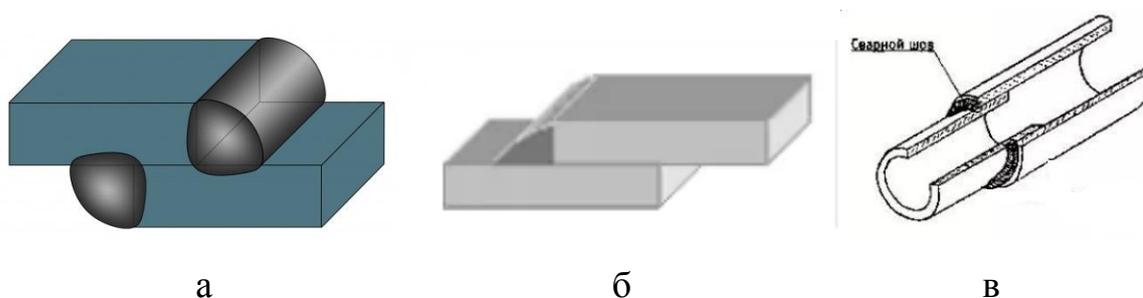


Рисунок 2.2 – Нахлесточное соединение: а - двухсторонний шов; б - односторонний шов; в - соединение труб внахлест

Угловые соединения (рисунок 2.3). Выполняют преимущественно связующую роль в конструкциях. Не предназначены для передачи конструкции рабочих нагрузок. Выполняются практически всеми методами сварки плавлением.

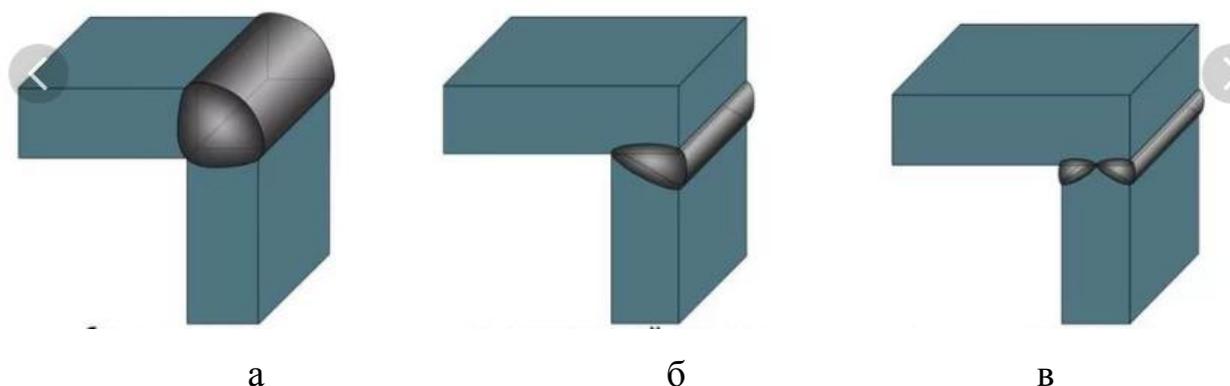


Рисунок 2.3 – Угловое соединение: а - без скоса кромки; б - со скосом кромки; в - с двумя скосами кромки

Тавровое соединение (рисунок 2.4). Образуется соединением торца одной детали, к поверхности другой детали. Характеризуется это соединение обеспечением высокой жесткости конструкции, но чувствительно к изгибающим нагрузкам.

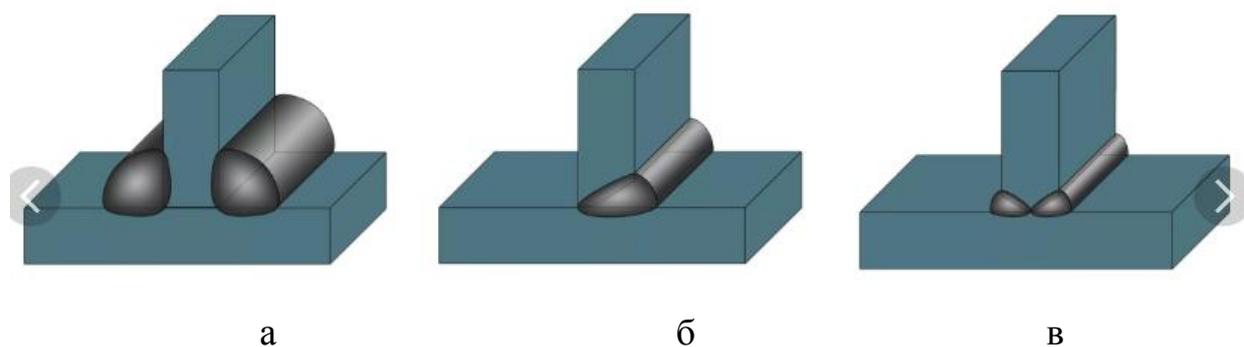


Рисунок 2.4 – Тавровое соединение: а - без скоса кромки; б - со скосом кромки; в - с двумя скосами кромки.

Чтобы получить более точную информацию по типам швов для каждого вида сварного шва, необходимо обратиться к соответствующим ГОСТам, в

которых будут приведены диапазоны допустимых толщин металла относящиеся к конкретному виду соединения для определённого типа сварки:

- “ГОСТ 14771-76 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры” [4];
- “ГОСТ 5264-80 Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры” [5];
- “ГОСТ 8713-79 Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры” [6];
- “ГОСТ 16037-80 Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры” [7] и др.

2.4 Виды сварки, оборудование

Ручная дуговая сварка - это наиболее широко распространённый вид сварки. Она используется во всех видах промышленности, а также в быту. Предназначена для сварки большого вида сталей, чугуна и цветных металлов. Сварка осуществляется плавящимся электродом. Который состоит из металлического стержня, предназначенного для проведения эл. тока и формирования сварочного шва, и обмазки предназначенной для защиты шва от воздействий окружающей среды, стабильного горения дуги, раскисления расплавленного металла сварочной ванны, легирования металла, для связывания составляющих покрытия и образования шлака, который должен обладать определёнными физ., хим. данными. Сварка осуществляется следующим образом: между электродом и основным металлом зажигается электрическая дуга, которая расплавляет металл и образует на нем жидкую ванну (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Ручная дуговая сварка: а - визуальное фото процесса; б - схема протекания процесса ручной дуговой сварки.

Сварщик вводит в пламя дуги конец электрода, который расплавляется и смешивается в ванне с основным металлом, результат показан на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Шов ручной дуговой сварки плавящимся электродом

В настоящее время чаще используются более лёгкие по весу (3-6 кг) сварочные инверторы (рисунок 2.7), которые производятся разными фирмами и в большом разнообразии. Сварочные трансформаторы же имеют больший вес и большую надежность, но удобны в плане компактности.



Рисунок 2.7 – Современный компактный сварочный инвертор

Плюсы данного вида сварки:

- довольно легко обучиться азам РДС
- возможность сварки в любых пространственных положениях;
- возможность сварки в местах с ограниченным доступом;
- сравнительно быстрый переход от одного свариваемого материала к другому;
- возможность сварки самых различных сталей благодаря широкому выбору выпускаемых марок электродов;
- простота, дешевизна и транспортабельность сварочного оборудования.

Минусы:

- проблематична сварка тонкого (меньше 1,5-2 мм) металла и сварка цветных металлов неопытными сварщиками;
- низкие КПД и производительность по сравнению с другими технологиями сварки;
- качество соединений во многом зависит от квалификации сварщика;
- вредные условия процесса сварки.

Полуавтоматическая сварка – это вид дуговой сварки, при котором сваривание происходит благодаря автоматически подающейся в зону сварки электродной проволоки с одновременной подачей в ту же зону защитного газа (рисунок 2.8).

- 1 - Горелка
- 2 - Сопло
- 3 - Токоподводящий наконечник
- 4 - Электродная проволока
- 5 - Сварочная дуга
- 6 - Сварной шов
- 7 - Сварочная ванна
- 8 - Основной металл
- 9 - Капли электродного металла
- 10 - Газовая защита

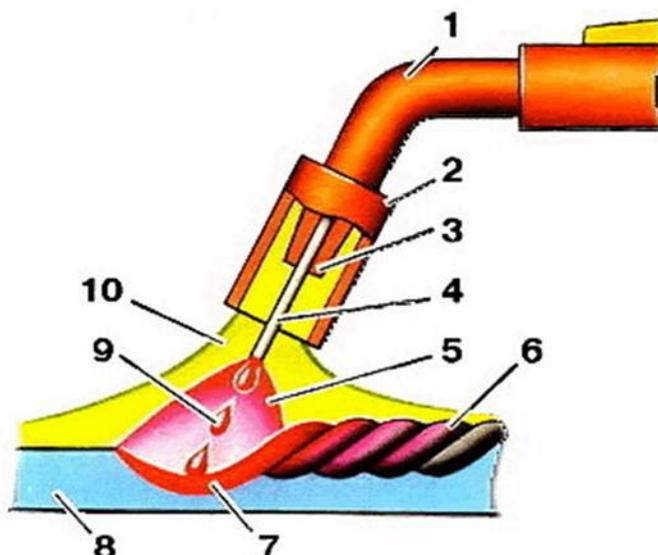


Рисунок 2.8 – схематичное описание Полуавтоматической сварки в среде защитного газа

Задача газа - это защита расплавленного и нагретого металлов от вредного воздействия окружающей среды. В большинстве своем используется углекислый газ или аргон. Данный вид сварки также весьма распространён, так как позволяет сваривать как черные, так и цветные металлы. Причем можно варить, как тонкий (0,5 мм) листовый металл, так и ответственные металлоконструкции из металла толщиной 30мм во всех пространственных положениях. Размеры полуавтоматов (рисунок 2.9) варьируются от их мощности, и сложности настройки.



Рисунок 2.9 – Полуавтомат для сварки металлов

Плюсы и минусы:

- хорошие условия работы сварщика;
- малая зона термического влияния и относительно небольшие деформации изделия в результате высокой степени концентрации дуги;
- возможность сварки во всех пространственных положениях;
- возможность сварки тонкого металла;
- возможность работы сварщика с более низкой квалификацией;
- высокое качество сварного шва;
- высокую оперативность работы.

Минусы:

- невысокая мобильность из-за баллона с газом (решается использованием проволоки, содержащей в своем составе флюс).

Газовая сварка. Сварка плавлением с применением смеси кислорода и горючего газа (Пропана, бутана, ацетилена, МАФ и др.). Факелом горелки расплавляется свариваемый металл и в полученную ванну добавляется сварочная присадка (рисунок 2.10).

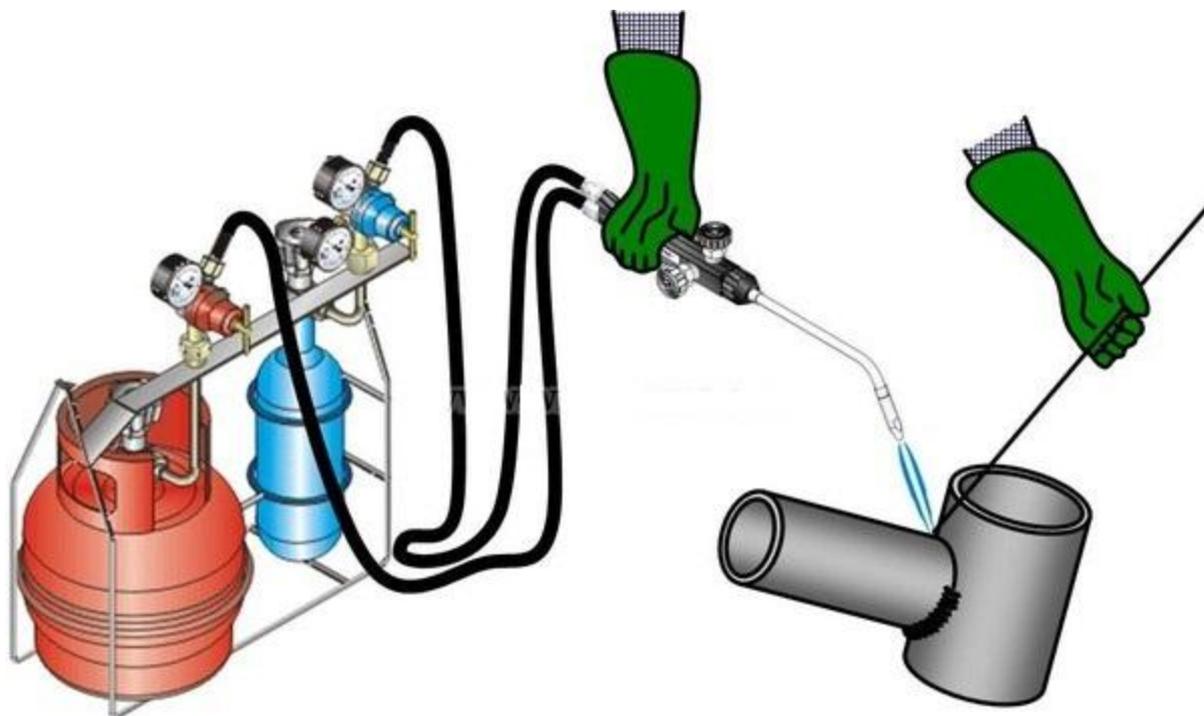


Рисунок 2.10 – Газовая сварка

Газовая сварка характеризуется плавным и медленным нагревом металла, что обуславливает основные области его применения для сварки:

- стали толщиной 0,2—5 мм (с увеличением толщины металла, в связи с медленным нагревом, снижается производительность)
- цветные металлы
- инструментальные стали, требующие постепенного мягкого нагрева и замедленного охлаждения
- чугун и некоторые специальные стали, требующие подогрева при сварке

Также применяется в ремонтных работах, твердой пайке и некоторых видах наплавочных работ. Отлично позволяет варить трубы в условиях стесненного пространства и тонкие детали.

Плюсы и минусы:

- Простота сварочного процесса;
- Возможность варить во всех пространственных положениях;
- Сварка тонкого металла;
- Сварка и пайка цветных металлов;
- Полная автономность.

Минусы сварки газом:

- Очень низкая производительность;
- Высокий нагрев свариваемой детали;
- Дороговизна использования;
- Довольно низкая мобильность.

TIG - Tungsten Inert Gas - ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа. Электрод чаще всего изготовлен из вольфрама с различными добавками, в зависимости от свариваемого металла. Сварка TIG ac/dc легко соединяет углеродистые, конструкционные, нержавеющей стали, детали алюминия и его сплавы с титаном, никелем, медью, латунью, кремнистых бронз, сплавы нержавеющей стали и других самых разнообразных металлов (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Швы, получаемые в результате TIG

TIG обладает наиболее широким спектром возможностей из всех видов сварки. Процесс сварки: Вольфрамовый электрод закрепляется в токопроводящем устройстве специальной горелки, к которой по шлангам подводится токоведущий провод и защитный инертный газ. Истекающая из сопла горелки струя аргона оттесняет воздух и надежно защищает электрод, дугу, сварочную ванну и околошовную зону от окисления и азотирования.

Таким образом, процесс осуществляется при струйной защите зоны сварки от контакта с воздухом. Если возникает необходимость в добавочном (присадочном) металле для заполнения шва (получения сварочного валика), то в дугу подается присадочная проволока, как правило, того же или близкого состава, что и свариваемый металл. Присадочная проволока, как правило, подается вручную, так же как при газовой сварке (рисунок 2.12).

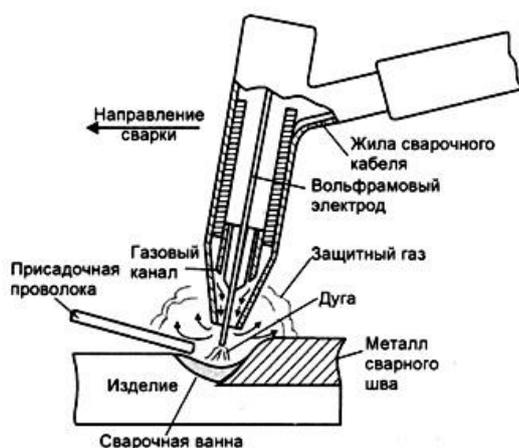


Рисунок 2.12 – Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа

Плюсы сварки неплавящимся электродом:

- Выполнение очень тонких сварочных работ;
- Отсутствие брызг расплавленного металла;
- Хорошие условия труда;
- Эстетика швов;
- Лучшая сварка алюминия и нержавеющей стали;
- Сварка очень тонких деталей.

Минусы сварки TIG:

- Требования к опыту сварщика;
- Довольно дорогое оборудование;
- Низкая мобильность;
- Нужна тщательная подготовка свариваемых поверхностей.

Таким образом, были рассмотрены самые распространённые виды сварки, охватывающие весь спектр сваривания различных металлов и разных групп свариваемости.

2.5 Возникновение деформаций и напряжений в процессе сварки, методы их устранения

Напряжением – является сила, отнесенная к единице прочности поперечного сечения детали. В зависимости от направления (продольного, поперечного) (рисунок 2.13), действующих усилий могут возникать напряжения растяжения, сжатия, изгиба срезу и кручения. Эти силы достигают таких величин, что в процессе эксплуатации напряжения и деформации в отдельных деталях приводят к разрушению всей конструкции. Кроме этого, происходит снижение антикоррозионных свойств, меняются геометрические размеры и жесткость конструкции. Напряжение, приводящее к разрушению, является пределом усталости.

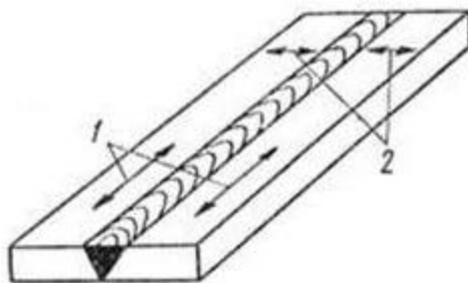


Рисунок 2.13 – Направление напряжений: 1 - продольные; 2 - поперечные

Главные причины возникновения напряжений

- неоднородный нагрев металлических заготовок (рисунок 2.14);
- усадочные изменения сплава в сварном шве;
- фазовые изменения, возникающие при переходе расплавленного металла из одного состояния в другое (рисунок 2.15).

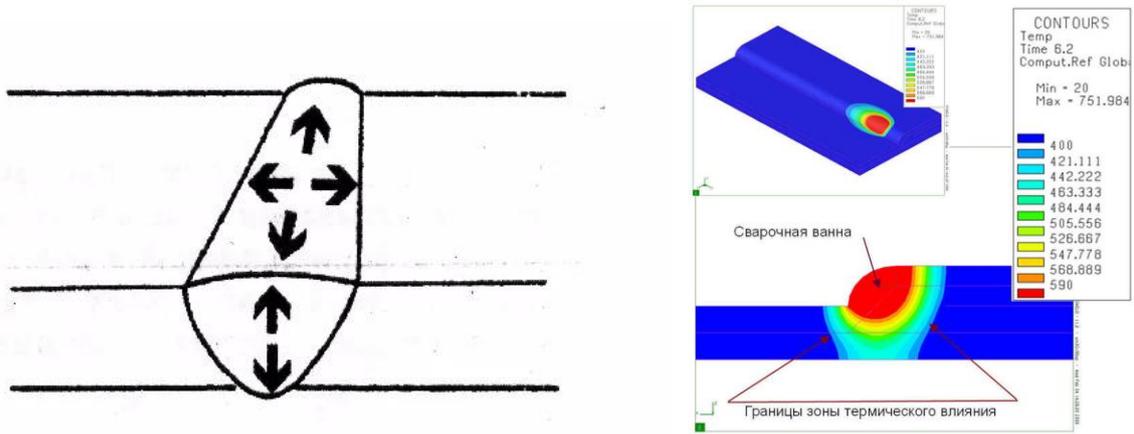


Рисунок 2.14 – Схема распространения нагрева металла в сварочной ванне и смоделированный процесс отображающий температуру в области шва

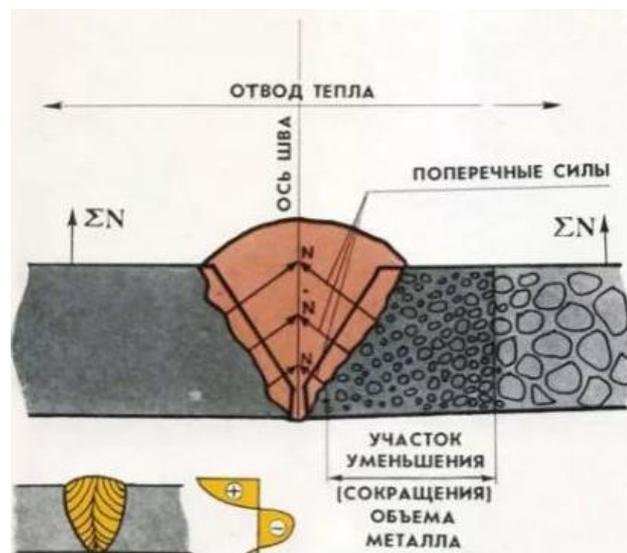


Рисунок 2.15 – Фазовые превращения сталей и других сплавов в зоне термического влияния

Напряжения устраняют отжигом или механическими методами. Отжиг является самым эффективным методом снятия напряжений (рисунки 2.16 – 2.17).

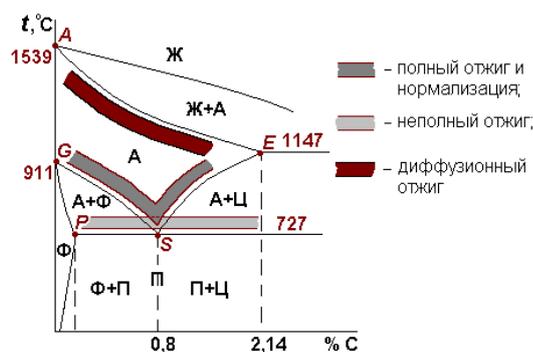


Рисунок 2.16 – График зависимости состояния углерода от температуры для отжига



Рисунок 2.17 график зависимости термообработки от времени

Его применяют, когда к изделию предъявляются повышенные требования к точности геометрических размеров. Он может быть общим или местным. Чаще всего отжиг производят при 550-680 °С. Выделяют три его стадии: нагрев, выдержка, остывание. Из механических способов устранения напряжений применяют проковку, прокатку, вибрацию, обработку взрывом, приводящие к пластической деформации обратного знака. Проковку делают пневмомолотом, а виброобработку специальным устройством, вызывающим вибрацию изделия с резонансной частотой в пределах 10-120 Гц в течение нескольких минут.

Деформации. Одним из свойств металлов является их способность расширяться при повышении температуры и сжиматься при охлаждении. При плавлении в области сварочного соединения появляется неоднородная

термозона. Она вызывает напряжения сжимающего или растягивающего свойства. Если эти напряжения превышают предел текучести металла, то происходит изменение формы изделия, возникают остаточные деформации. Разновидности деформаций зависят от того, в каких объемах они проявляются. Выделяют три рода. Деформации первого рода действуют в макрообъемах, деформации второго рода происходят в пределах кристаллических зерен, а третьего рода происходят в кристаллической решетке металла. Деформации и напряжения при сварке возникают и при кристаллизации сварного шва, когда происходит усадка жидкого металла. Объем остывающего жидкого металла уменьшается, это вызывает напряжения внутри металла. Параллельно и перпендикулярно оси сварочного шва формируются напряжения, которые вызывают изменение формы изделия. Продольные силы вызывают изменения длины сварного шва, а поперечные приводят к угловым деформациям.

Для предупреждения вредных воздействий сварочных деформаций необходимо соблюдать следующие правила и провести несколько мероприятий:

1. сварных швов должно быть минимум, и они должны быть как можно короче;
2. количество пересекающихся и разнотолщинных швов так же сводят к минимуму;
3. сварочные соединения делают с плавным переходом толщин;
4. металл наплавляют в минимальном количестве;
5. в самых напряженных местах конструкции швы вовсе не делают;
6. оставляют припуск на усадку.

Необходимо правильно выбирать способ сварки, который зависит от свариваемости материалов, энергии и режима. Чтобы уменьшить зону прогрева, нужно увеличить скорость сваривания. Для увеличения глубины сварки (прогрев в толщину) необходимо увеличить силу тока. Для уменьшения вредных воздействий нагрева в зоне сваривания сварщику необходимо по возможности избегать прихваток. Положительный результат дает использование зажимов и других сварочных приспособлений (рисунок 2.18).

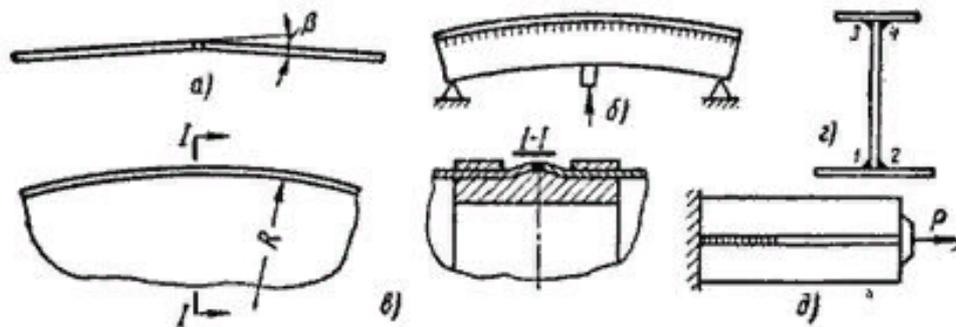


Рисунок 2.18 – Примеры использования способов, уменьшающих сварочные деформации: а - взаимное расположение с учетом последующей усадки; б, в - создание деформаций обратных сварочным; г - рациональная последовательность укладки швов; д - нагружение сварного соединения растягивающими усилиями.

Они позволяют сохранить подвижность деталей при сварке в продольном направлении и препятствовать угловому перемещению. Заготовки располагают таким образом, чтобы возникающие при остывании сварочные деформации были противоположны напряжениям. Последовательность наложения швов должна уравнивать возникающие напряжения. Накладывать швы надо так, чтобы свариваемые детали имели наибольшую подвижность. В процессе сварки проводят проковку сварного шва, что деформирует остывающее сварное соединение и уменьшает воздействие усадки.

Сварочные деформации могут проходить в плоскости и с выведением из плоскости. О деформациях в плоскости говорят, когда изменяются геометрические размеры конструкции. Деформация из плоскости соответствует угловым изменениям детали, искривлению листовой поверхности. Для устранения таких явлений применяют термическую правку с местным или общим нагревом, холодную механическую и термомеханическую. Термический способ с местным нагревом основывается на том, что при охлаждении металл сжимается. Для устранения сварочных деформаций растянутую часть изделия сначала нагревают (горелкой или дугой), при этом окружающий сплав остается

холодным и не дает горячему участку сильно расширяться. При остывании изделие выпрямляется. Так правят балки, листовые полосы и некоторые другие детали. Если происходит полный отжиг, то конструкцию закрепляют в устройстве, создающем давление на требуемые зоны, и помещают в печь для нагрева. Холодную правку делают, используя постоянные нагрузки. Для этого применяют различные прессы или валки для прокатки длинномерных изделий типа труб или двутавровых балок, в необходимых местах они деформируются. Термомеханическую правку производят с применением силовой нагрузки при местном нагреве изделия. Такой способ применяют к сильно растянутым деталям. Вначале собирают излишек металла в так называемые купола, а затем прогревают эти участки.

Технологию правки выбирают в зависимости от особенностей сварочной деформации и типа металлического изделия, его размеров, конфигурации. Обращают внимание также и на затраты, останавливаясь на самом эффективном методе.

2.6 Выводы по второй главе

На данном этапе исследования было установлено, что основные методы проектирования сварных конструкций, основаны на физических расчетах прочности, ручного определения параметров конструкции, подбора разделок кромок швов, выбора метода и режимов сварки.

Конкретизируя основную цель разработки методики проектирования сварной конструкции при помощи NX Weld Assistant и расчета модели в NX Nastran, можно сказать, что разработанной методикой значительно повысится качество проектируемой сварной конструкции, за счет наличия вспомогательных баз (материалов, сварных швов, документации).

Глава 3 Разработка 3D-модели сварной конструкции в NX Weld Assistant

3.1 Последовательность проведения построения сварной конструкции в NX Weld Assistant, создание деталей

Работа в NX начинается с запуска программы. Создается новый файл (рисунок 3.1): указывается путь сохранения файла (рисунок 3.1, поз. 1) и его имя (рисунок 3.1, поз. 2), а также единицы измерения – миллиметры.

Необходимо обратить внимание, что путь сохранения файла, а также его название не должны содержать символы кириллицы, для корректной работы приложения.

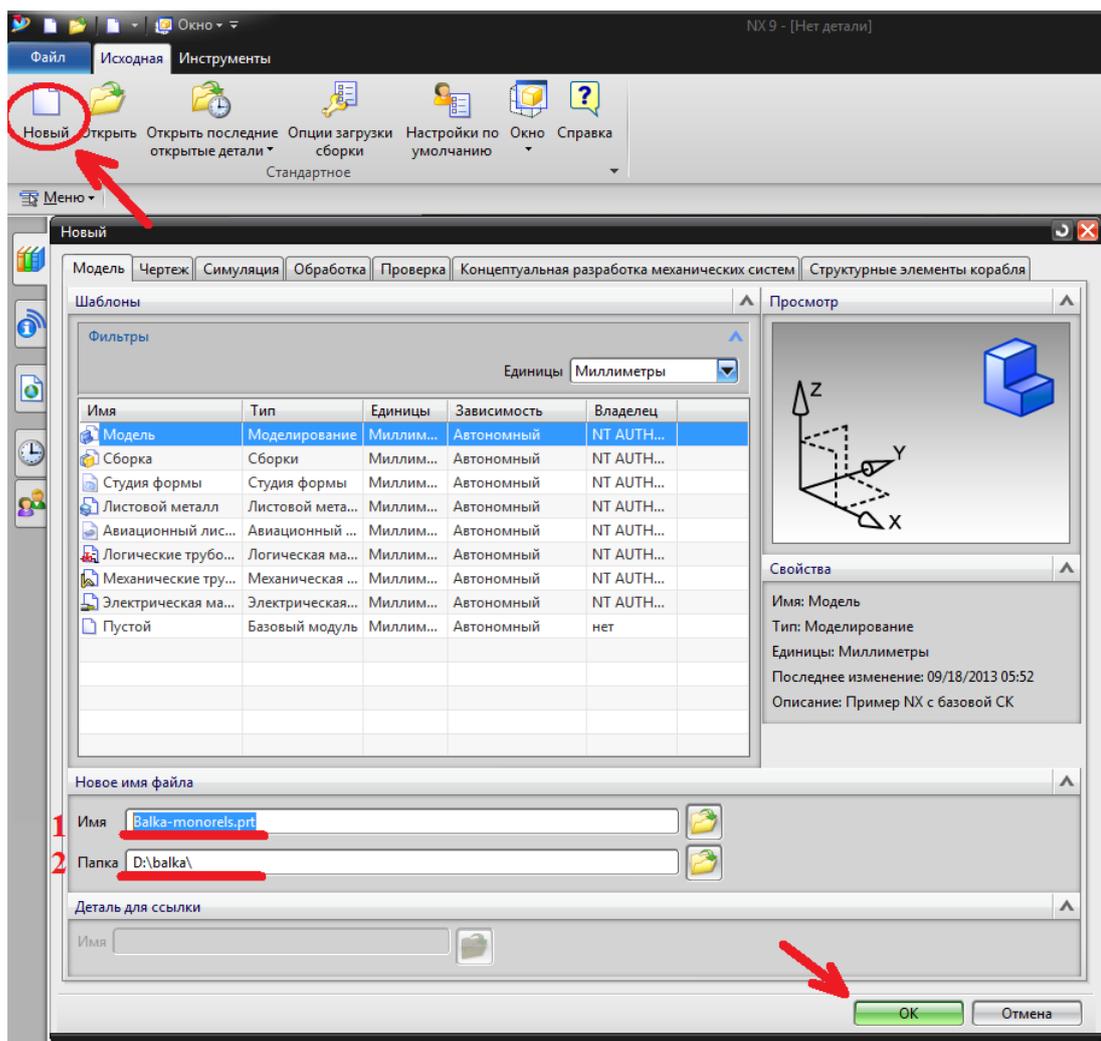


Рисунок 3.1 – Окно создания элемента

По умолчанию в программе будет запущено приложение «Моделирование» для создания САД-геометрии, однако если открыт другой модуль, выбирается приложение NX – моделирование, в котором содержатся инструменты для создания 3D-модели (рисунок 3.2).

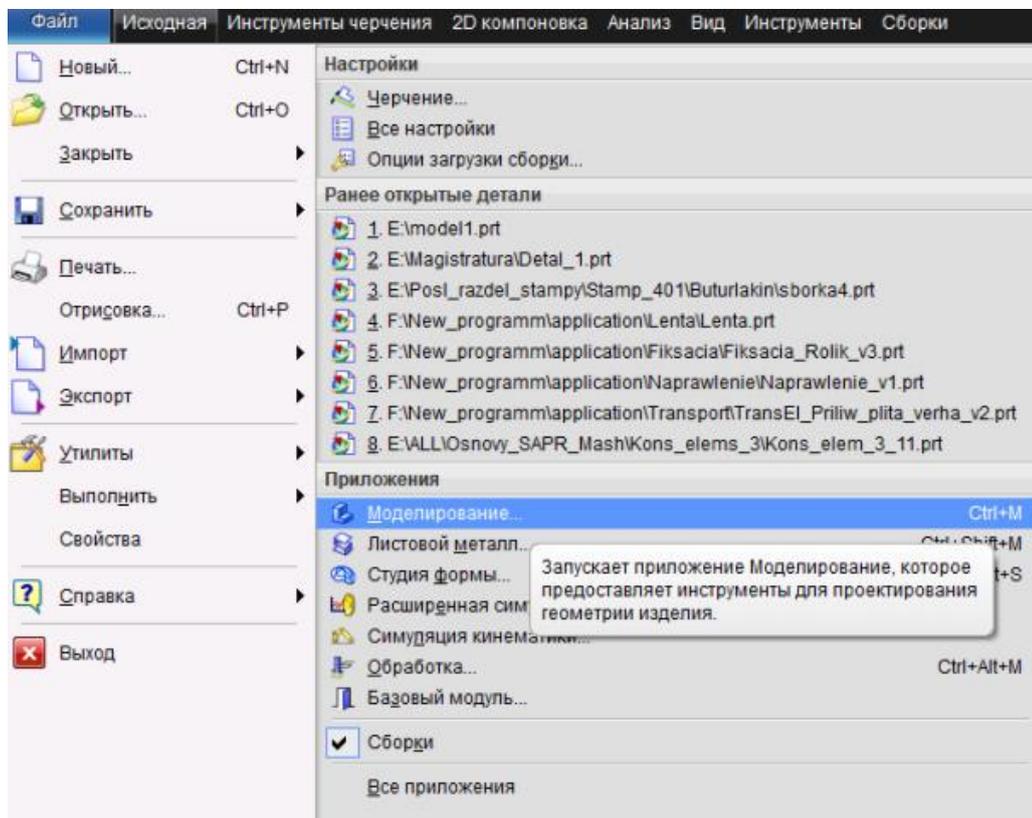


Рисунок 3.2 – Выбор приложения моделирования

Во вкладке «Исходная» выбирается функция «Эскиз» для доступа к инструментам построения 2D геометрии (рисунок 3.3).

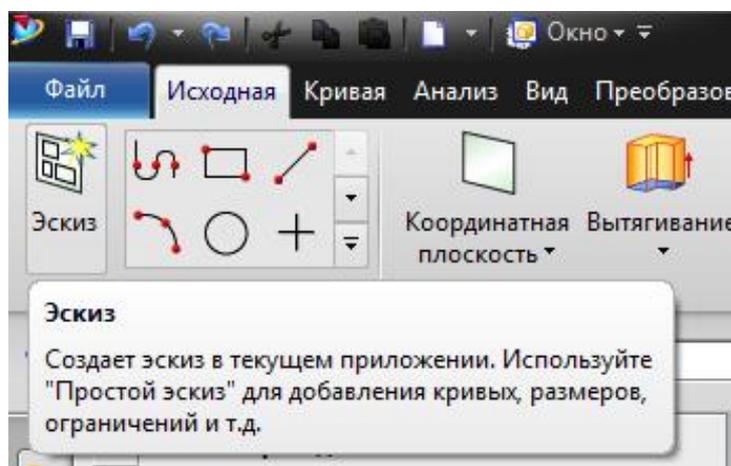


Рисунок 3.3 – Выбор опции «Эскиз»

В открывшемся диалоговом меню (рисунок 3.4) – выбираем рабочую плоскость эскиза, подтверждаем командой ОК.

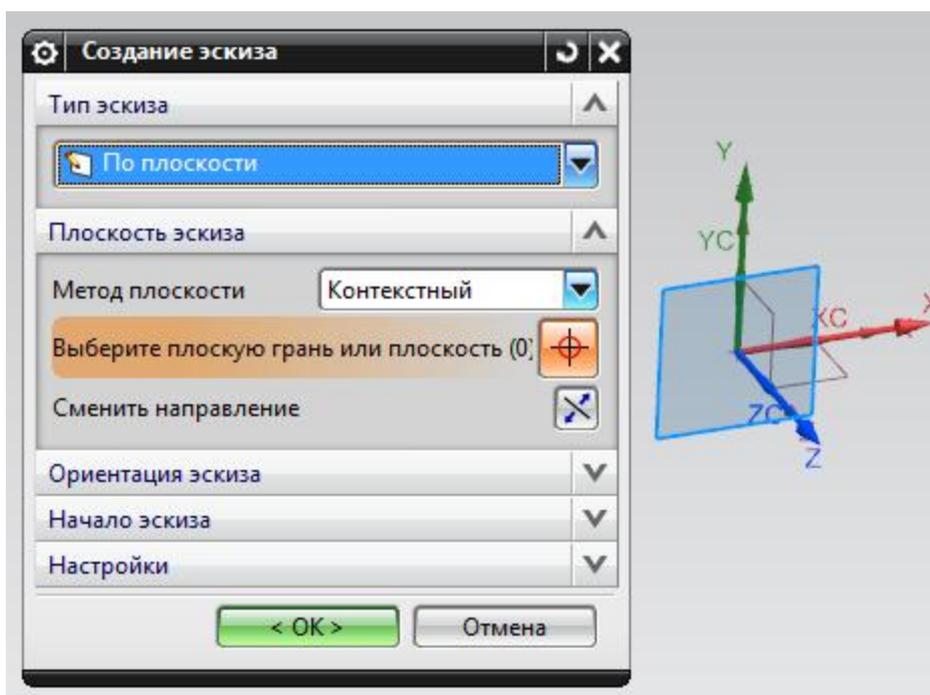


Рисунок 3.4 – Выбор плоскости эскиза

С помощью геометрических примитивов (рисунок 3.5) создаётся эскиз (рисунок 3.7) проектируемой детали по заданным размерам, метод ввода которых доступен для выбора (рисунок 3.6).

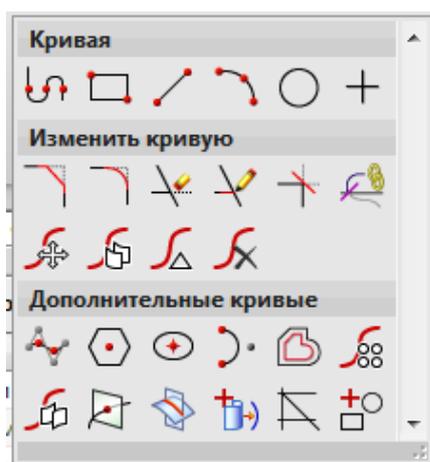


Рисунок 3.5 – Панель инструментов

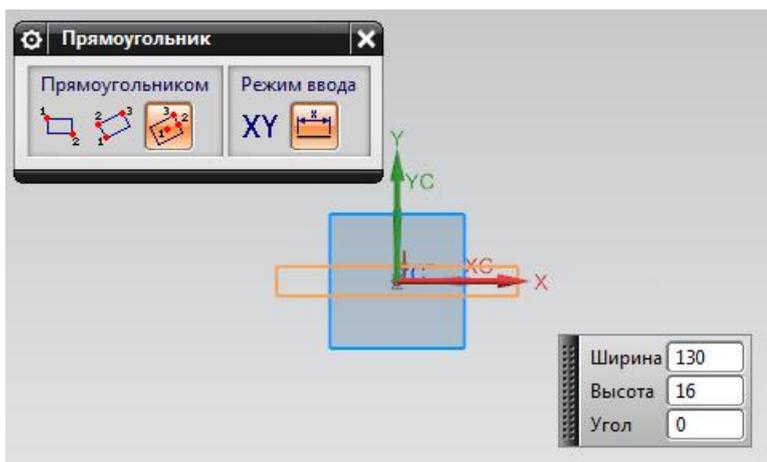


Рисунок 3.6 – Ввод параметров

Эскиз в таком случае является двумерным параметрическим телом, которое преобразуется в трёхмерное путём выдавливания, или вращения во круг оси.

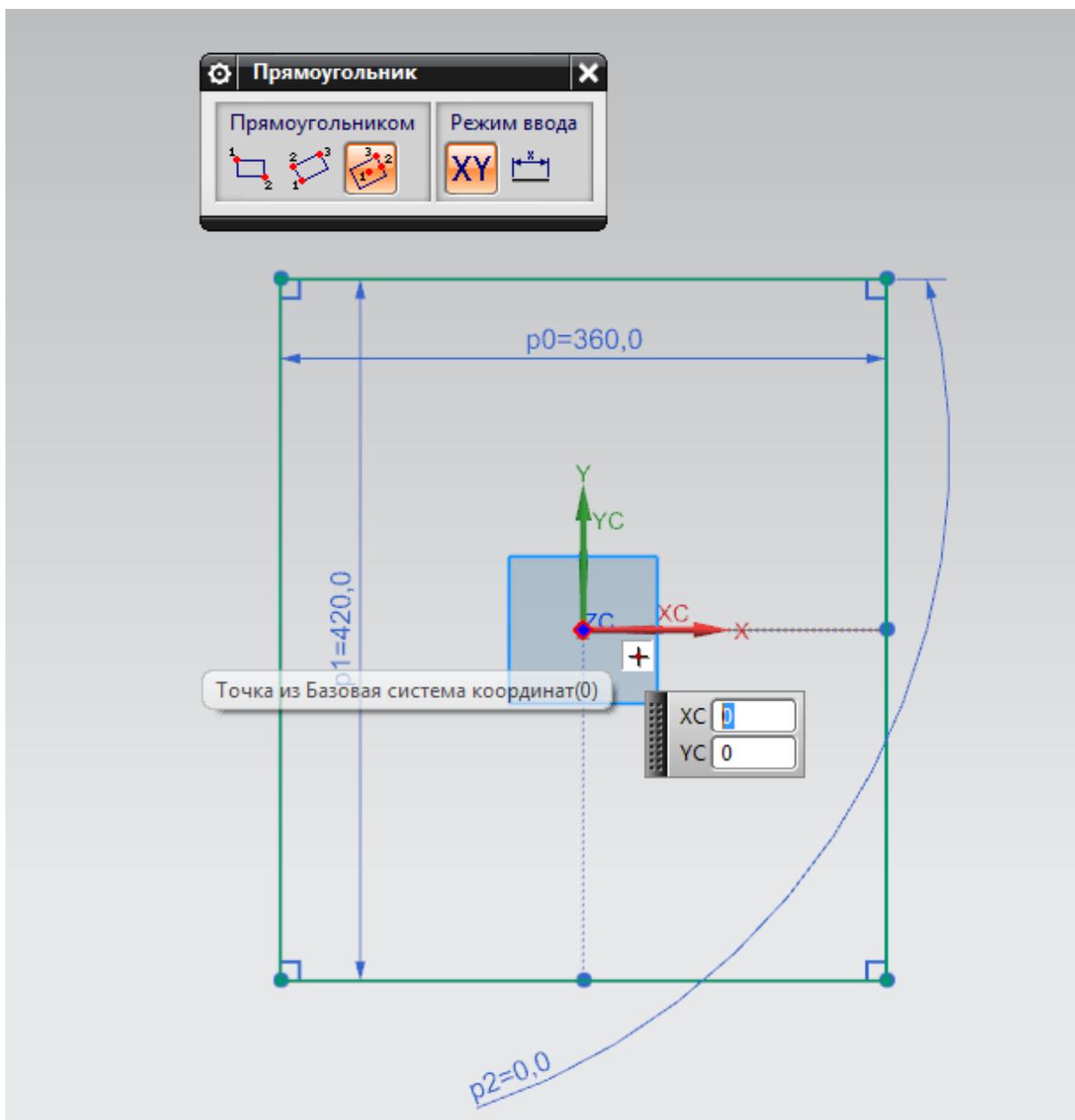


Рисунок 3.7 – Результат построения прямоугольника

При необходимости вносятся изменения в размеры, установленные программой, или с целью изменения параметров эскиза активируется диалоговое окно двойным щелчком левой кнопки мыши по размеру (рисунок 3.8).

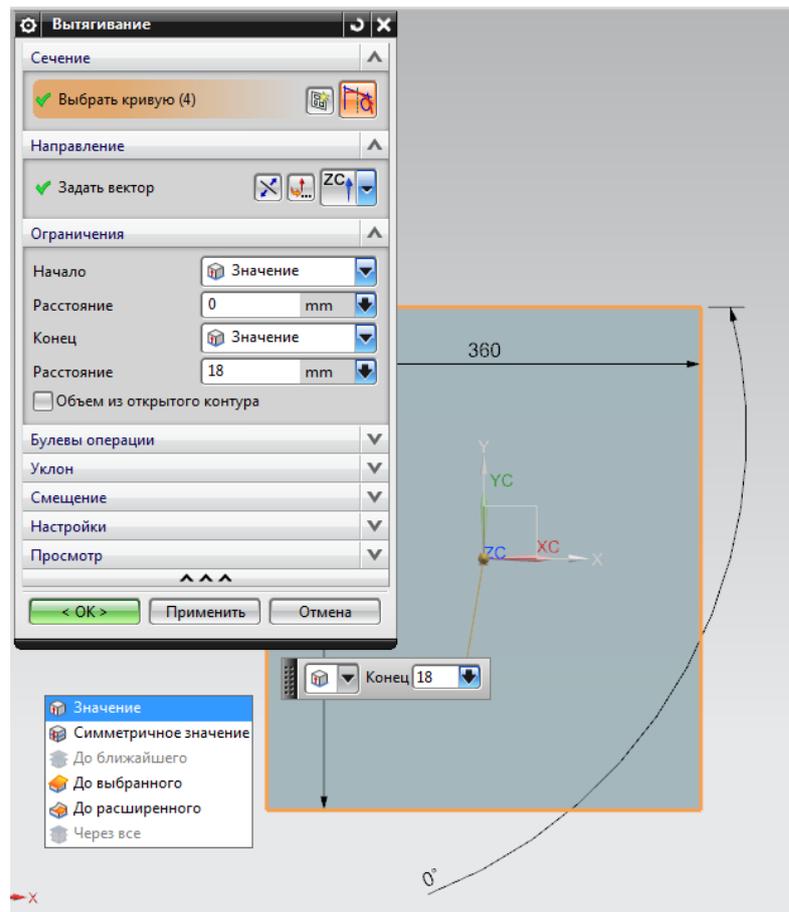


Рисунок 3.8 – Окно редактирования значений параметров размеров

Отключив опцию «Постоянное образмеривание» (рисунок 3.9), получаем доступ к удалению лишних размеров, проставленных программой, при наличии такой необходимости.

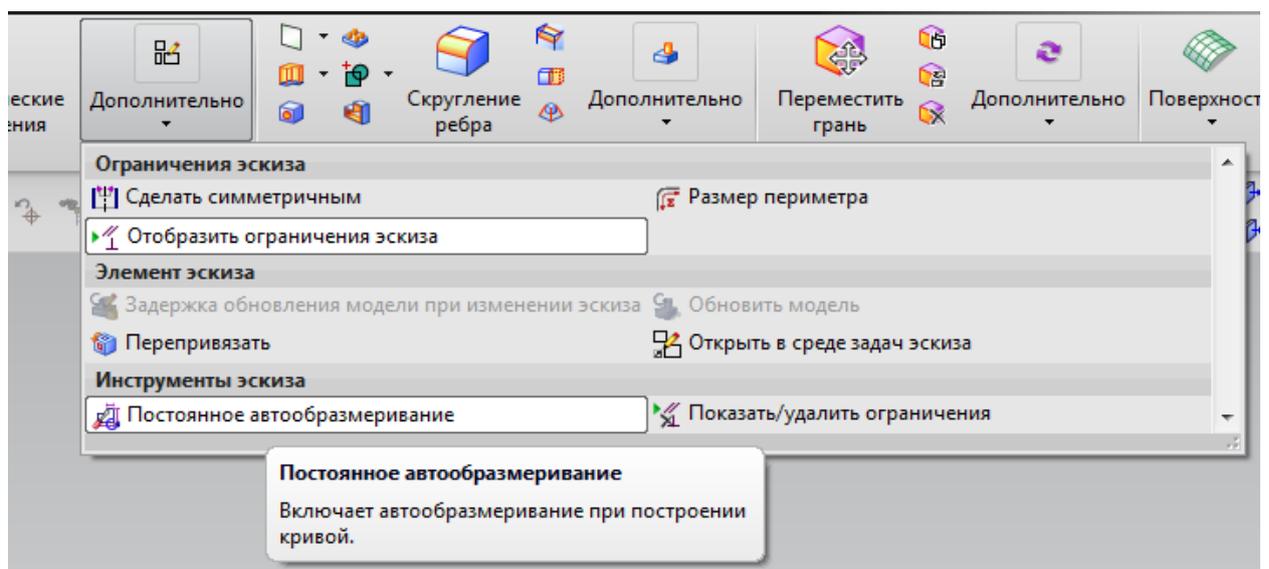


Рисунок 3.9 – Опция отключения постоянного автообразмеривания

При завершении работы в эскизе, выходим из него нажав кнопку «Закончить эскиз» (рисунок 3.10)

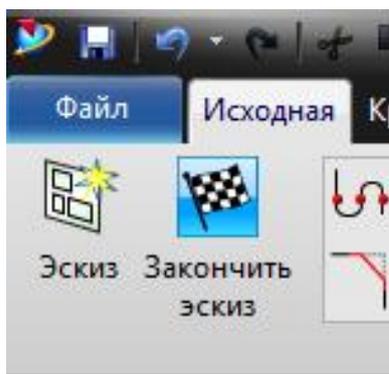


Рисунок 3.10 – Кнопка завершения эскиза

Для создания тела модели, вызываем функцию «Вытягивание» (рисунок 3.11), которая, опираясь на ранее созданный контур детали в эскизе, позволяет получить пространственную геометрию.

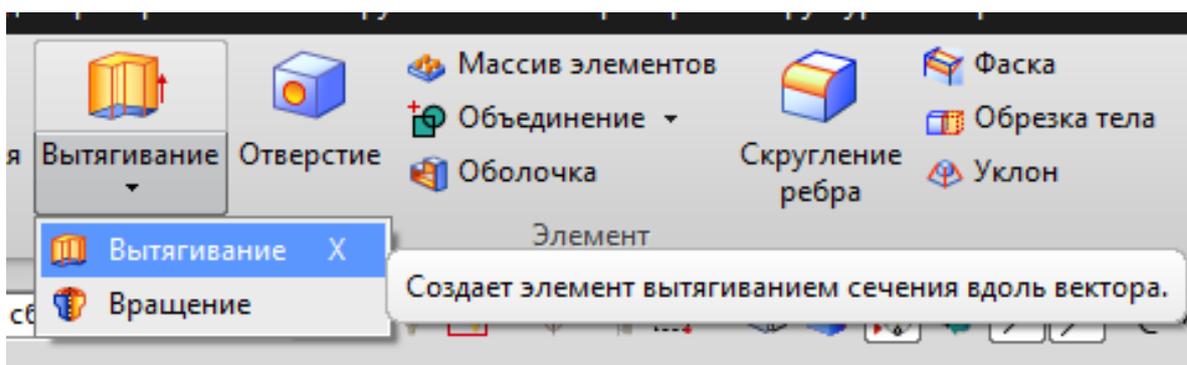


Рисунок 3.11 – Кнопка функции «Вытягивание»

В открывшемся окне диалога «Вытягивание» (рисунок 3.12), выбираем внешний контур эскиза с помощью функции «Выбрать кривую».

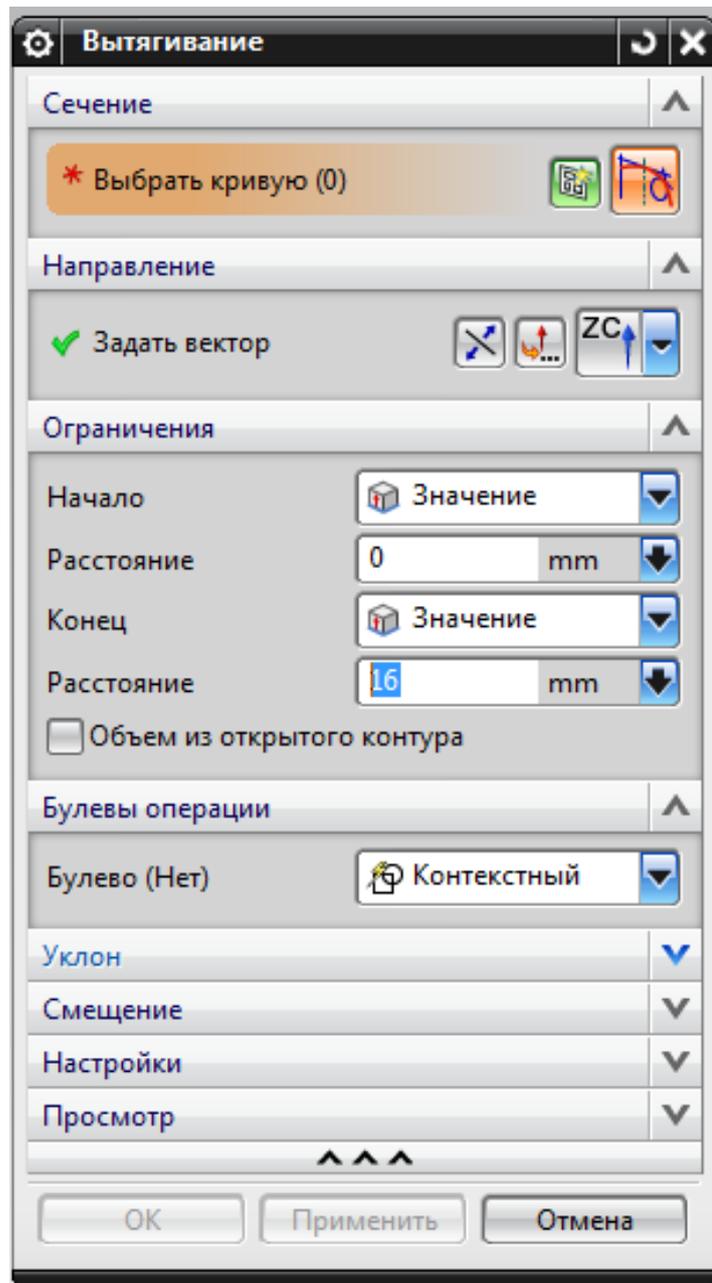


Рисунок 3.12 – Меню выбора опций для операции «Вытягивание»

В зависимости от того, в какой плоскости было создано тело, указываем ось вытягивания (в данном случае плоскость XOY , ось, следовательно, ZC)

Вытягивание будет осуществлено на расстояние, которое необходимо указать в поле ввода «Расстояние» (рисунок 3.12). Результат операции вытягивания представлен на рисунке 3.13.

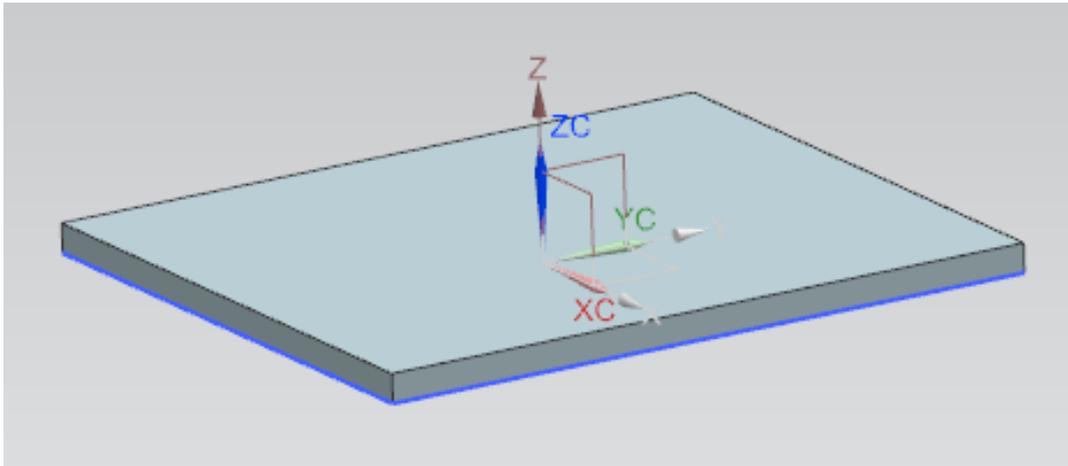


Рисунок 3.13 – Результат операции «Вытягивание»

Существует несколько методов построения пространственных моделей деталей – в зависимости от способа получения тела. Например, для тел вращения необходимо использовать опцию вращения эскиза (рисунок 3.14), а при построении, достаточно создания половины эскиза (рисунок 3.15).

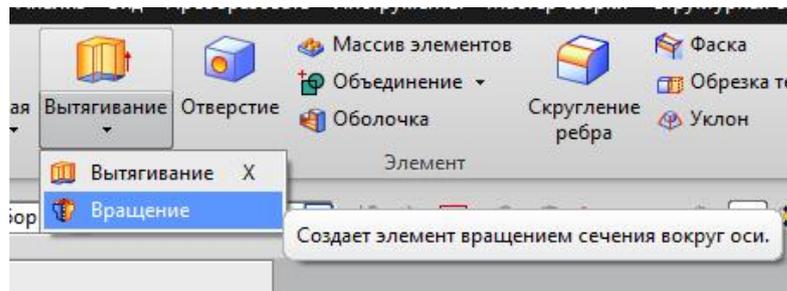


Рисунок 3.14 – Расположение кнопки «Вращение»

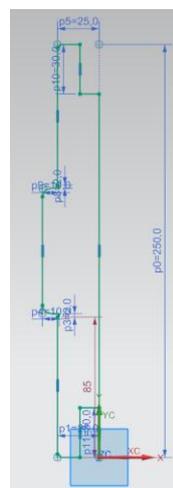


Рисунок 3.15 – Пример создания половины эскиза

В окне диалога функции вращения, необходимо выбрать контур эскиза – он подсветится зеленой отрисовкой, затем вектор относительно которого будет производиться вращение эскиза, и указывается точка центра вращения тела (рисунок 3.16).

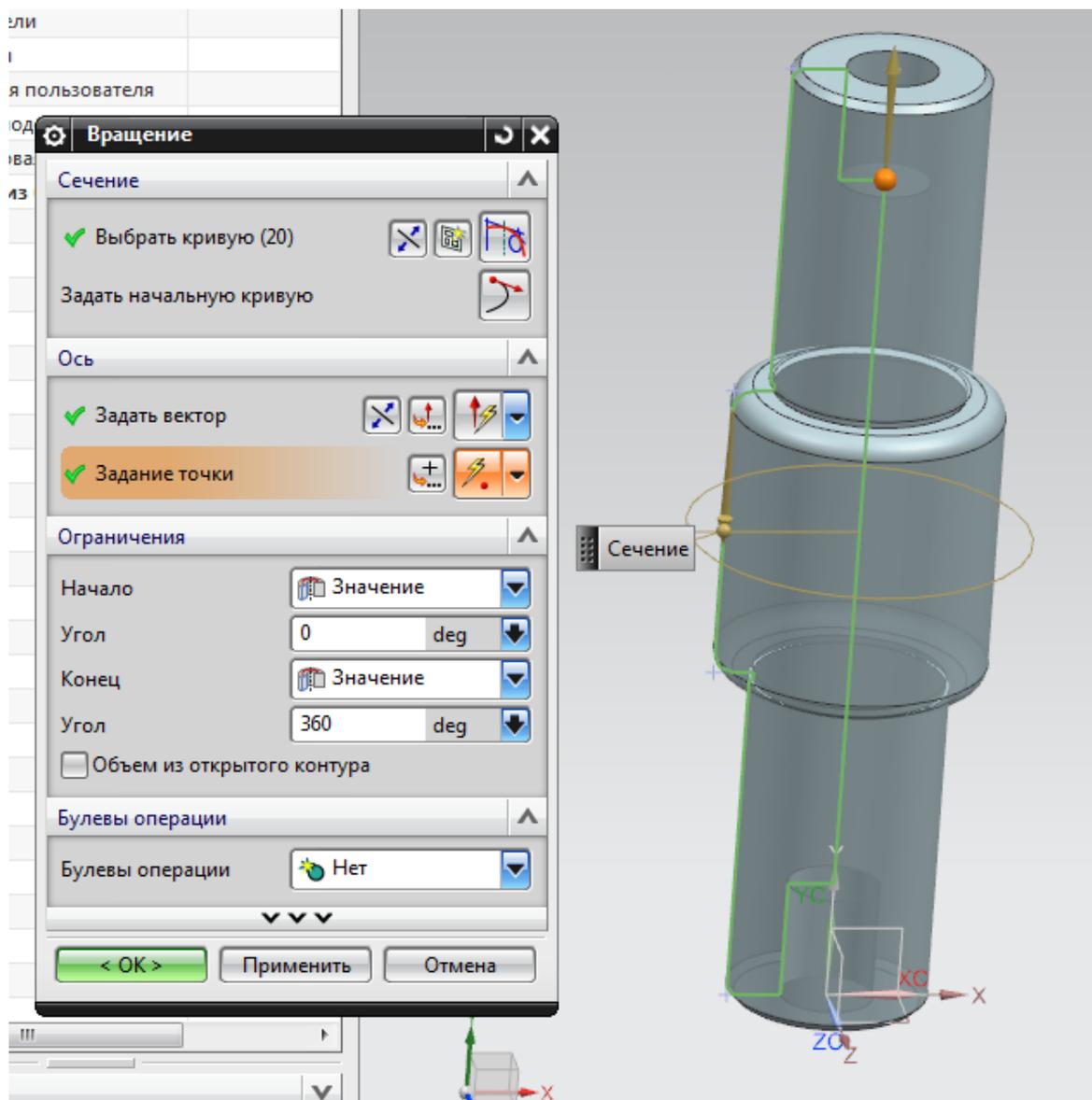


Рисунок 3.16 – Меню опции «Вращение»

Возможно создание трёхмерных тел из первичных строительных блоков – примитивов, которые в процессе работы претерпевают изменения геометрии инструментами типа: объединения; вычитания; пересечения блоков, обрезания, создания фасок и получения скруглений. А также есть возможность получать

трёхмерное тело через построение поверхностей, задавая при помощи специальной функции толщину таким поверхностям.

Для построения сборки сварной конструкции монорельса создадим модели двутавров, для этого воспользуемся «Библиотекой повторного использования», выбираем пункт 2D Section Library – Metric. Ищем во вкладке «Выбор элемента» необходимый профиль (рисунок 3.17).

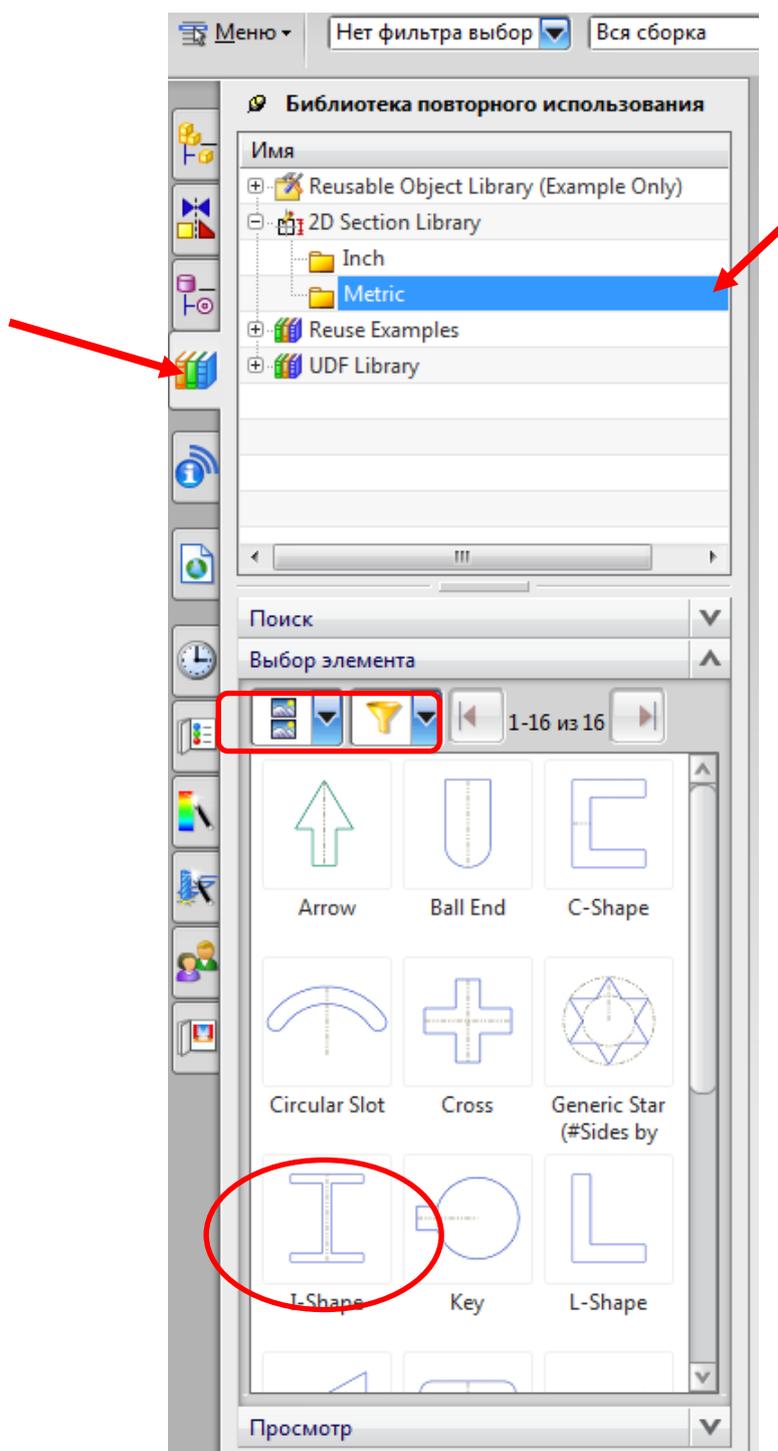


Рисунок 3.17 - «Библиотека повторного использования»

Двойным щелчком по профилю, открываем диалоговое меню вставки (рисунок 3.18)

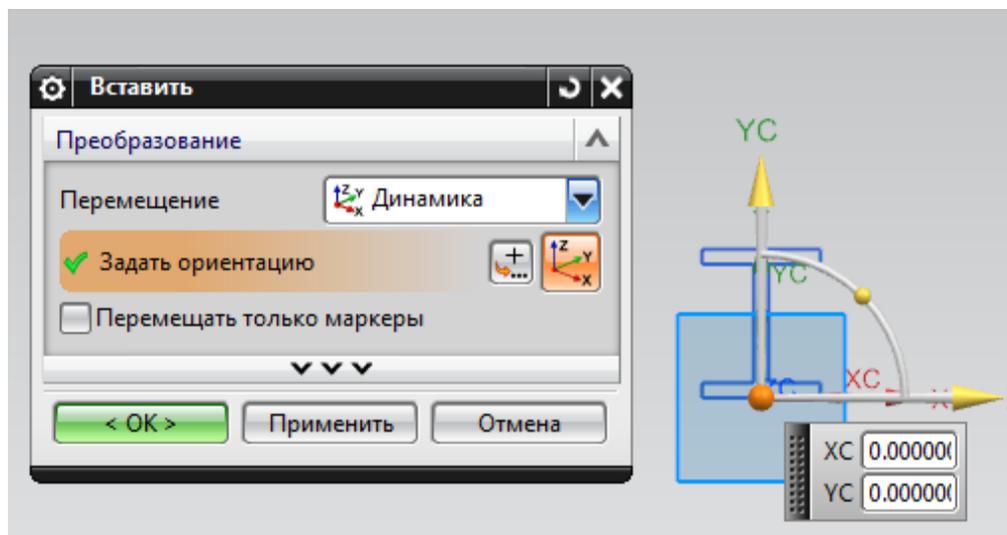


Рисунок 3.18 - Диалоговое меню вставки элемента из библиотеки

После вставки эскиза, настраиваем параметры двутавра, меняя значения размеров полок и ребра (рисунок 3.19).

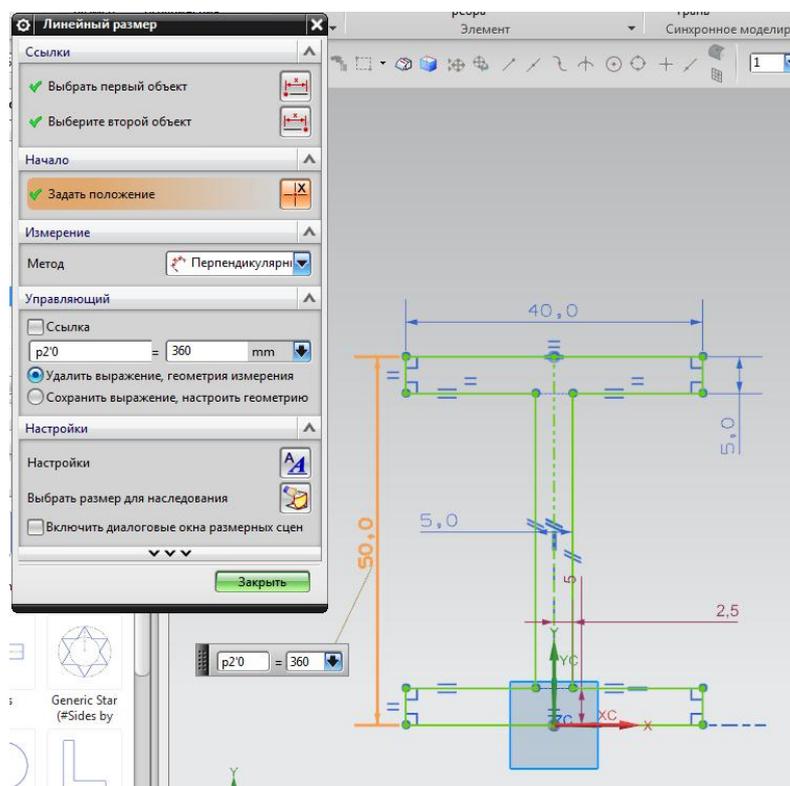


Рисунок 3.19 – Изменение значений параметров размеров

Назначив новые параметры получаем эскиз (рисунок 3.20), который завершаем, затем активируем функцию выдавливания профиля в трёхмерное тело (рисунок 3.21).

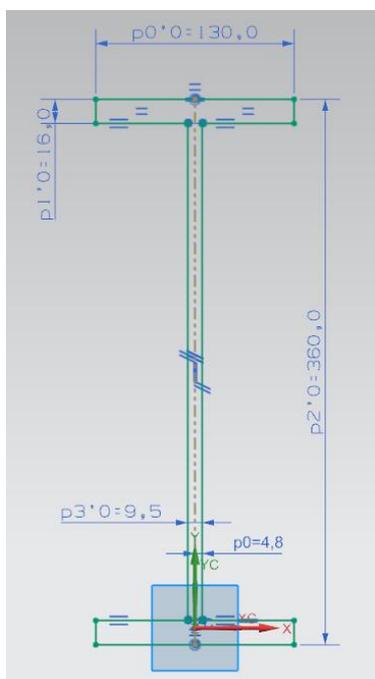


Рисунок 3.20 - Эскиз

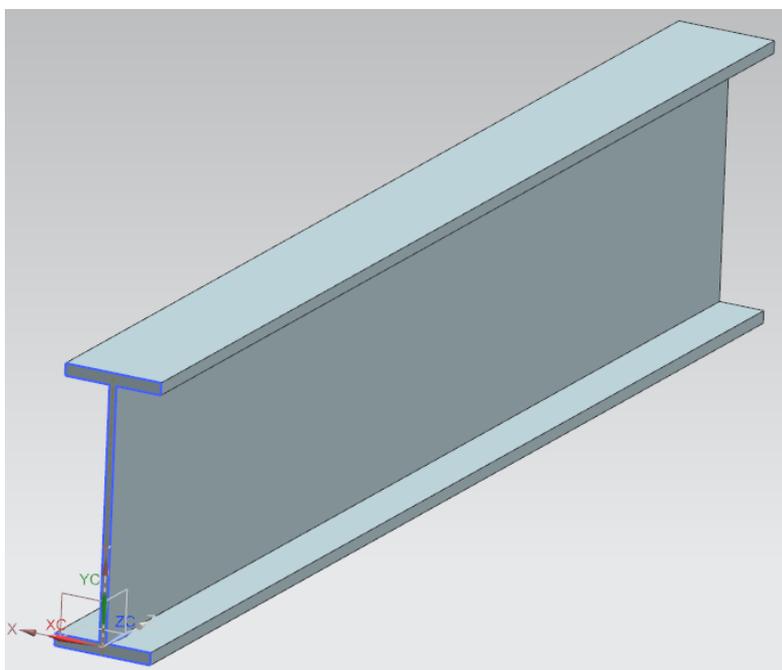


Рисунок 3.21 – Трёхмерное тело

Для получения модели профиля изогнутого по сложной траектории, создадим 2 эскиза в двух перпендикулярных плоскостях (рисунок 3.22).

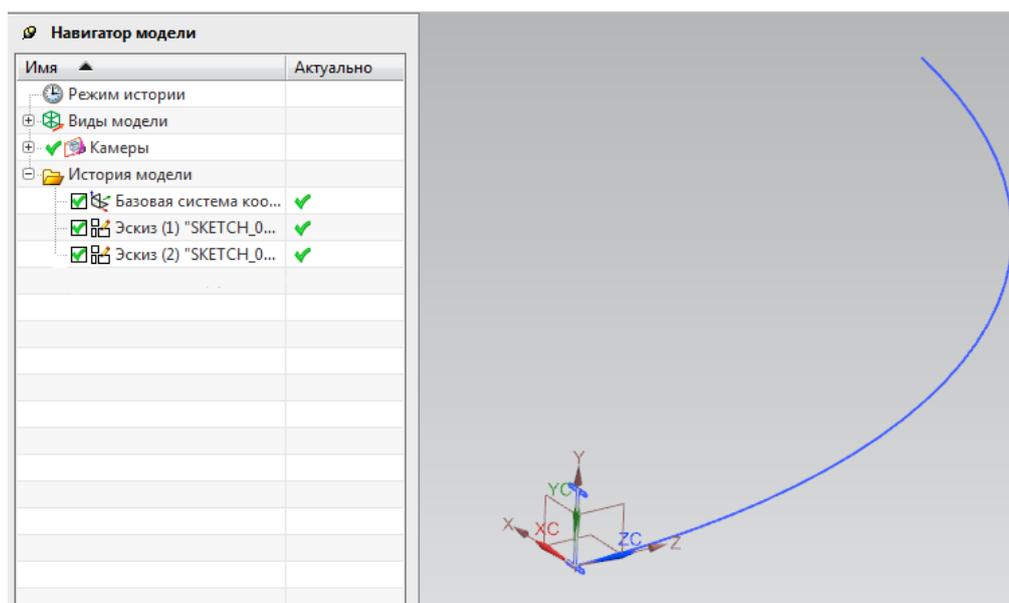


Рисунок 3.22 – Эскизы в перпендикулярных плоскостях

Далее воспользуемся функцией Заметание, расположенной во вкладке «Исходная» - «Поверхность» – «Заметание» (рисунок 3.23).

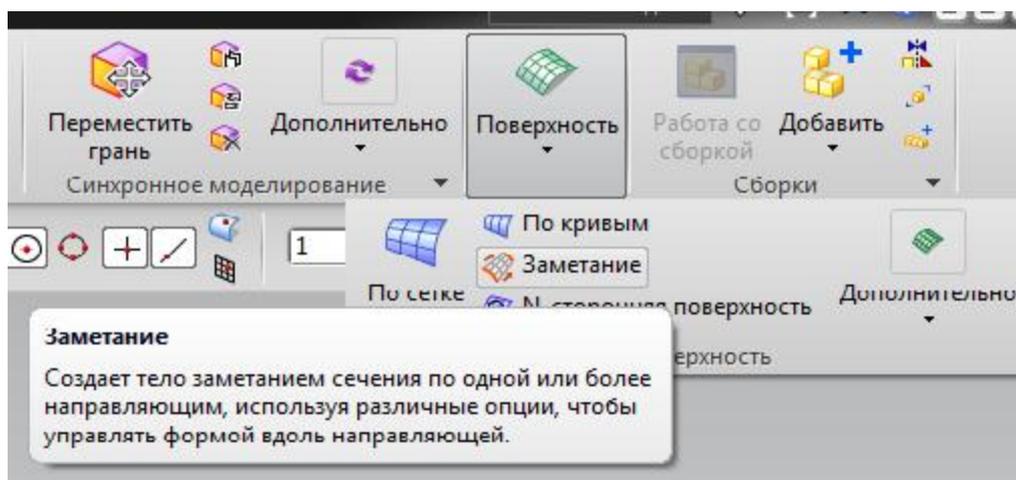


Рисунок 3.23 – Расположение опции «Заметание»

В открывшемся диалоговом окне выбираем взаимосвязанные кривые эскиза 1, содержащего геометрию профиля. Затем выбираем кривую, которая будет являться направляющей для операции и подтверждаем действие нажатием кнопки «ОК» (рисунок 3.24).

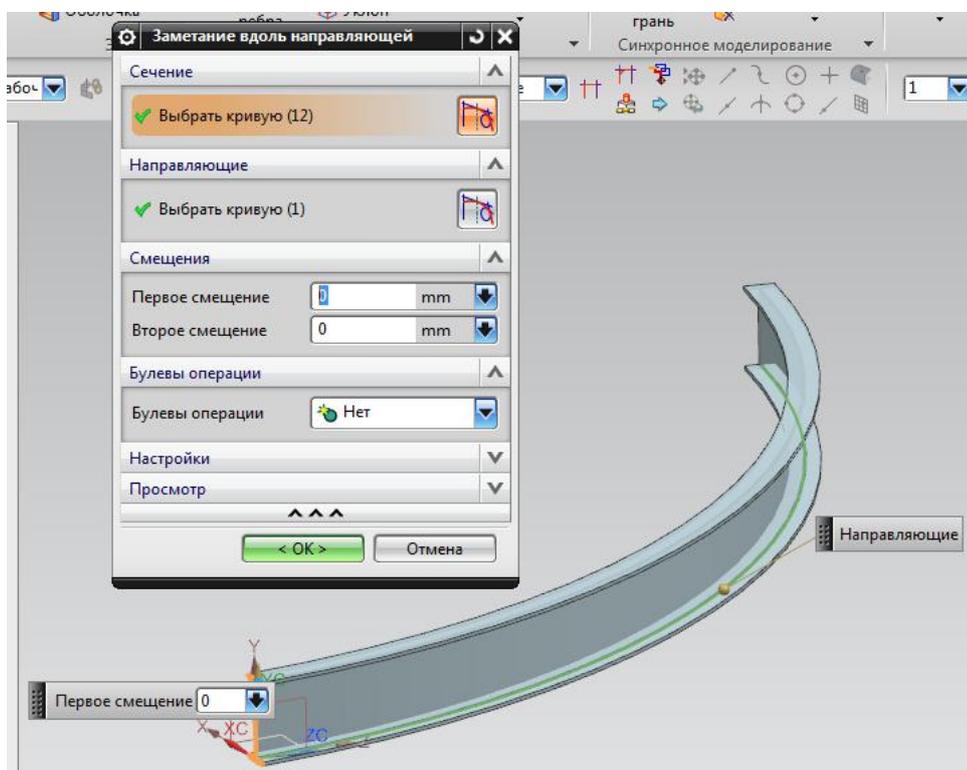


Рисунок 3.24 – Диалоговое меню опции «Заметание»

3.2 Объединение созданных деталей в сборке

В процессе создания сборок в NX следует выделить этапы работы:

- Определить состав сборки, добавить в сборку новые компоненты, или удалить некоторые добавленные ранее. Компоненты хранятся в виде ссылок на файлы моделей, которые можно найти в навигаторе сборки.

- Задать взаимное положение деталей в сборке через указание параметрических связей между их гранями, ребрами и вершинами.

Для объединения деталей в трёхмерную модель сборки, необходимо выбрать меню «Файл» – «Новый», в открывшемся окне выбрать «Сборка» и по аналогии с началом работы назначить директорию сохранения и название файла (рисунок 3.25).

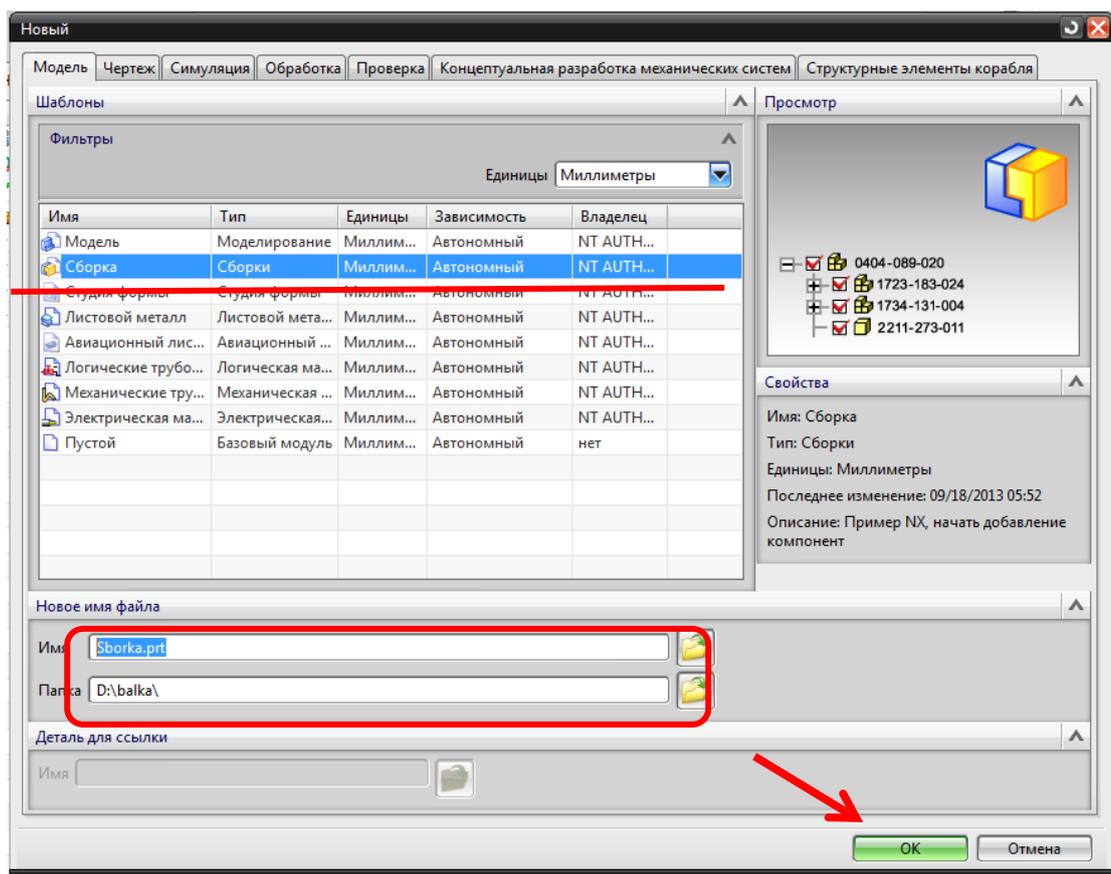


Рисунок 3.25 – Диалоговое меню создания файла сборки

При выборе модуля автоматически открывается диалоговое меню «Добавить компонент», в котором отображаются уже загруженные детали. При

необходимости загружается деталь, которая не предложена автоматически, используя кнопку «Открыть» и там выбираются необходимые модели из папок, в которых они хранятся (рисунок 3.26).

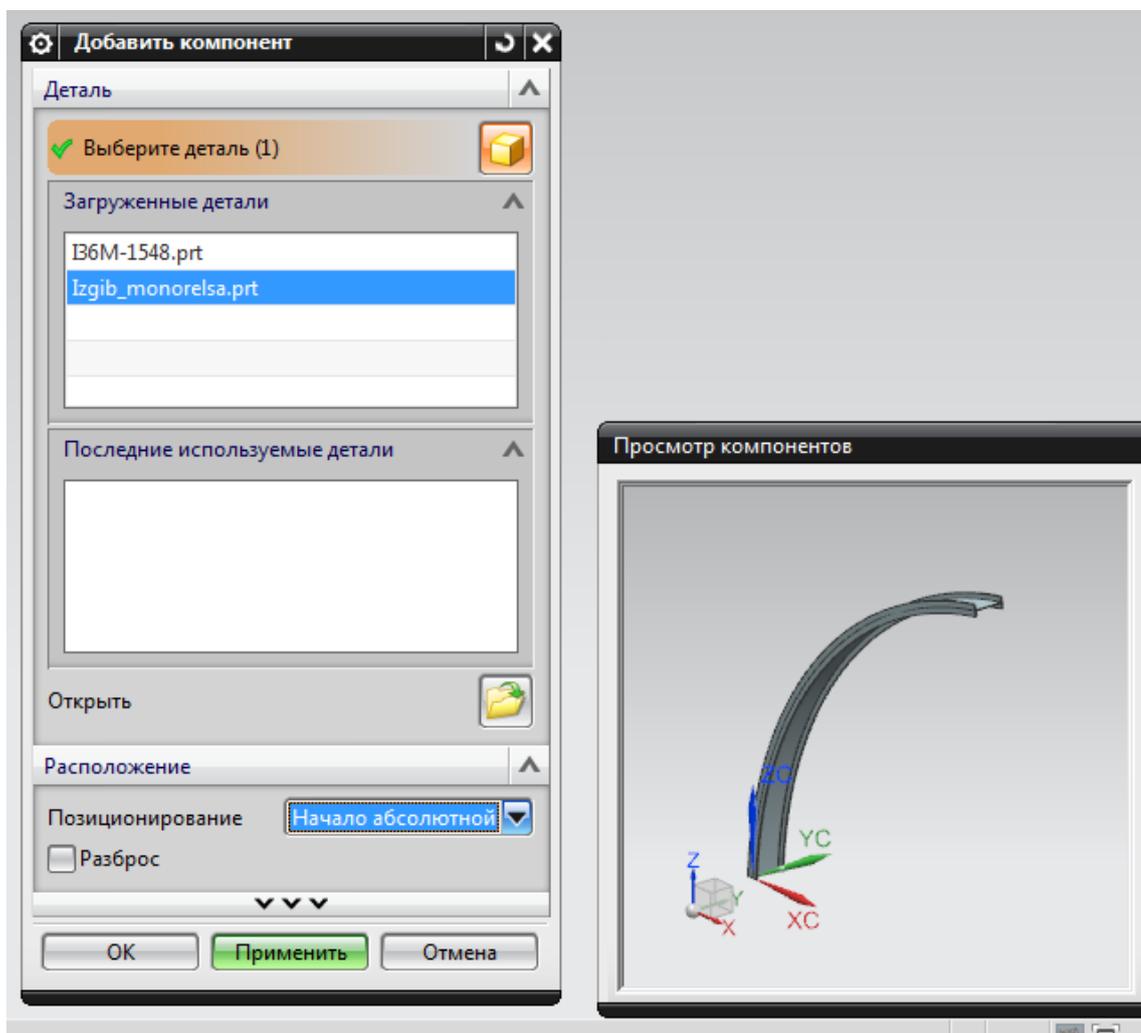


Рисунок 3.26 – Меню добавления деталей в сборку

Следующим действием необходимо определить позиционирование детали в поле «Расположение». Всего доступно 4 вида позиционирования (рисунок 3.27):

- Начало абсолютной системы координат;
- Выбрать начало;
- По сопряжениям;
- Перемещение.

Следует отметить, что возможно создание компонентов сборки непосредственно в самой сборке с последующим сохранением в виде отдельного файла.

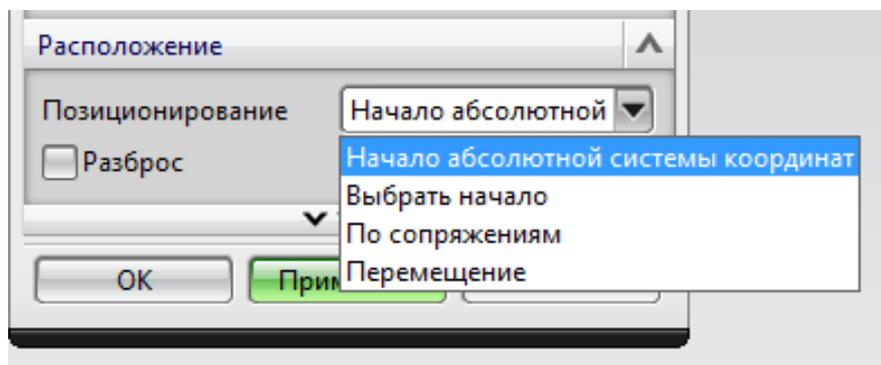


Рисунок 3.27 – Варианты позиционирования при расположении

Для добавления первой детали в сборку, достаточно выбрать - Начало абсолютной системы координат (рисунок 3.27), или - Выбрать начало – где задаются параметры точки.

Сопряжения устанавливать пока не с чем, поэтому зафиксируем положение, для этого выбираем опцию «Сопряжения сборки», «Тип» устанавливаем «Фиксация», выбираем объект, завершаем создание «ОК» (рисунок 3.28).

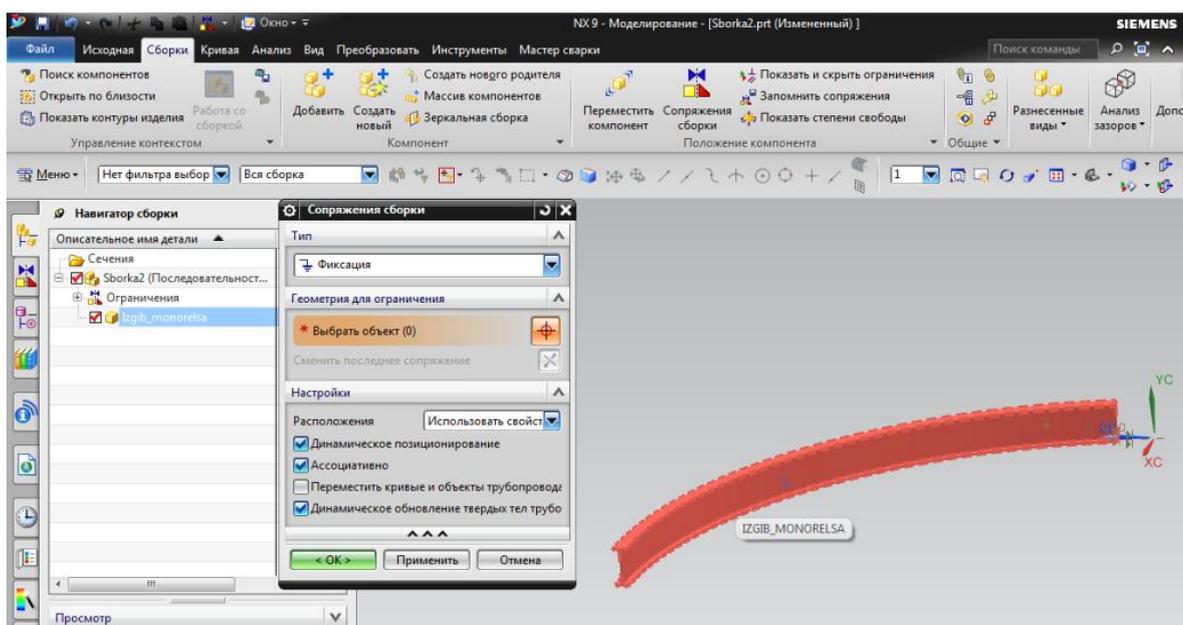


Рисунок 3.28 – Фиксация объекта сборки

После создания ограничения, посмотреть его, чтобы удалить или изменить, мы можем в «Навигаторе сопряжений» (рисунок 3.29).

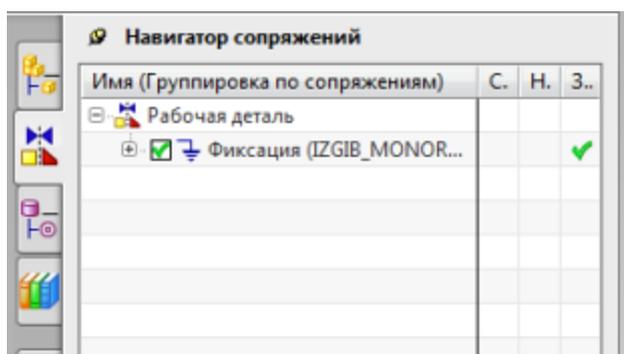


Рисунок 3.29 – Навигатор сопряжений

Далее аналогичным способом добавляем остальные компоненты сборки (рисунок 3.28), теперь в поле «Расположения» можно выбирать «По сопряжениям», так как, оставив вариант «Выбрать начало», все равно позднее придется устанавливать сопряжения.

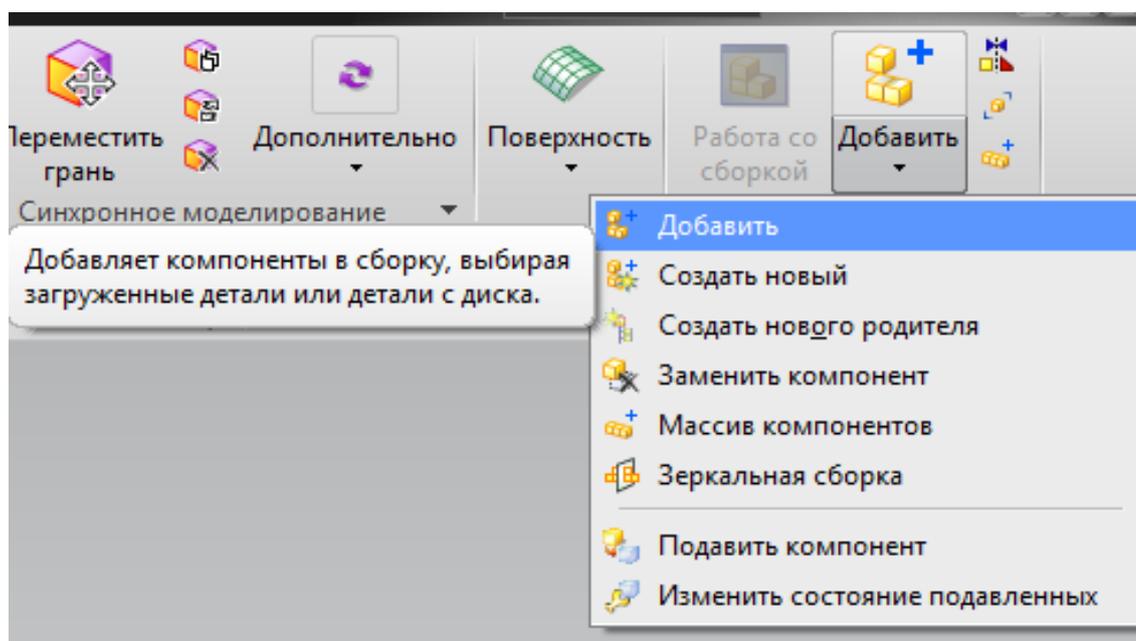


Рисунок 3.28 – Расположение кнопки опции добавления деталей в сборку

Элемент сборки можно создать прямо в сборке, для этого необходимо выбрать меню «Добавить», «Создать новый» (рисунок 3.29). В открывшемся меню выбираем «Создать модель» (рисунок 3.30).

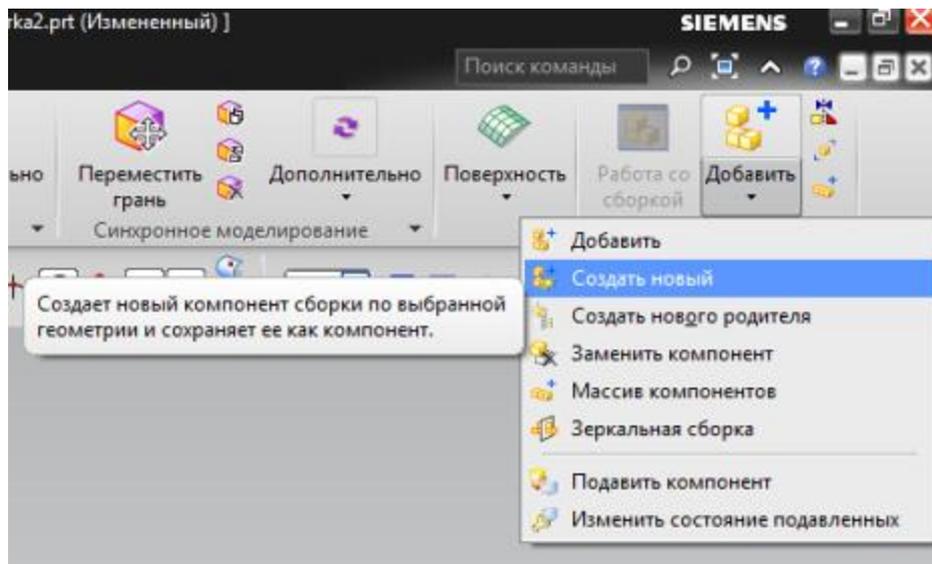


Рисунок 3.29 – Выбор функции «Создать новый» для создания новой детали сборки

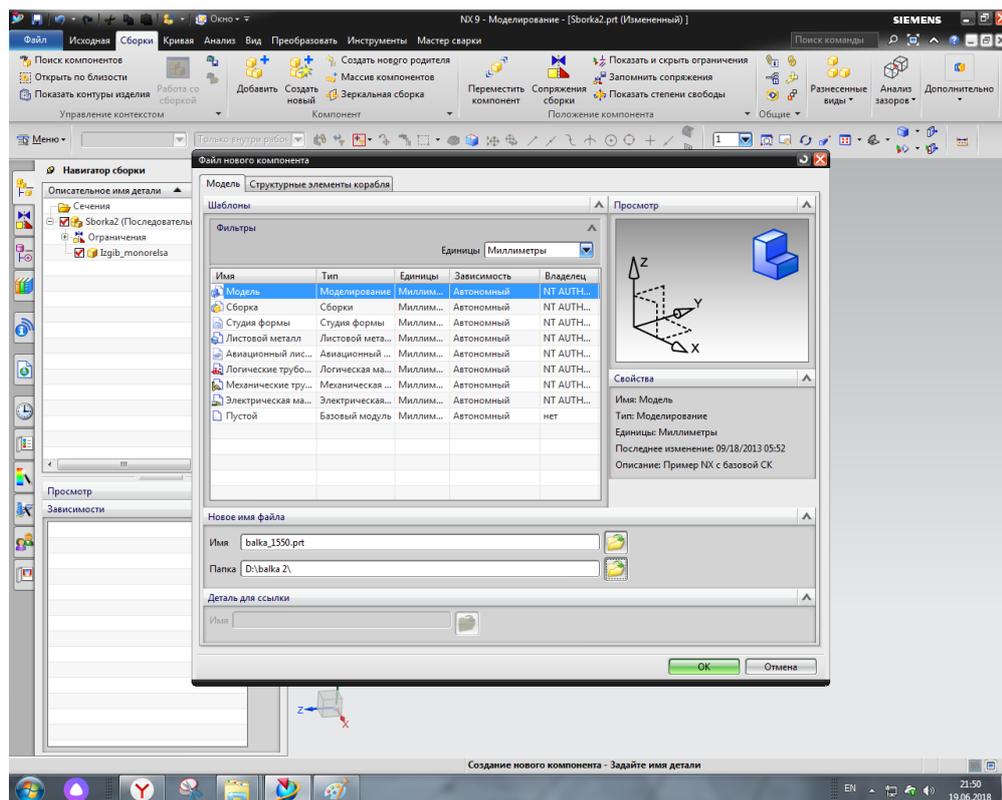


Рисунок 3.30 – Выбор создаваемого элемента

Всплывает окно - «Создать новый компонент», игнорируя функцию «Выбрать объект», подтверждаем - «ОК» (рисунок 3.31).

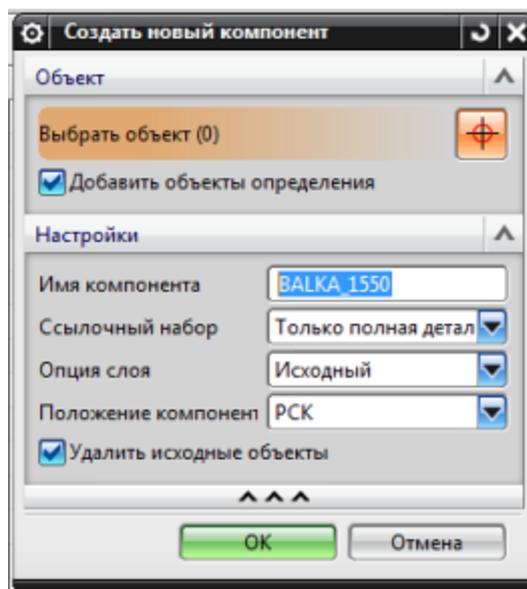


Рисунок 3.31 – Меню подтверждения создания нового объекта

В результате в дереве «Навигатора сборки» появился новый компонент (рисунок 3.32).

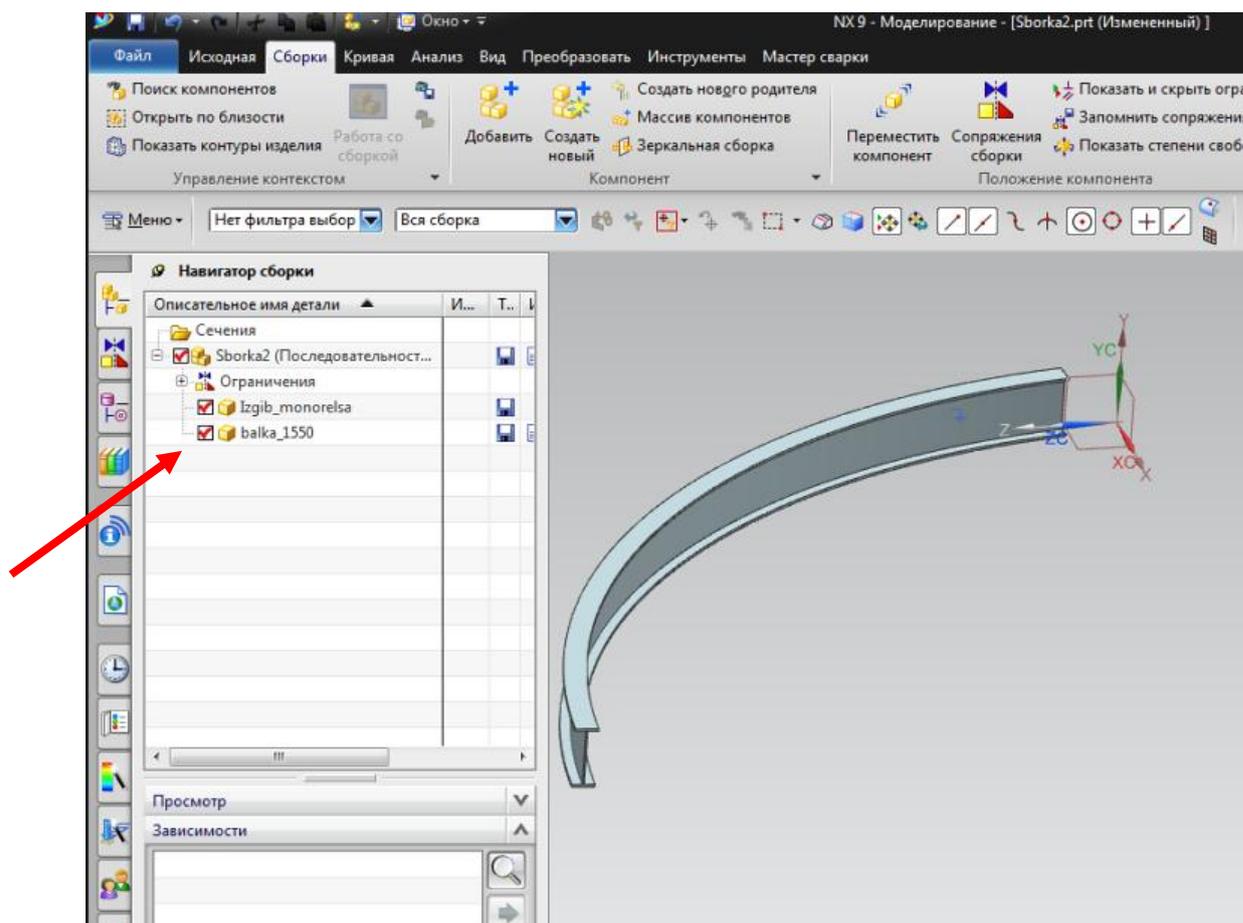


Рисунок 3.32 – Отображение нового компонента в навигаторе сборки

Для того, чтобы сделать созданную деталь рабочей, щелкаем по ней двойным щелчком левой кнопки мыши в навигаторе сборки (рисунок 3.33)

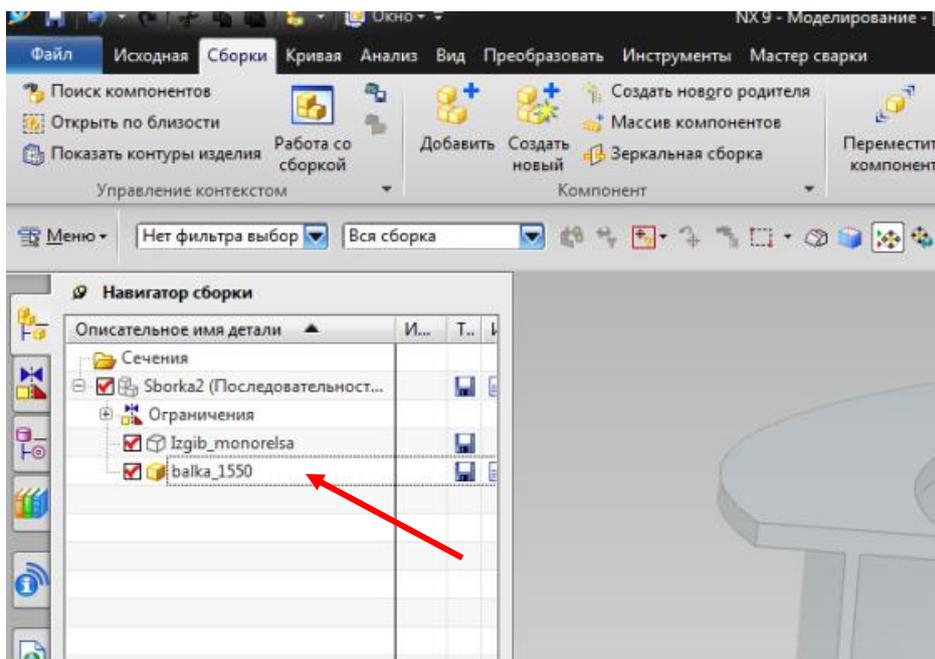


Рисунок 3.33 – перевод детали в активное состояние для работы с ней

Для создания эскиза выбираем меню «Эскиз», задаем создание эскиза «По плоскости», в меню фильтров выбора должна быть указана вся сборка, для того чтобы можно было взять за основу эскиза плоскость гнутого двутавра (рисунок 3.34).

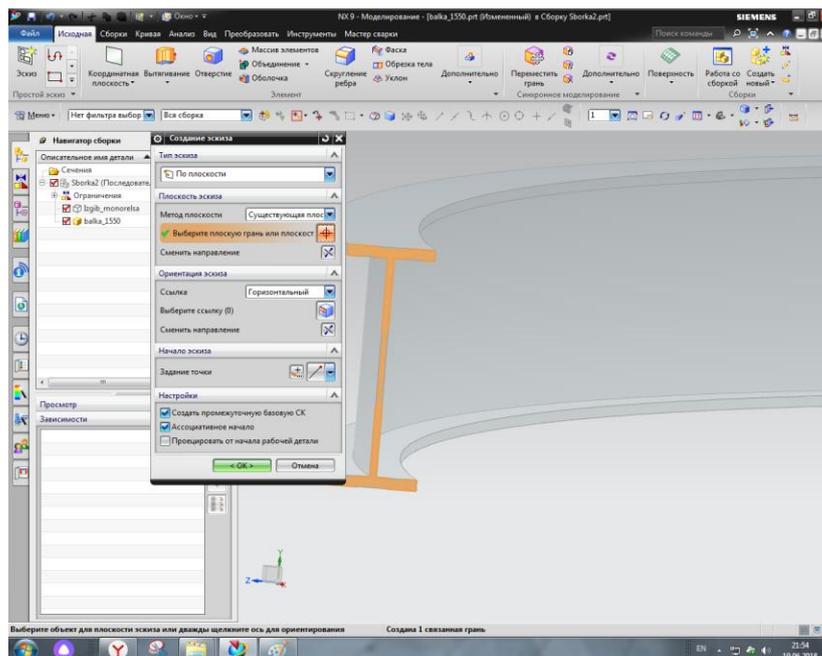


Рисунок 3.34 – Создание эскиза по существующей плоскости

Для создания геометрии внутри эскиза, воспользуемся функцией «Проецирование кривой», с помощью которой спроецируем сечение двутавра из уже построенной детали (рисунок 3.35).

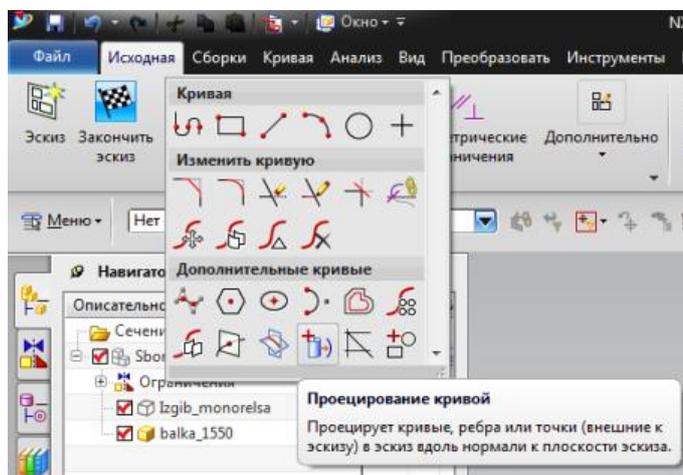


Рисунок 3.35 – Расположение функции «Проецирование кривой»

Для выбора сечения необходимо выбрать в меню выбора «Вся сборка», «Ребра, грани», тогда при выборе кривой сечения подсветится и выберется одним касанием, затем подтверждаем создание (рисунок 3.36, 3.37, 3.38).

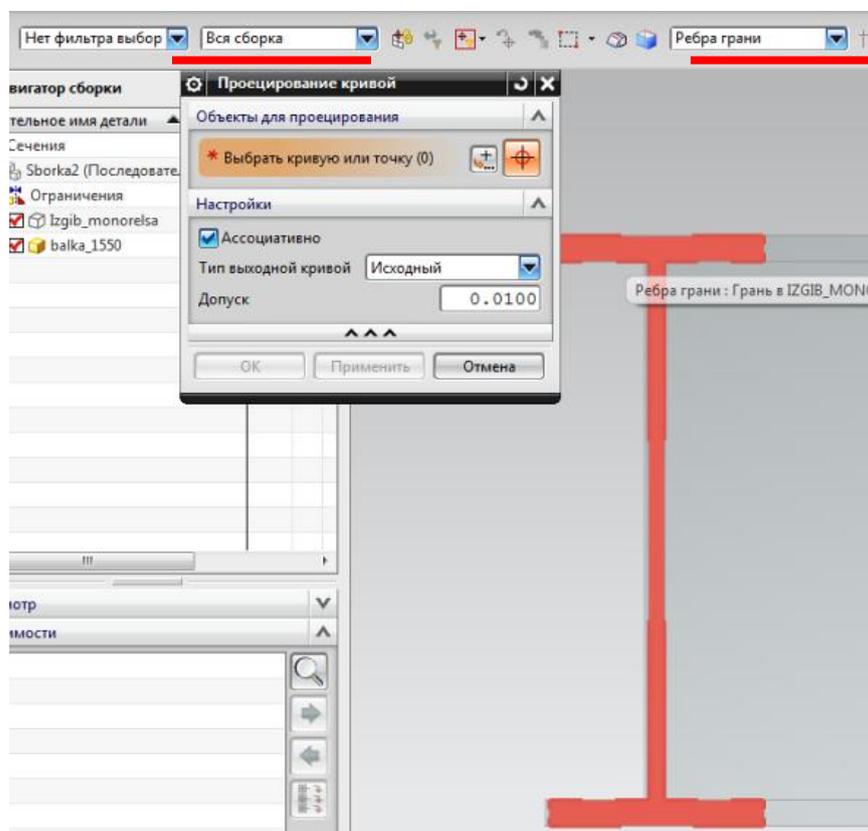


Рисунок 3.36 – Выбор кривых сечения для проецирования

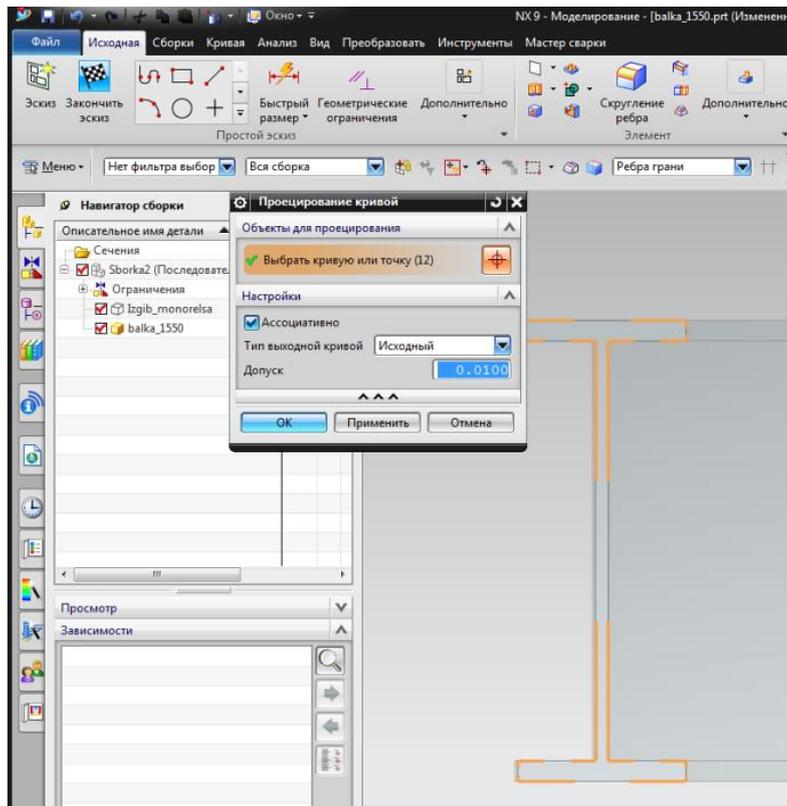


Рисунок 3.37 – Подтверждение проецирования кривых

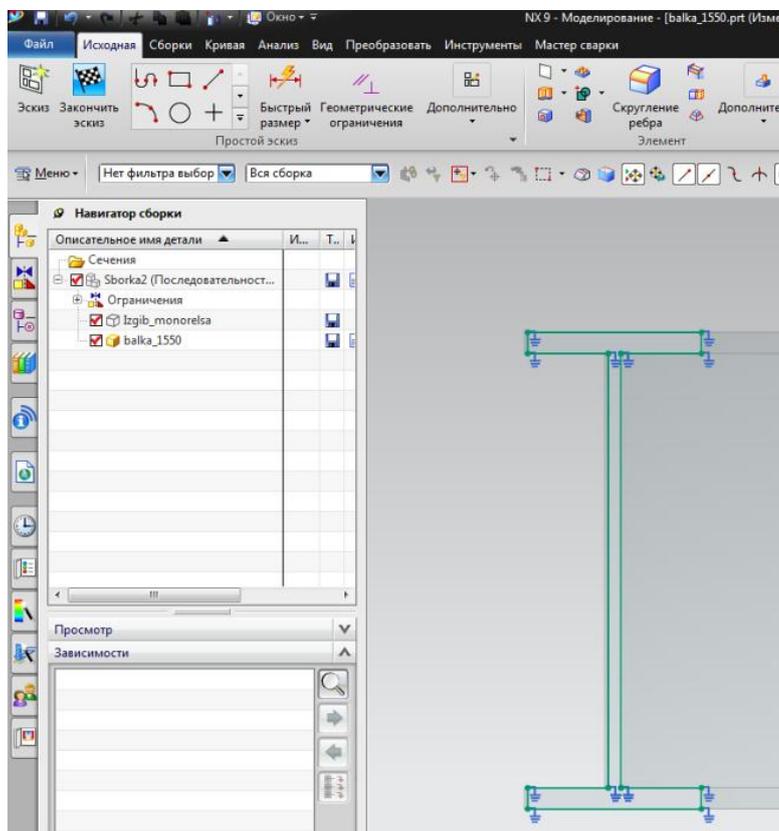


Рисунок 3.38 – Эскиз, полученный проецированием существующего сечения

Открываем меню функции «Вытягивание», выбираем из навигатора модели эскиз, задаем параметры детали, подтверждаем операцию (рисунок 3.39), и получаем результат как на рисунке 3.40.

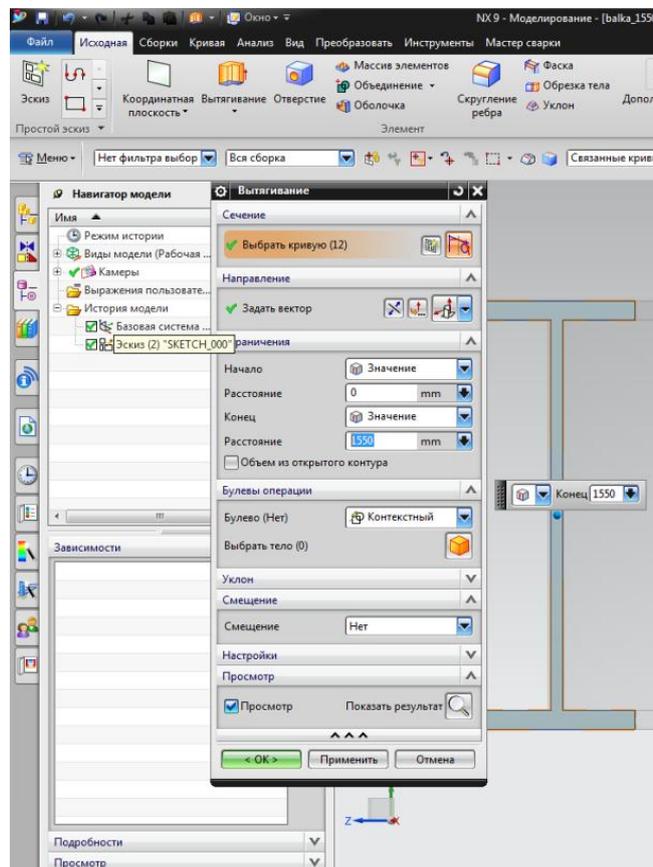


Рисунок 3.39 – Вытягивание эскиза

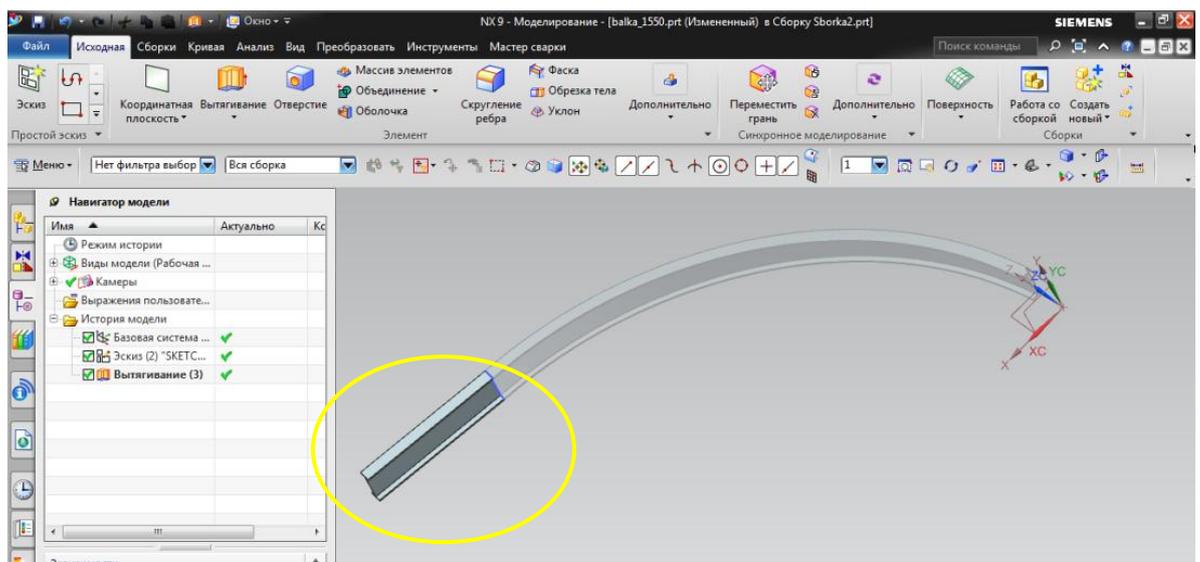


Рисунок 3.40 – Деталь, созданная в сборке

В сборке детали можно перемещать для её правильного расположения, с помощью функции «Переместить компонент» (рисунок 3.41).

При попытке перемещения детали, обнаружим, что она не зафиксирована, и поддаётся перемещению (рисунок 3.41).

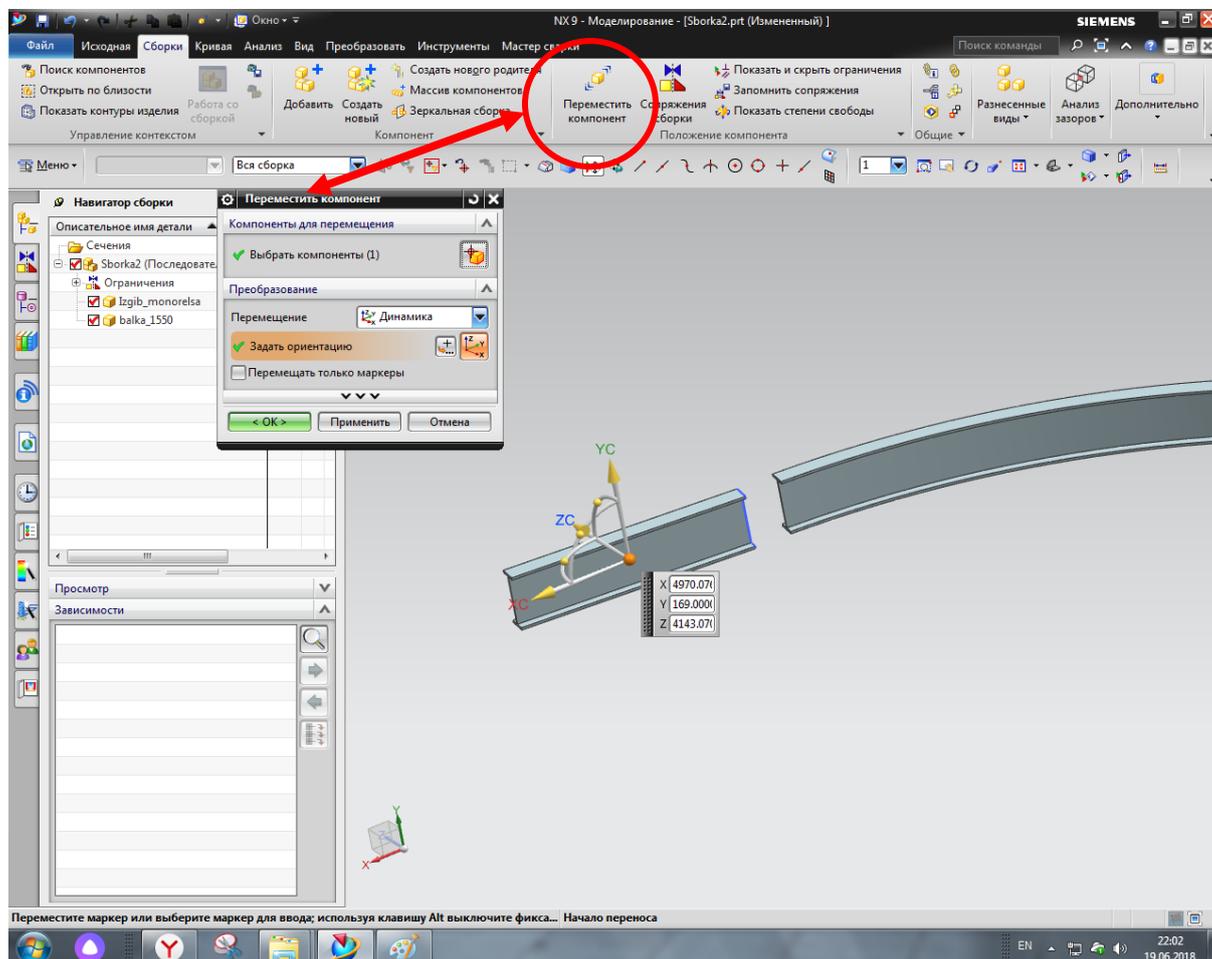


Рисунок 3.41 – Перемещение детали в сборке

Для ограничения свободы перемещения детали создадим сопряжения. Для этого откроем «Сопряжения сборки» (рисунок 3.42), выбираем во вкладке «Тип» необходимый вид сопряжения – «Касание» (рисунок 3.43). Выполняя фиксирование, необходимо выбрать два объекта, относительно друг друга к которым будет назначено сопряжение. На рисунке 3.44 видим результат первого созданного сопряжения – «Касание», деталь «Валка» касается плоскости ребра детали изогнутого монорельса.

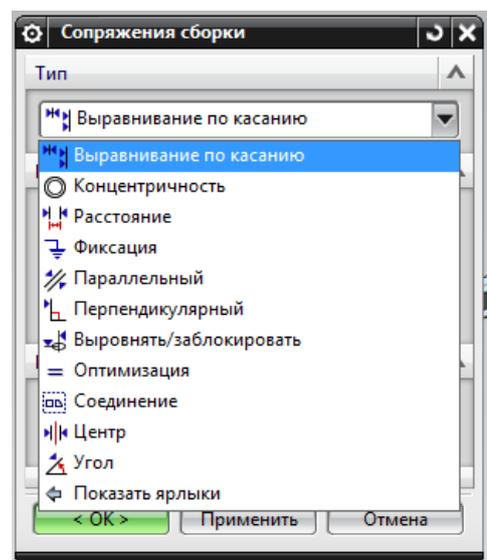
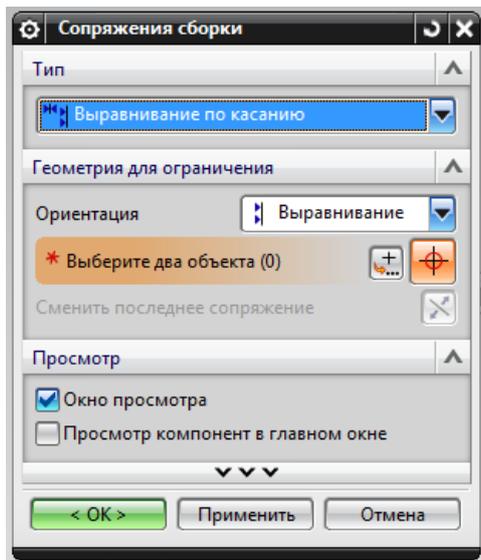


Рисунок 3.42 – Окно «Сопряжения сборки»

Рисунок 3.43 – Окно «Тип»

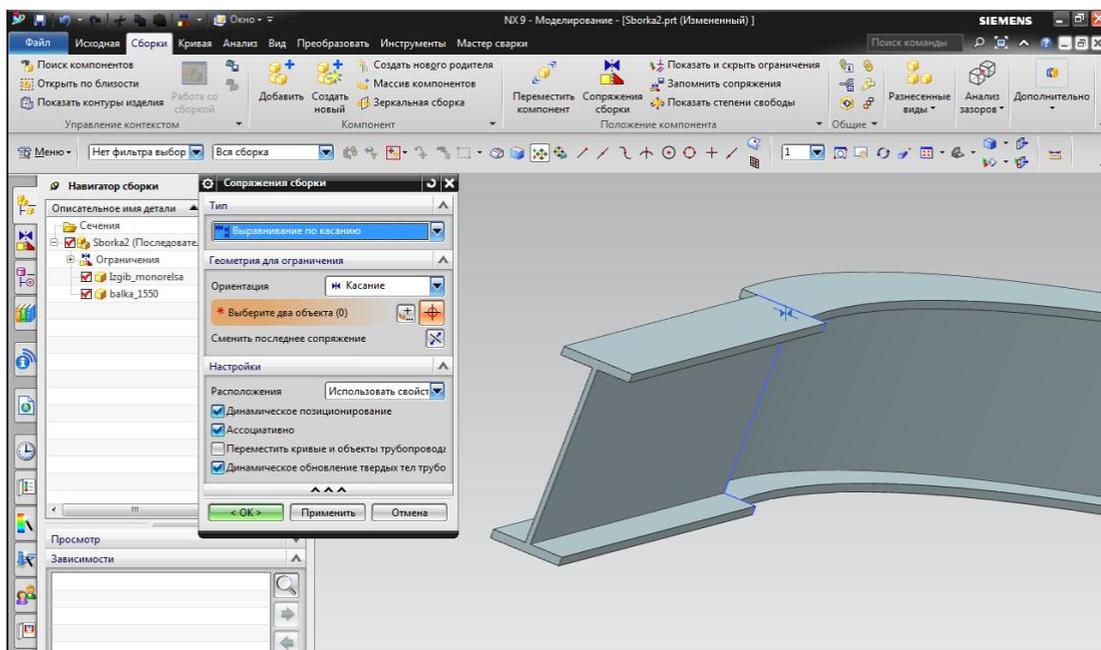


Рисунок 3.44 – Задание параметров для фиксирования

Применим еще одно сопряжение с помощью выравнивания касанием для выравнивая деталей параллельно их сечению. Выберем грань одной детали, и ребро в детали, где сечение представляет собой дугу (рисунок 3.45).

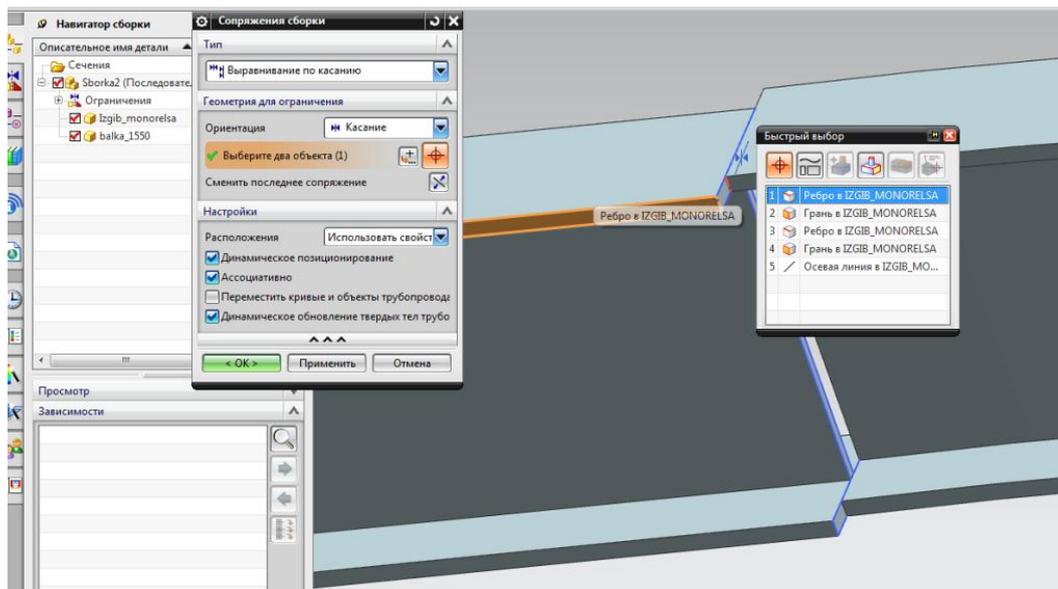


Рисунок 3.45 – Выбор объектов для создания сопряжения

Для фиксирования детали необходимо выполнить третье сопряжение, в нашем случае это будет «Выравнивание по касанию», для выравнивания необходимо задать выбор граней деталей, которые хотим выровнять (рисунок 3.46).

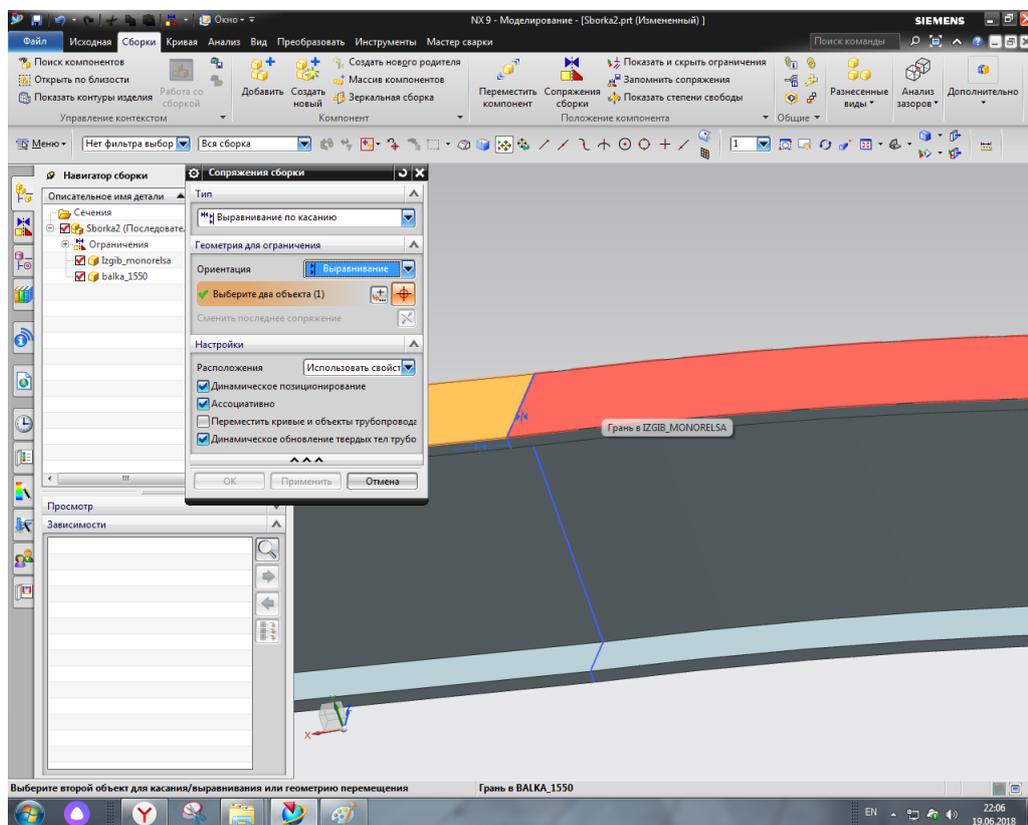


Рисунок – 3.46 – Выбор граней для выравнивания

В результате назначенных сопряжений, можем наблюдать совпадение контуров деталей в сборке, которое нам было необходимо. Также детали зафиксированы от смещения. Созданные ограничения отображены в дереве построения, а также представлены на отображении 3D-модели сборки (рисунок 3.47). Сопряжения можно отключать или редактировать, заменять одно сопряжение другим.

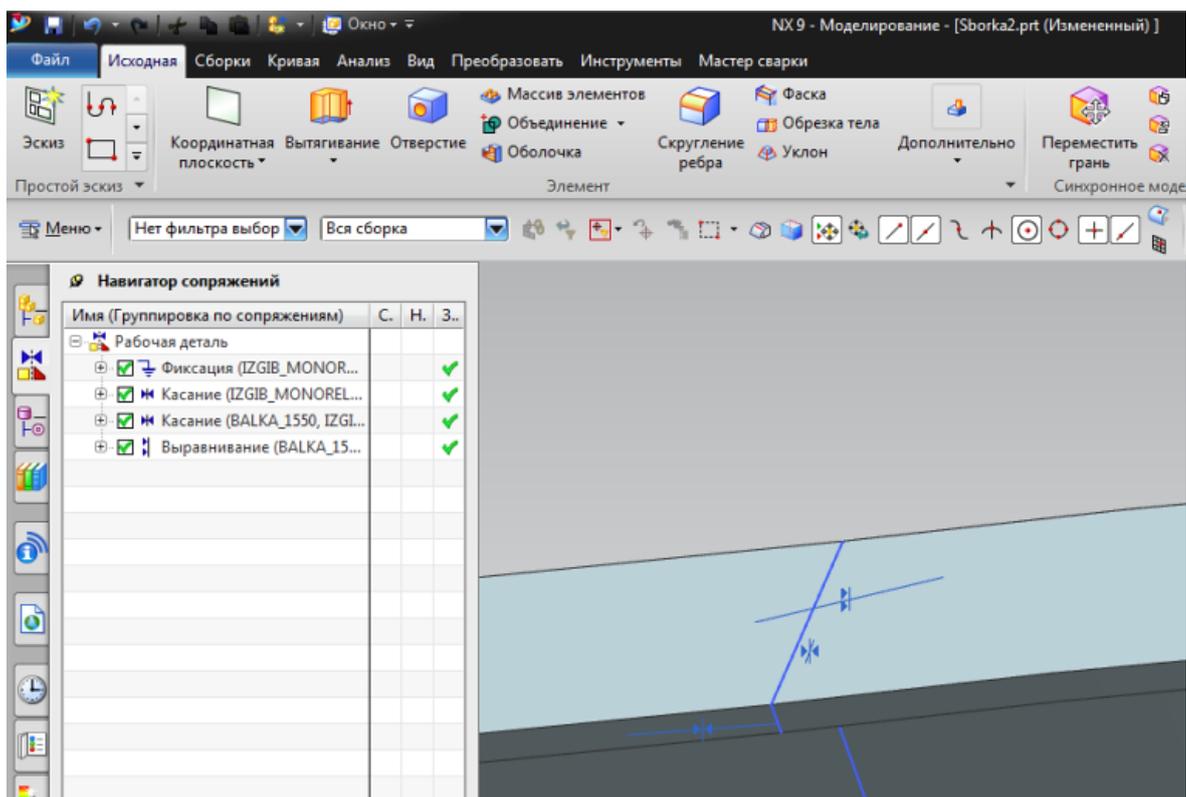


Рисунок 3.47 – Отображение ограничений в сборке

Аналогичным методом создаём второй двутавр для сварной конструкции и накладываем на него сопряжения для фиксированного положения в сборке. (рисунок 3.48)

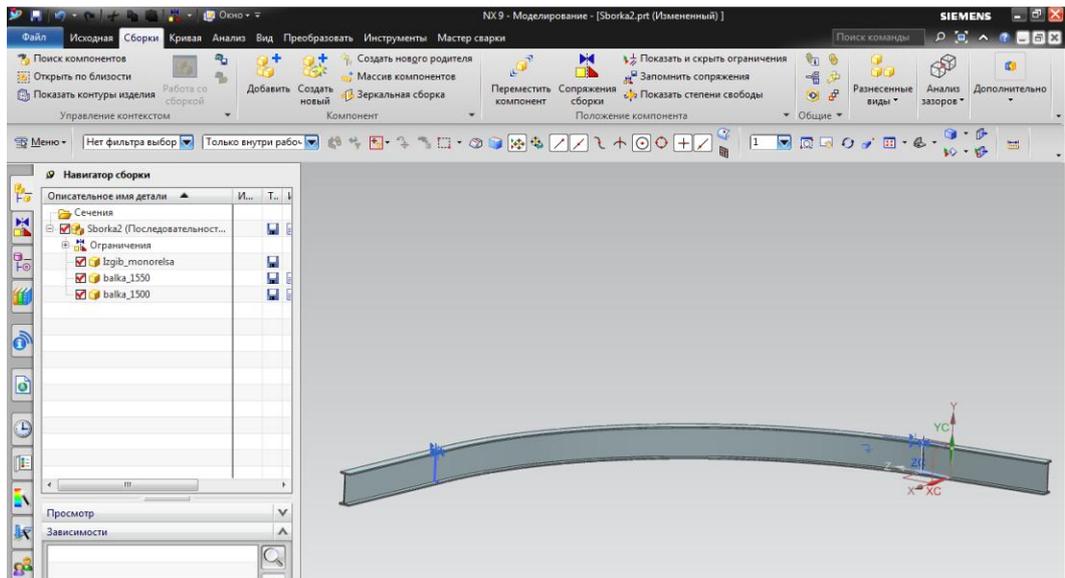


Рисунок 3.48 - Сборка из трех частей профиля двутавра

Следующим пунктом добавим уже созданную ранее в пункте 3.1 деталь «Пластина», для этого воспользуемся меню добавления нового компонента в сборку (рисунок 3.49).

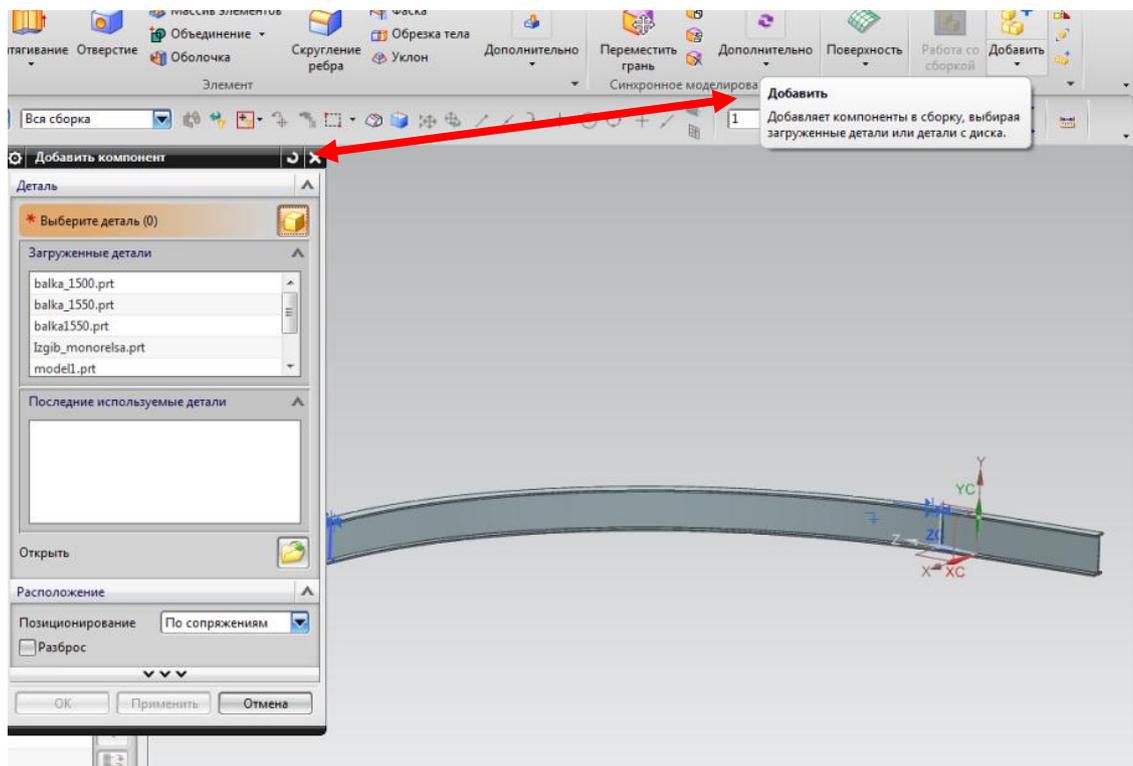


Рисунок 3.49 – Добавление пластины в сборку

Выбираем файл пластины с места хранения на диске компьютера (рисунок 3.50), после подтверждения выбора, всплывает диалоговое окно расположения детали, которое предлагает возможность задания сопряжений на этапе размещения детали (рисунок 3.51).

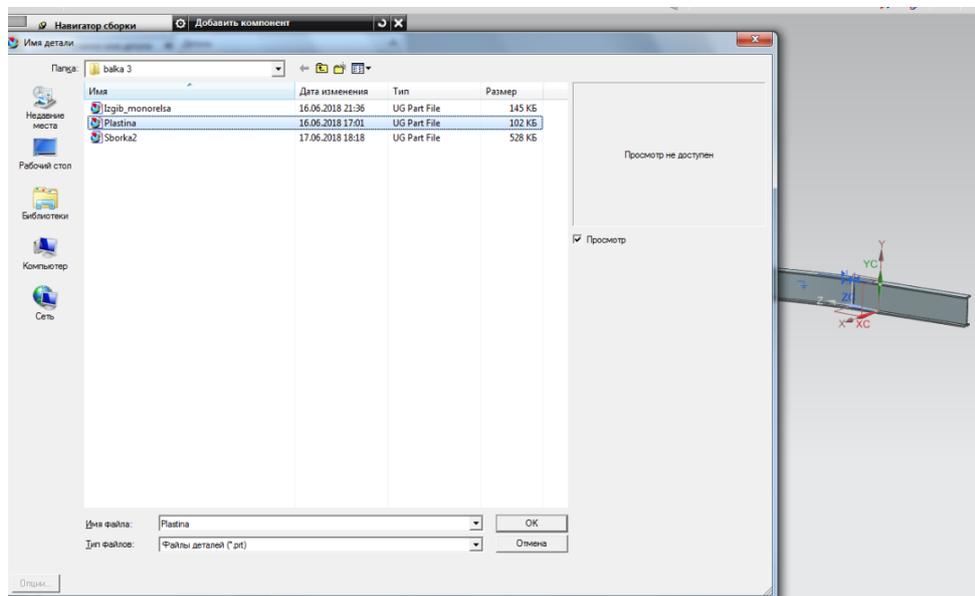


Рисунок 3.50 – Выбор файла с диска хранения на компьютере

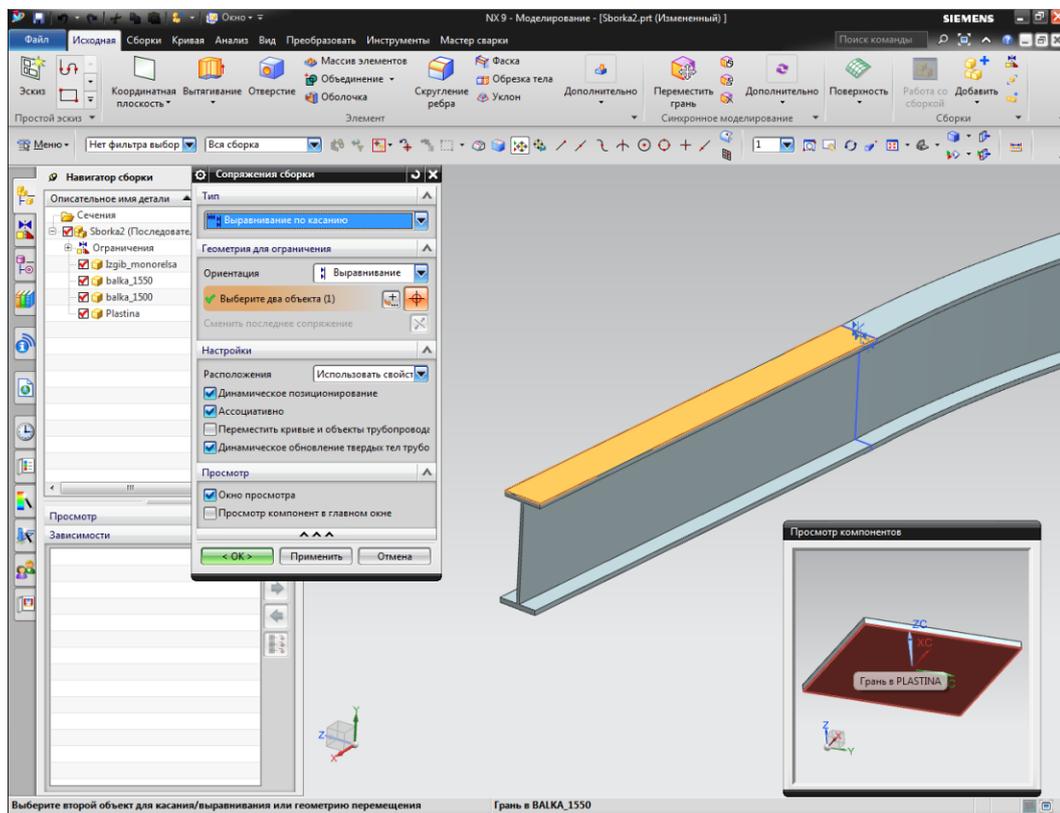


Рисунок 3.51 – Диалоговое окно добавления детали в сборку

Ориентирование пластины начнем с задания расстояния расположения края пластины от ребра балки, для этого необходимо выбрать соответствующие ребра, и задать расстояние между ними (рисунок 3.52).

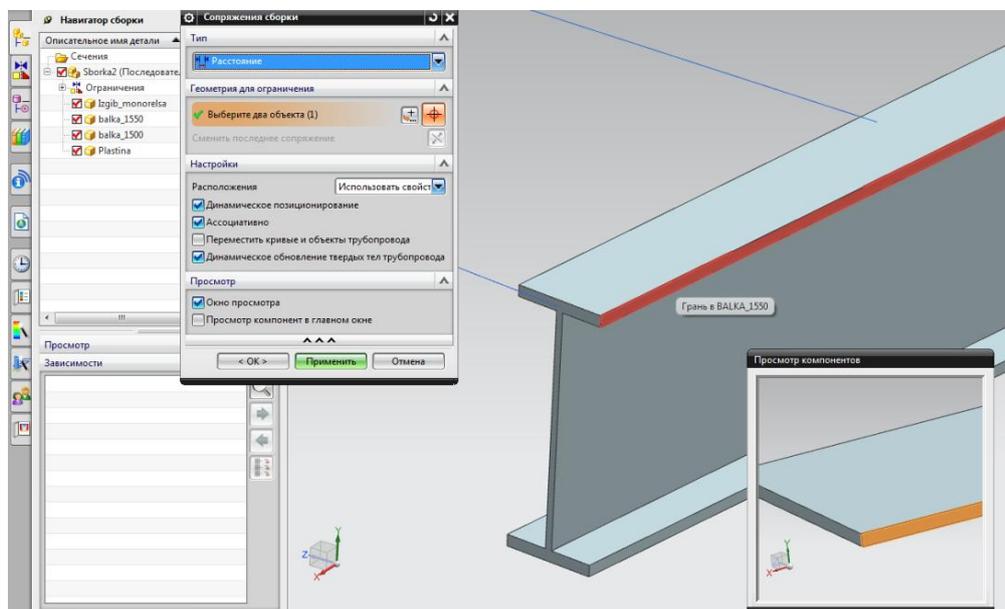


Рисунок 3.52 – Выбор ребер деталей для сопряжения с помощью окна «Просмотр компонентов»

Также можно не задавать сопряжения при вставке детали, переместить деталь в приблизительно необходимое место, и уже после вставки, приступить к заданию сопряжений, в некоторых конструкциях так поступать удобнее (рисунок 3.53).

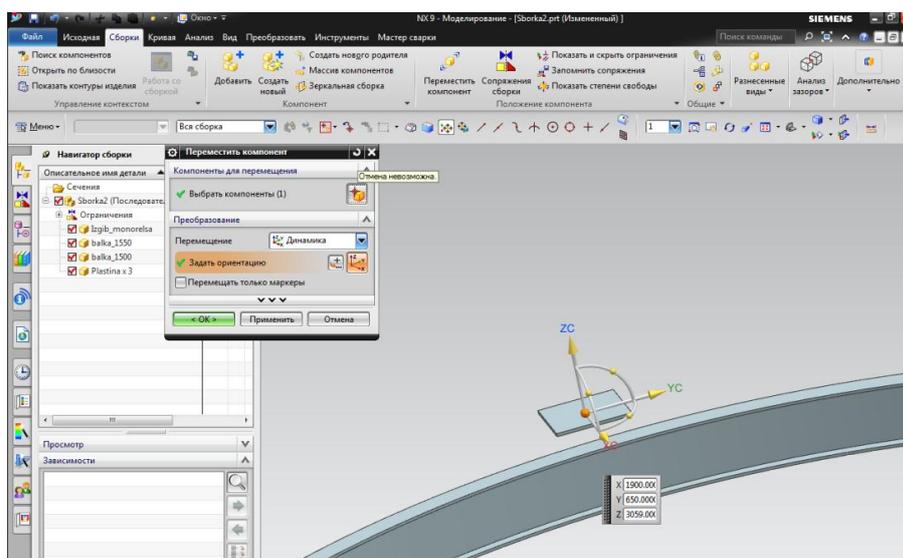


Рисунок 3.53 – Добавление детали без сопряжений

Для ориентирования пластины расположенной на изогнутой балке, применим при сопряжении расположение детали под определённым углом относительно другой. Для этого при задании параметров сопряжения выберем «Тип» – угол, определим грани деталей, которые будут расположены под углом, и зададим значение угла (рисунок 3.54).

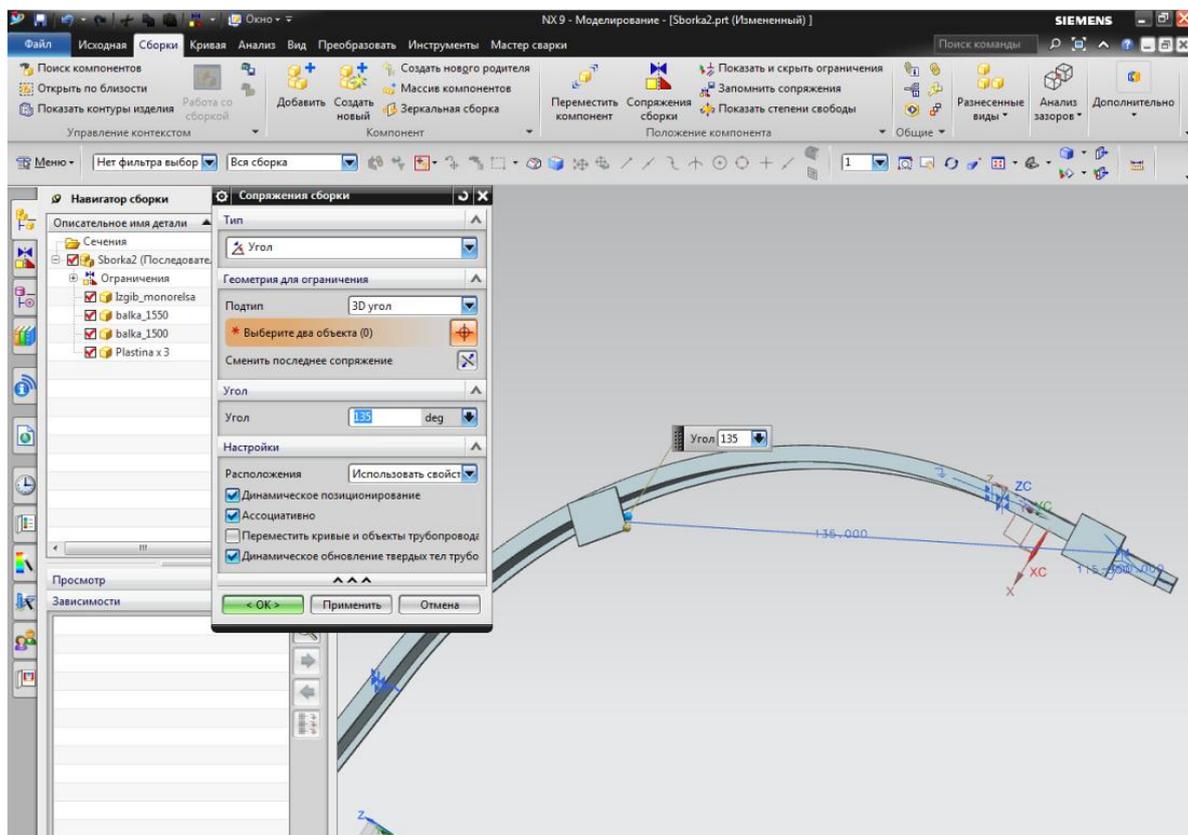


Рисунок 3.54 – Позиционирование детали с помощью задания сопряжения граней деталей под углом

Для позиционирования пластины в центре изогнутой балки, выберем сопряжение «Тип» - расстояние, выберем грани пластины и балки (рисунок 3.55), для точного позиционирования, зададим расстояние для двух вертикальных ребер пластины (рисунок 3.56).

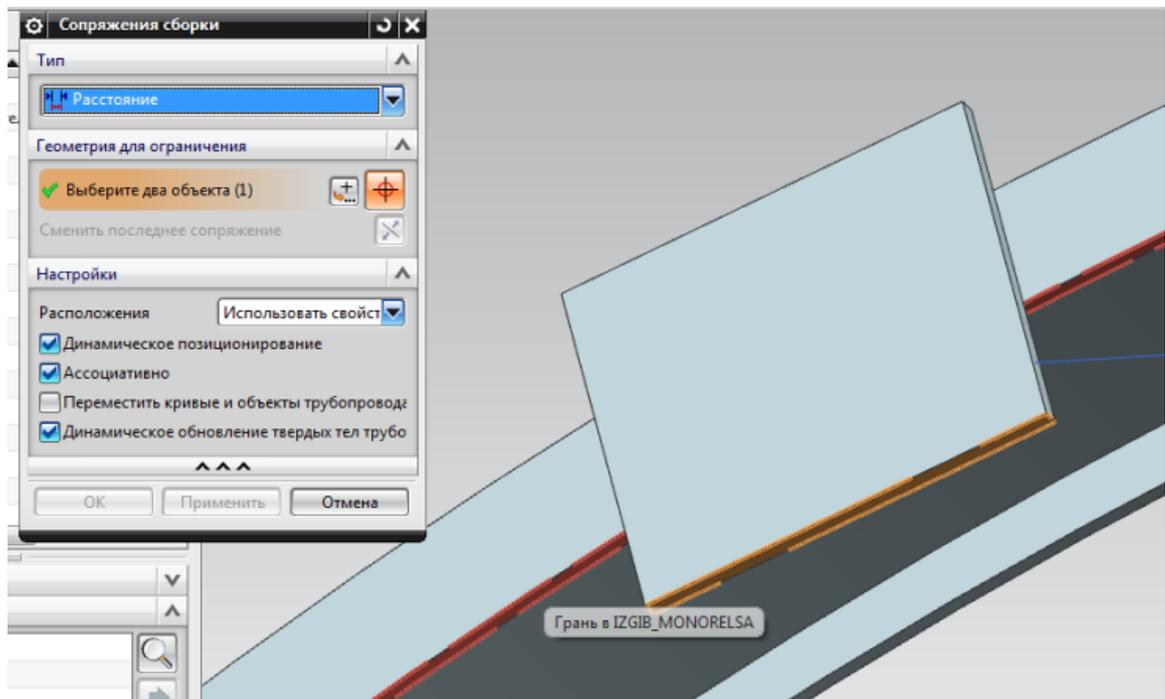


Рисунок 3.55 – Выбор граней для сопряжения по расстоянию

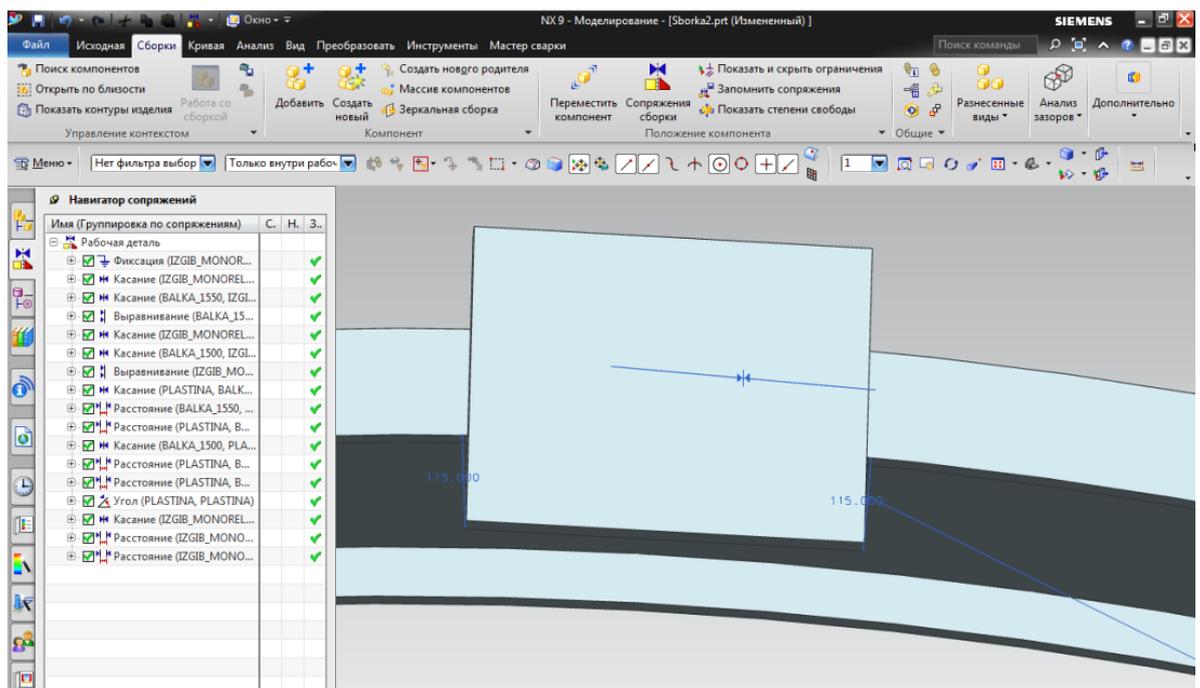


Рисунок 3.56 – Сопряжение пластины относительно изогнутой балки, расстоянием до вертикальных ребер пластины

В итоге спроектировали сварную конструкцию балки-монорельса и получили 3D-конструкцию, с которой можно работать в «Мастере сварки» (рисунок 3.57).

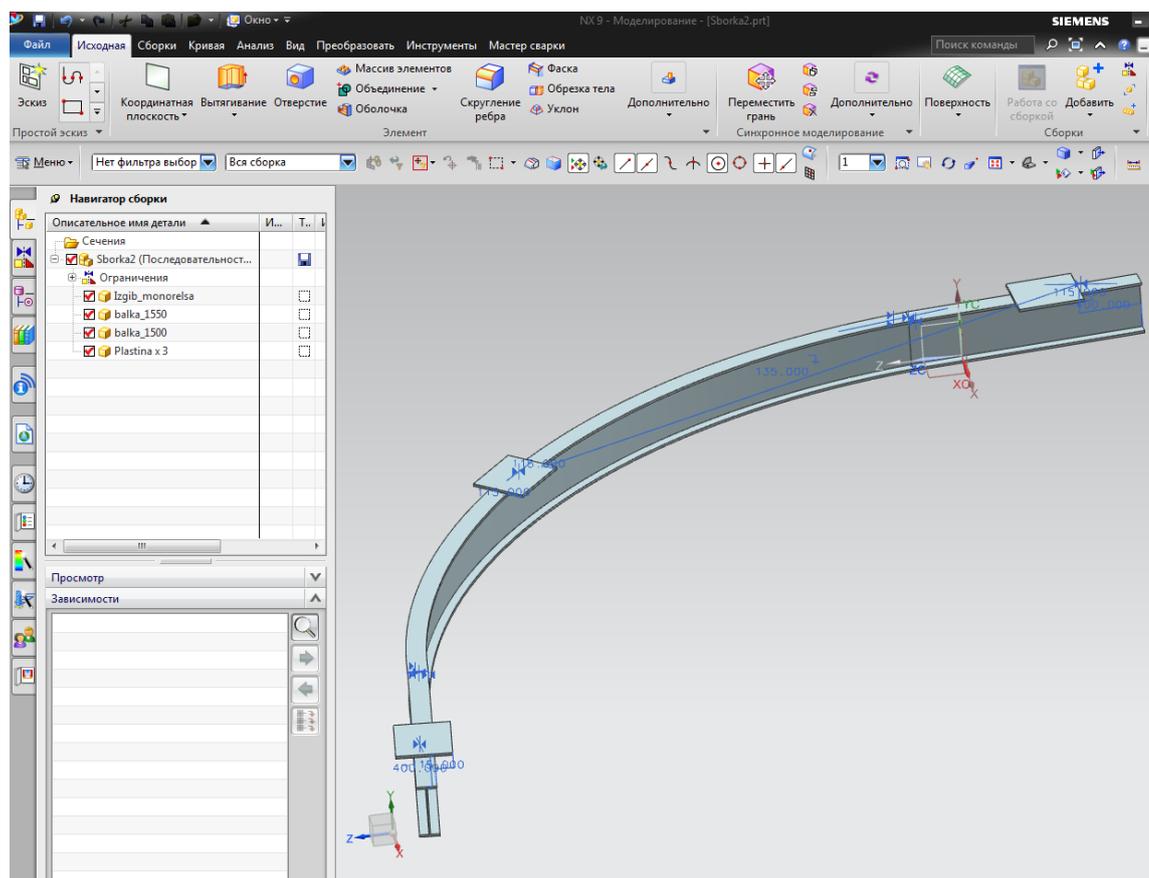


Рисунок 3.57 – 3D-модель сборки конструкции, спроектированная в NX

3.3 Работа со сборкой в приложении NX Weld Assistant

Работа с модулем начинается с запуска приложения. Приложение предназначено для моделирования сварных соединений, и предоставляет проектировщику информацию о соединениях и сварных швах для выполнения конечно-элементного анализа. Найти приложение можно открыв Меню – Вставить – «Мастер сварки» (рисунок 3.34).

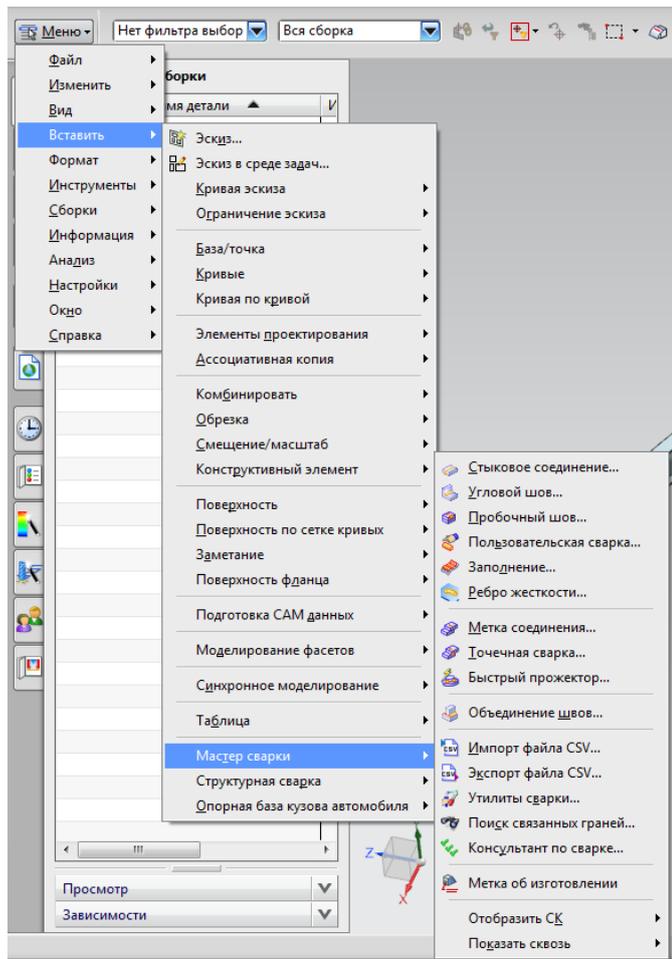


Рисунок 3.58 – Запуск приложения «Мастер сварки»

Открыв приложение, получаем интерфейс как на рисунке 3.35.

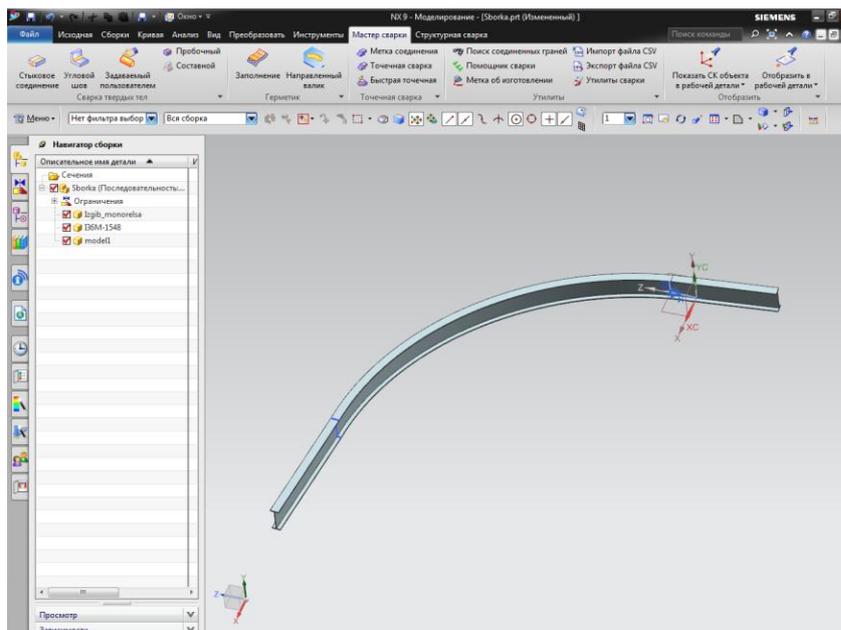
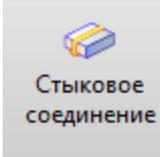
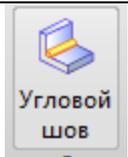
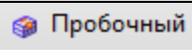
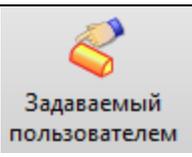
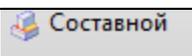
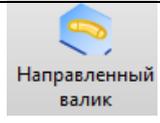
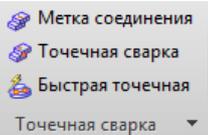
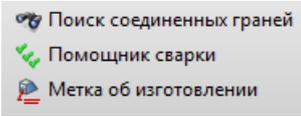
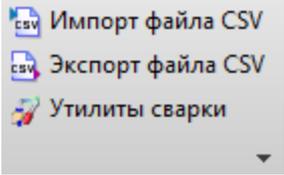


Рисунок 3.59 – Интерфейс приложения

Представленные приложением инструменты рассмотрим в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Инструменты NX Weld Assistant

Команда	Кнопка	Описание и суть работы команды
Сварка твердых тел (Solid Weld)		
Стыковое соединение (Groove)	 Стыковое соединение	Подготовка кромок и сварка двух состыкованных плит, используя указанную форму сечения
Угловой шов (Fillet)	 Угловой шов	Сварка двух плит вместе по тавровому, нахлесточному или угловому соединению
Пробочный (Plug/Slot)	 Пробочный	Сварка двух перекрывающихся плит вместе, используя существующее отверстие или паз для сварки
Задаваемый пользователем (User Defined)	 Задаваемый пользователем	Определяет твердое тело как пользовательскую сварку
Составной (Compound Weld)	 Составной	Комбинация нескольких сварных швов или точек в один элемент
Герметик (Sealer)		
Заполнение (Fill)	 Заполнение	Создает область заполнения герметиком
Направленный валик (Bead)	 Направленный валик	Создает твердое тело, используя форму и траекторию сечения
Точечная сварка (Point Weld)		
Метка соединения (Joint Mark)	 Метка соединения Точечная сварка Быстрая точечная Точечная сварка	Соединяет материалы и отмечает точкой и кривой место соединения
Точечная сварка (Weld Point)		Соединяет материалы и отмечает точкой место соединения

Быстрая точечная (Easy Spot)		Создает сварные точки только между компонентами сборки, автоматически расставляя их
Утилиты (Utilities)		
Поиск соединенных граней (Connected Face Finder)		Обнаружение недостающих граней соединенных деталей для сварных точек, конструкторских или измерительных баз
Помощник сварки (Weld Advisor)		Проверяет сварные точки, конструкторские или измерительные базы на соответствие установленным правилам
Метка об изготовлении (Fabrication Label)		Добавляет метки на соединения, на конструкторские или измерительные базы
Импорт файла CSV (Import CSV File)		Загрузка CSV-файла, содержащего информацию о сварных соединениях, определительных или измерительных базах
Экспорт файла CSV (Export CSV File)		Сохранение или просмотр CSV-файла, содержащего информацию о сварных соединениях, определительных или измерительных базах
Утилиты сварки (Weld Utilities)		Утилиты сварки, такие как группировка точек сварки, идентифицирует сварочные точки, которые потеряли их связанные детали

Создание швов с помощью NX Weld Assistant имеет следующий нюанс: в NX при создании угловых соединений не показывается провар основного материала, а только заполнение присадочным материалом между свариваемыми поверхностями.

Рассмотрим «Стыковое соединение» (GrooveWeld), команда используется для создания соединений между двумя поверхностями, находящихся в одной или параллельных плоскостях, а также для стыковых соединений труб.

Стыковые сварные соединения выполняются по ГОСТ 5264-80 «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные», ГОСТ 14771-76 «Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные», ГОСТ 16037-80 «Соединения сварные стальных трубопроводов», ГОСТ 8713-79 «Сварка под флюсом. Соединения сварные» паяные соединения – по ГОСТ 19249-73 «Соединения паяные. Основные типы и параметры». ГОСТ 14771-76 предусматривает 28 конструктивных вариантов стыковых соединений.

Они имеют условные обозначения С1, С2, ... С28 и т.д. Отличия соединений в подготовке кромок в зависимости от толщины, расположения свариваемых элементов, технологии сварки и наличия оборудования для обработки кромок. При большой толщине металла ручной сваркой невозможно обеспечить проплавление кромок на всю толщину, поэтому делают разделку кромок, т.е. скос их с двух или одной стороны. Кромки скашивают на строгальном станке или термической резкой (плазменной, газокислородной). Общий угол скоса кромки (40° - 50°). При этом должна быть выдержана величина притупления (нескошенной части) и зазор, величины которых установлены стандартом в зависимости от толщины металла.

Для создания стыкового шва выберем, найдем команду: вкладка «Мастер сварки» (Weld Assistant) – группа «Сварка твердых тел» – команда «Стыковое соединение» (рисунок 3.60).

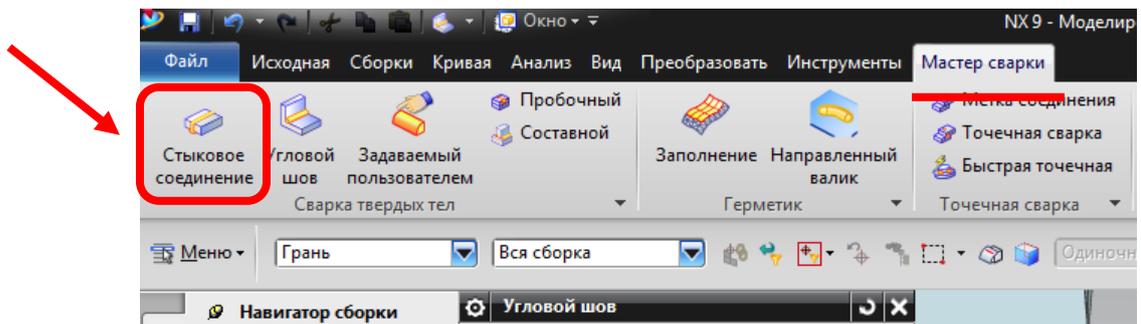


Рисунок 3.60 - выбор функции создания стыкового соединения

Все параметры стыкового соединения задаются в открывшемся окне «Стыковое соединение» (рисунок 3.61), некоторые параметры могут задаваться с помощью маркеров на модели в графическом окне (рисунок 3.62).

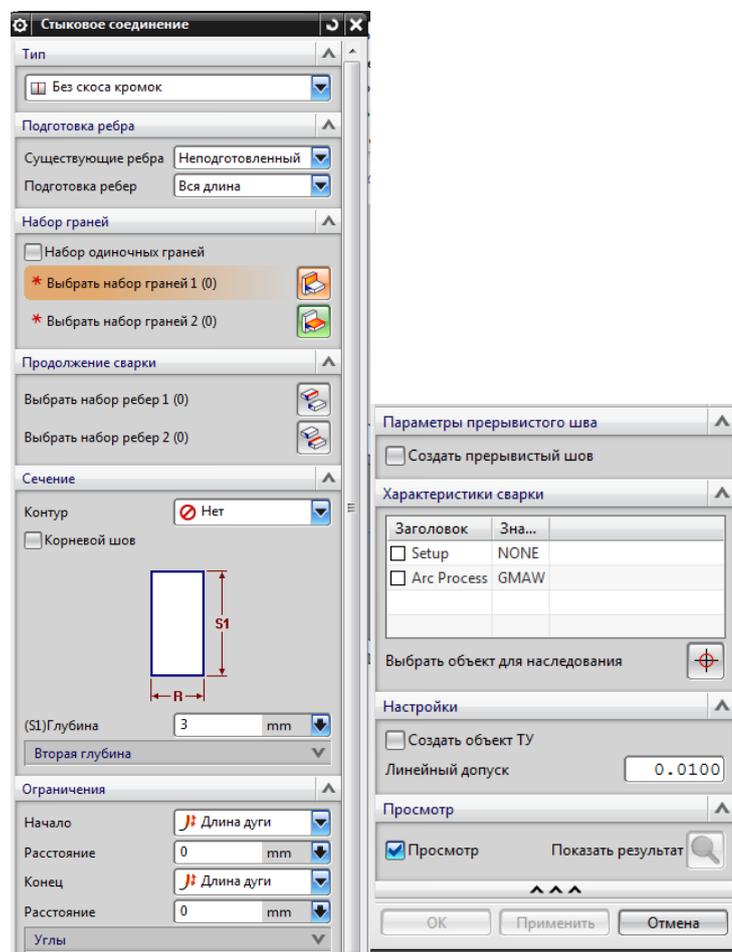


Рисунок 3.61 – Диалоговое окно настройки стыкового соединения

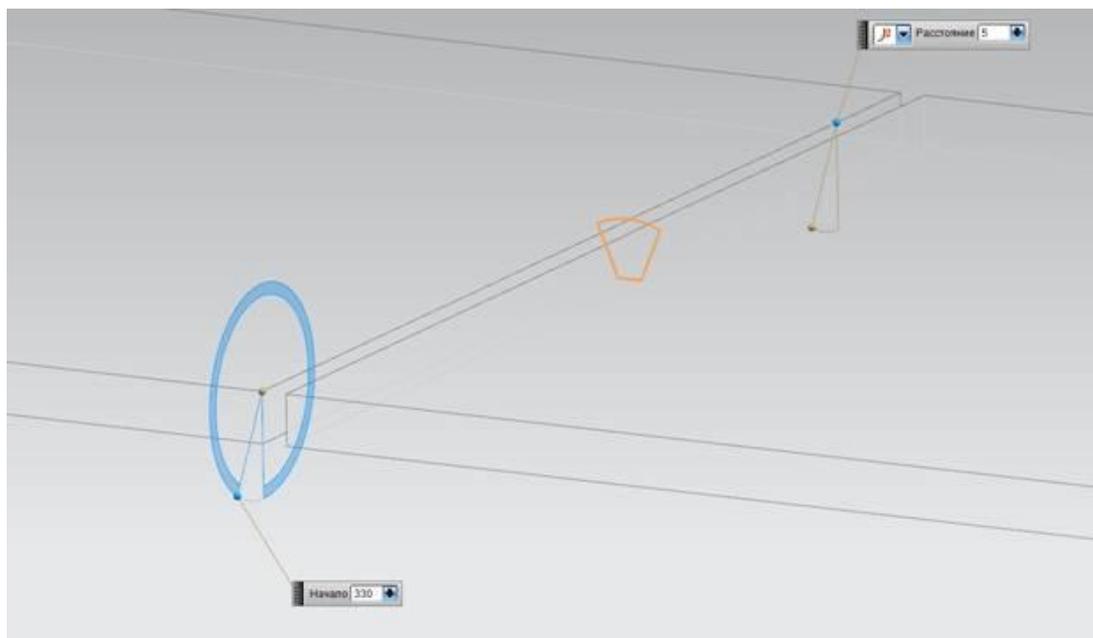
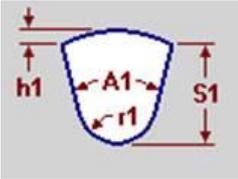
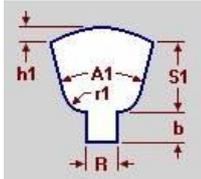
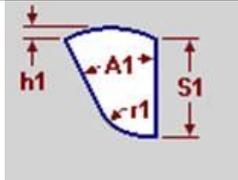
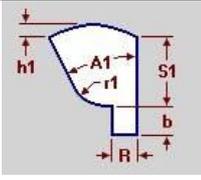
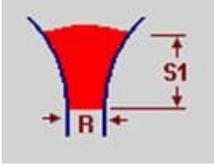
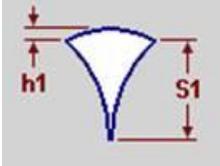
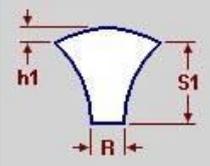
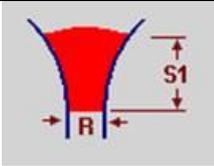
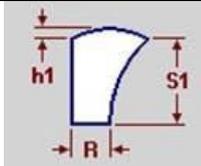


Рисунок 3.62 – Пример настройки маркеров для создания стыковых соединений

В открывшемся диалоговом окне (рисунок 3.63) первым предоставляется возможность выбрать «Тип соединения». Рассмотрим типы стыковых соединений, представленные в NX в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Типы стыковых соединений в NX Weld Assistant

Описание типа	Иконка	Пример	
Без скоса кромок, соединения типа C2, C4;			
V-образный скос кромок – со скосом обеих кромок, соединения типа C17, C18;			
		Без корневого шва	С корневым швом
Со скосом одной, соединения типа C8,			

С9;		Без корневого шва	С корневым швом	
U-образный скос кромки – с криволинейным скосом кромки, соединения типа С23;				
		Без корневого шва	С корневым швом	
J-образный скос кромки – с криволинейным скосом одной кромки, соединения типа С13;				
		Без корневого шва	С корневым швом	
С отбортовкой кромки, соединения типа С28;				
		Заполнение конструкции	Без корневого шва	С корневым швом
Со скосами кромки – со отбортовкой одной кромки, соединения типа У2.				
		Без корневого шва	С корневым швом	

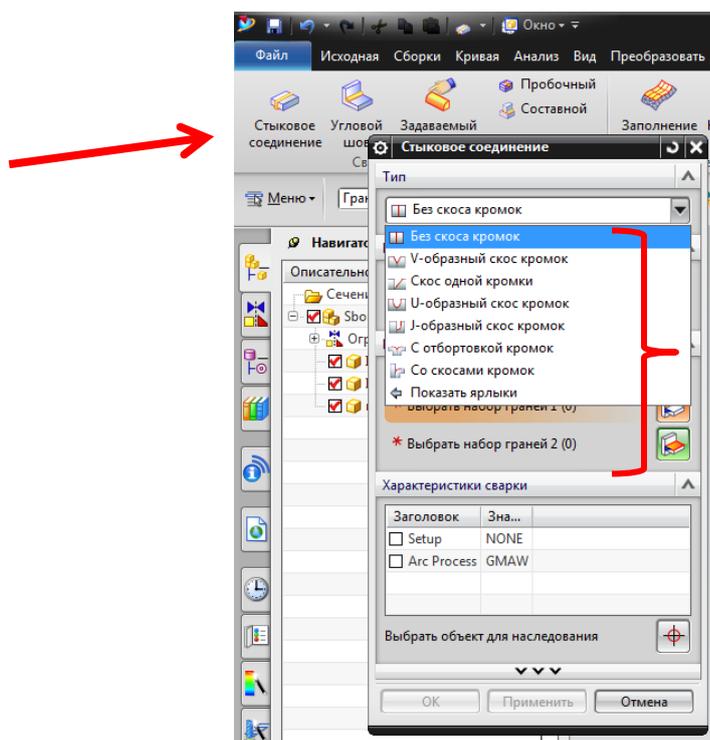


Рисунок 3.63 - Выбор «Тип соединения»

Создание сварного шва возможно, как по заранее подготовленным пользователем кромкам, так и по неподготовленным. В втором случае программа сама сделает все необходимые операции по подготовке кромок, для этого необходимо в разделе «Подготовка ребра» в графе «Существующие ребра» выбрать: «неподготовленные» – для неподготовленных ребер. «Нет» – не подготавливает ребра перед созданием соединения.

Выбираем тип разделки кромки - «V-образный скос кромок», далее требуется указать грани поочередно одной детали, затем второй (рисунок 3.64 – 3.65).

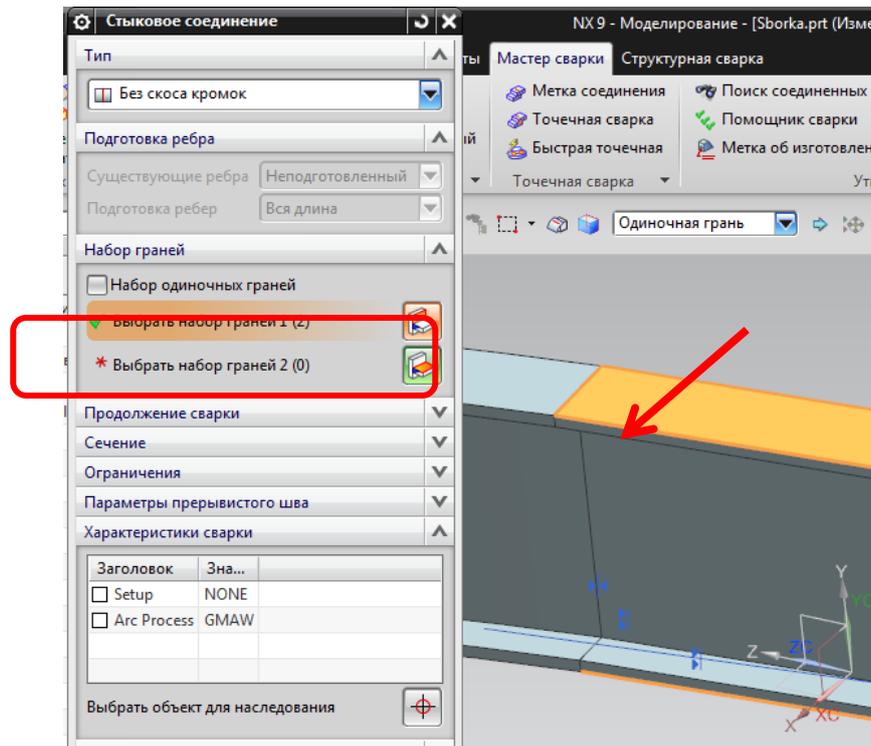


Рисунок 3.64 – Выбор набора граней

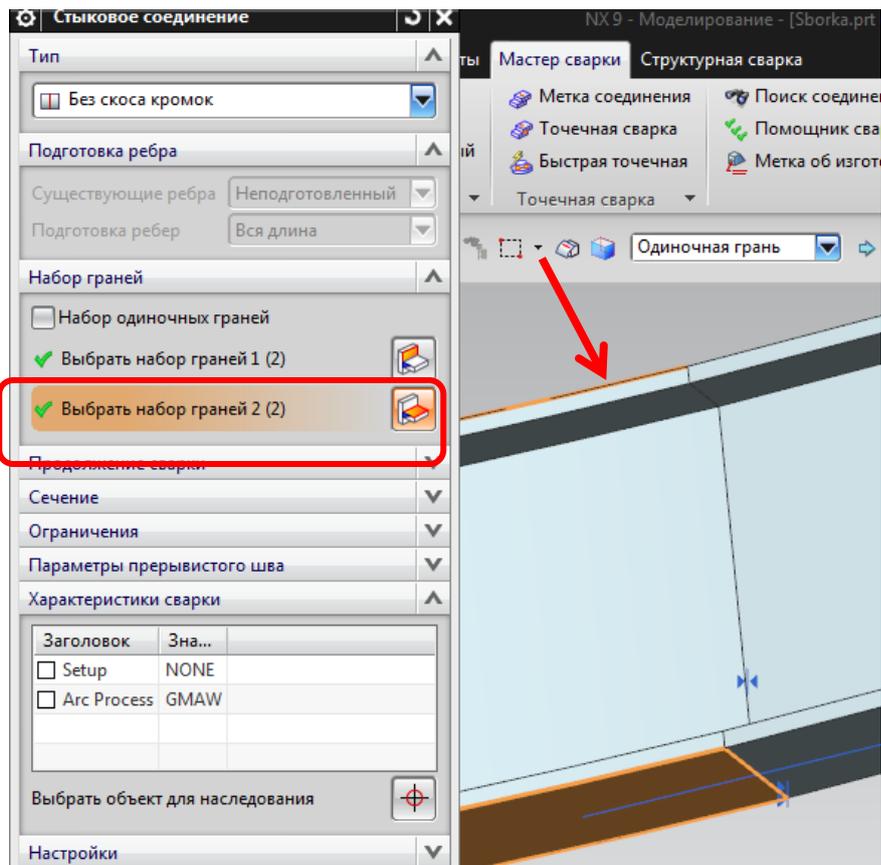


Рисунок 3.65 – Выбор набора граней

Следующим пунктом будет выбор в поле «Продолжение сварки», в котором по аналогии с поверхностями необходимо выбрать ребро, по которым выбранные ранее поверхности соединятся сварным швом (рисунок 3.66).

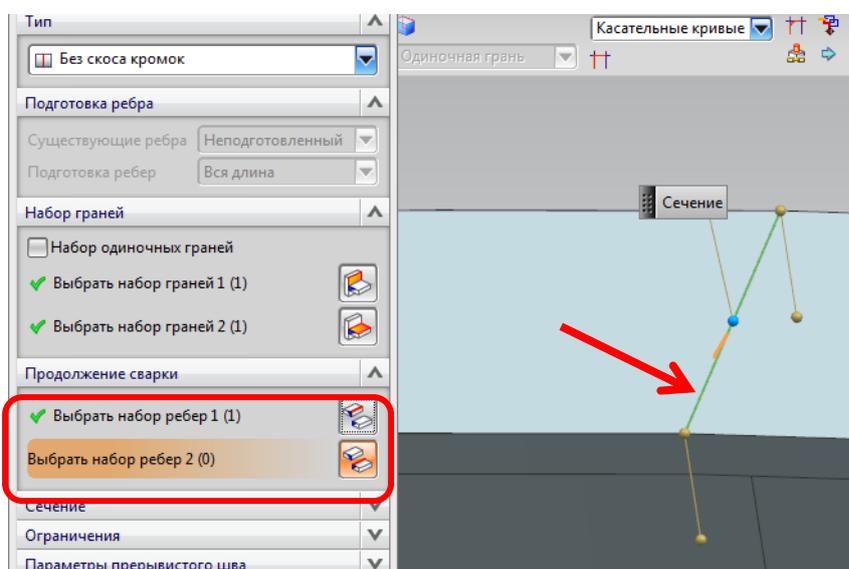


Рисунок 3.66 - «Продолжение сварки»

Следующим шагом необходимо выбрать сечение или контур шва, выбор состоит из: выпуклого; плоского; вогнутого; и «Нет» – оставляет контур сварки необозначенным. Так как конструкция является монорельсом и нам будут мешать выпуклые швы, выберем в конкретном случае плоский контур (рисунок 3.67).

Для сварных соединений в NX представлено несколько типов контура шва:

-  нет – оставляет контур сварки необозначенным,
-  выпуклый,
-  плоский,
-  вогнутый.

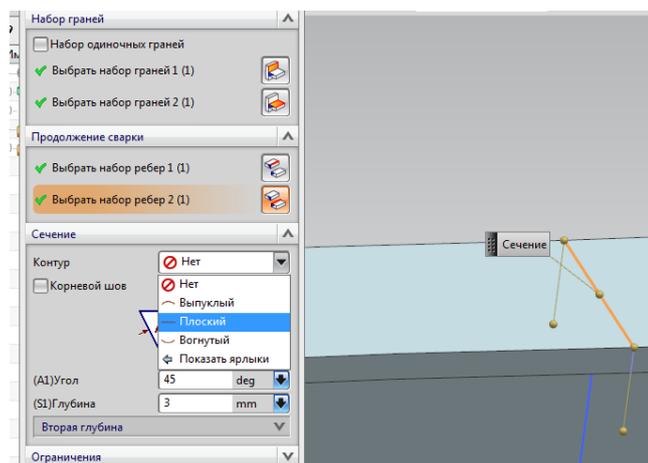


Рисунок 3.67 - Выбор контура сечения шва

При выборе функции «Корневой шов», открываются возможности ввести дополнительные параметры шва меняется и эскиз сечения шва. Заполняем параметры шва и переходим к созданию соединения, при условии, что не требуется вносить изменения в оставшиеся окна параметров (рисунок 3.68). Среди оставшихся параметров соединения есть возможность задания параметров прерывистого шва, создание ТУ, изменение линейного допуска и д.р.

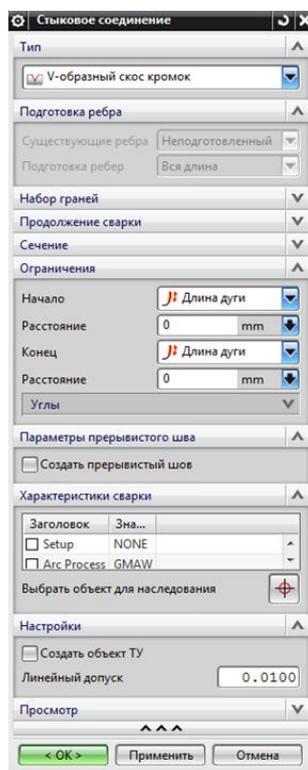


Рисунок 3.68 – Окно ввода параметров стыкового соединения

После завершения команды нажатием кнопки «ОК» получаем сварное соединение в виде шва с автоматической V-образной разделкой кромок (рисунок 3.69).

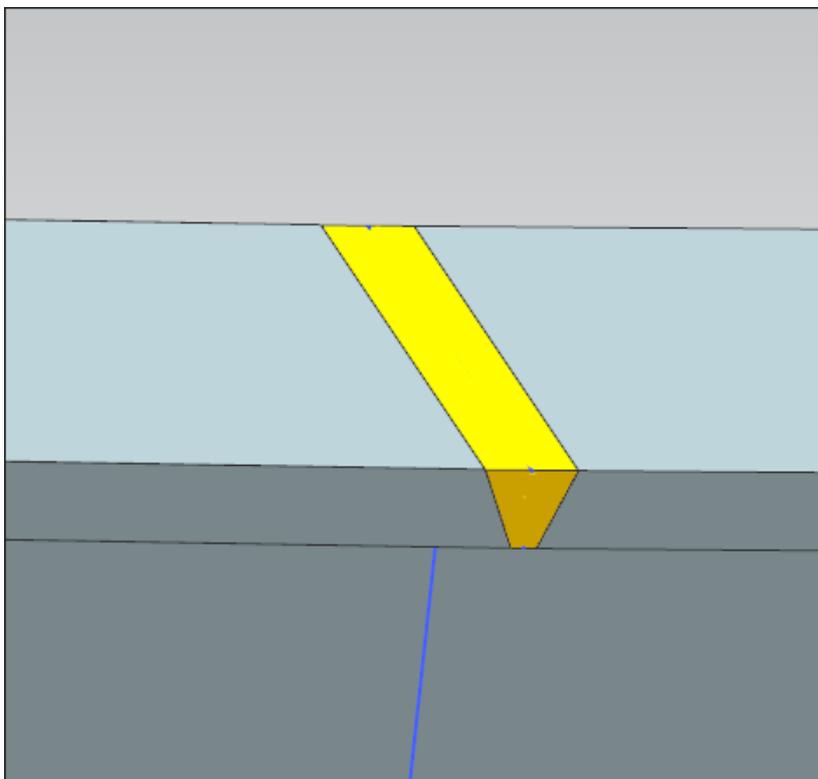


Рисунок 3.69 - Пример созданного стыкового сварного шва полки двутавра

Таким же образом создаем стыковые швы для соединения ребра двутавра, только назначаем шов с двух сторон с V-образной разделкой (рисунок 3.70).

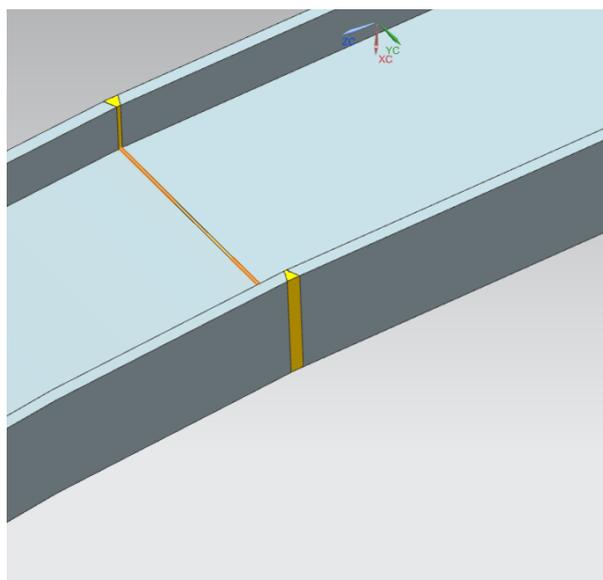


Рисунок 3.70 – Стыковое соединение двутавра

Крепить пластину к балке будем тавровым, и нахлесточным соединением. Нахлесточные сварные соединения выполняются по ГОСТ 5264-80, ГОСТ 14771-76, ГОСТ 16037-80, ГОСТ 8713-79.

ГОСТ 5264-80, ГОСТ 14771-76 предусматривают 2 конструктивных варианта нахлесточных соединений, Н1 и Н2. Однако, если максимальная толщина соединяемых деталей при ручной дуговой сварке до 240 мм, то при механизированной до 60 мм и при сварке под флюсом до 20 мм.

В NX при создании угловых соединений не показывается провар основного материала, а только заполнение присадочным материалом между свариваемыми поверхностями.

Расположение команды: вкладка «Мастер сварки» – группа «Сварка твердых тел» – команда «Угловой шов». Для создания шва необходимо выбрать грани вдоль которых будем моделировать шов (рисунок 3.71).

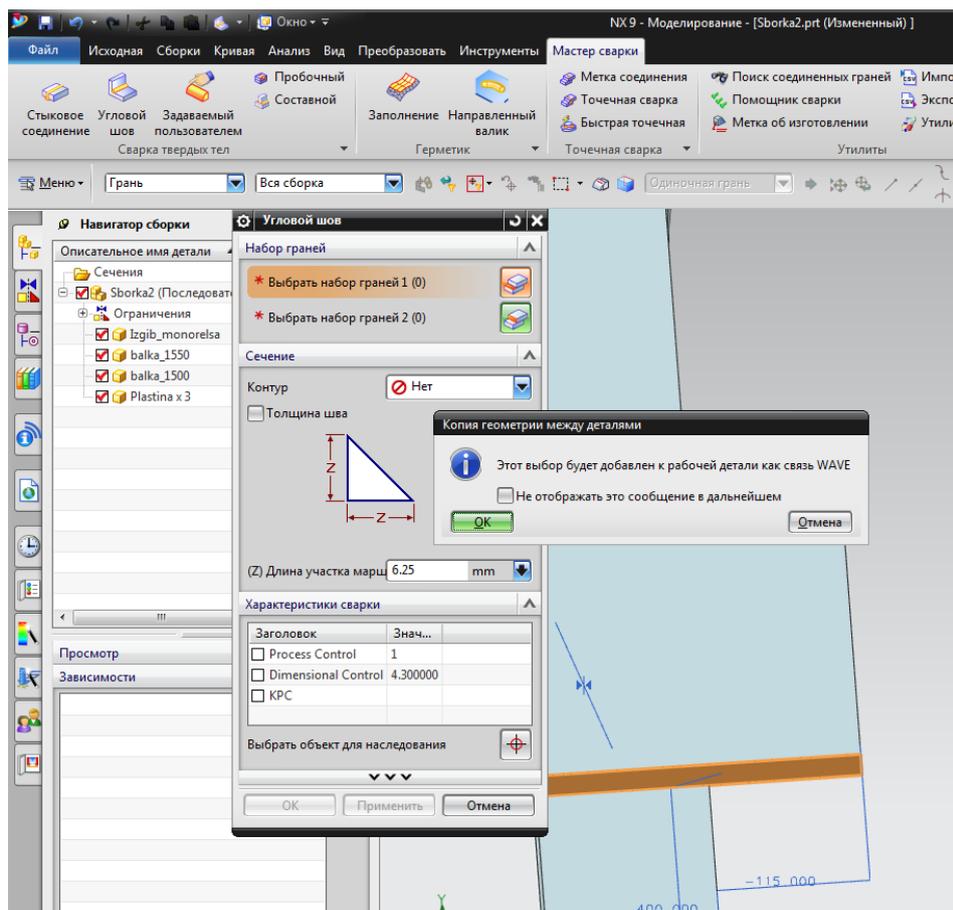


Рисунок 3.71 – Выбор граней для создания углового соединения

NX даёт нам возможность видеть, как будет выглядеть моделируемый шов на этапе введения параметров шва (рисунок 3.72).

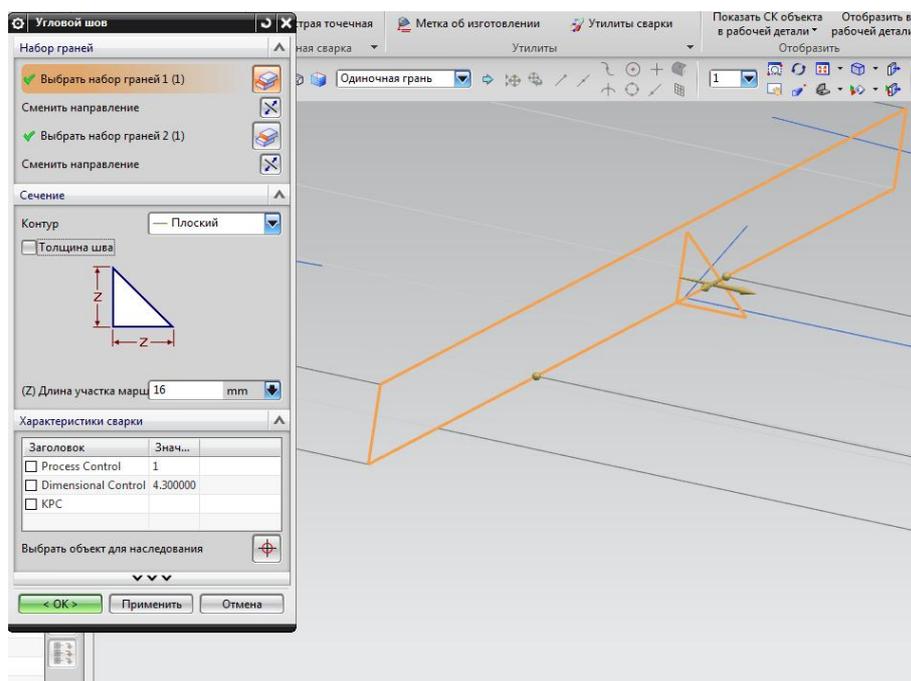


Рисунок 3.72 – Отрисовка будущего шва

В поле ограничений шва видим возможность задания параметров для шва, возможность отступа от края, и расположение шва на любом заданном расстоянии с заданной длиной (рисунок 3.73).

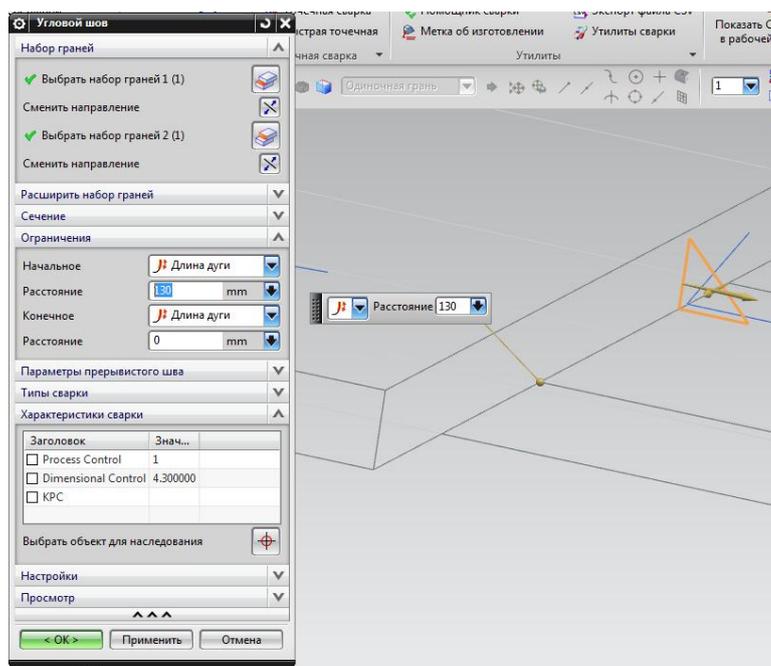


Рисунок 3.73 – Настройка начала и продолжительности шва

В зависимости от типа угловое соединение дает возможность выбрать тип соединения деталей при сварке угловых швов задается в графе «Тип сварки» (рисунок 3.74):

-  тавровое соединение;
-  соединение внахлест;
-  угловое соединение.

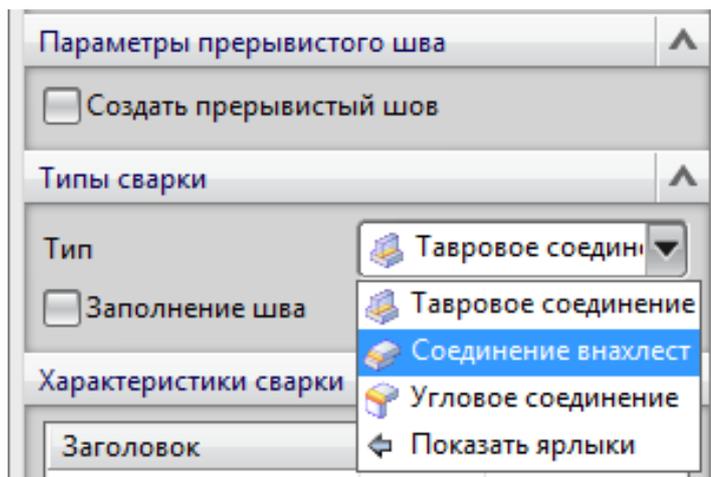


Рисунок 3.74 – Выбор типа сварки для углового соединения

После того, как ввели все параметры и подтвердили создание командой «ОК», получаем автоматическое построение сварного шва Н1 нахлесточного соединения (рисунок 3.75).

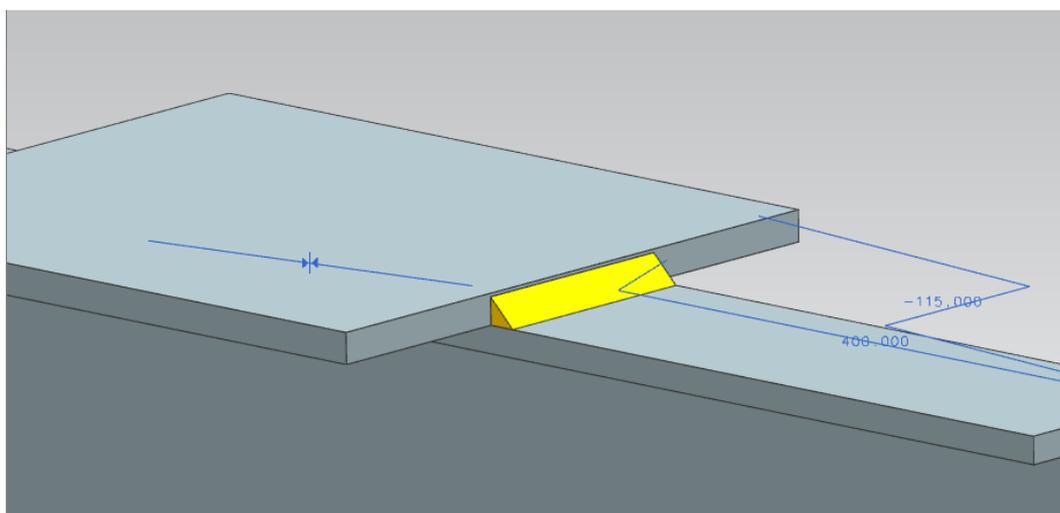


Рисунок 3.75 – Нахлесточное соединение пластины с балкой

Создание таврового соединения происходит по тому же алгоритму, что и нахлесточное, меняется выбор в графе «Тип» углового соединения – на «Тавровое соединение», выбираем грани, которые будет соединять сварной шов, задаём параметры сечения шва (рисунок 3.76) и получаем результат на рисунке 3.77.

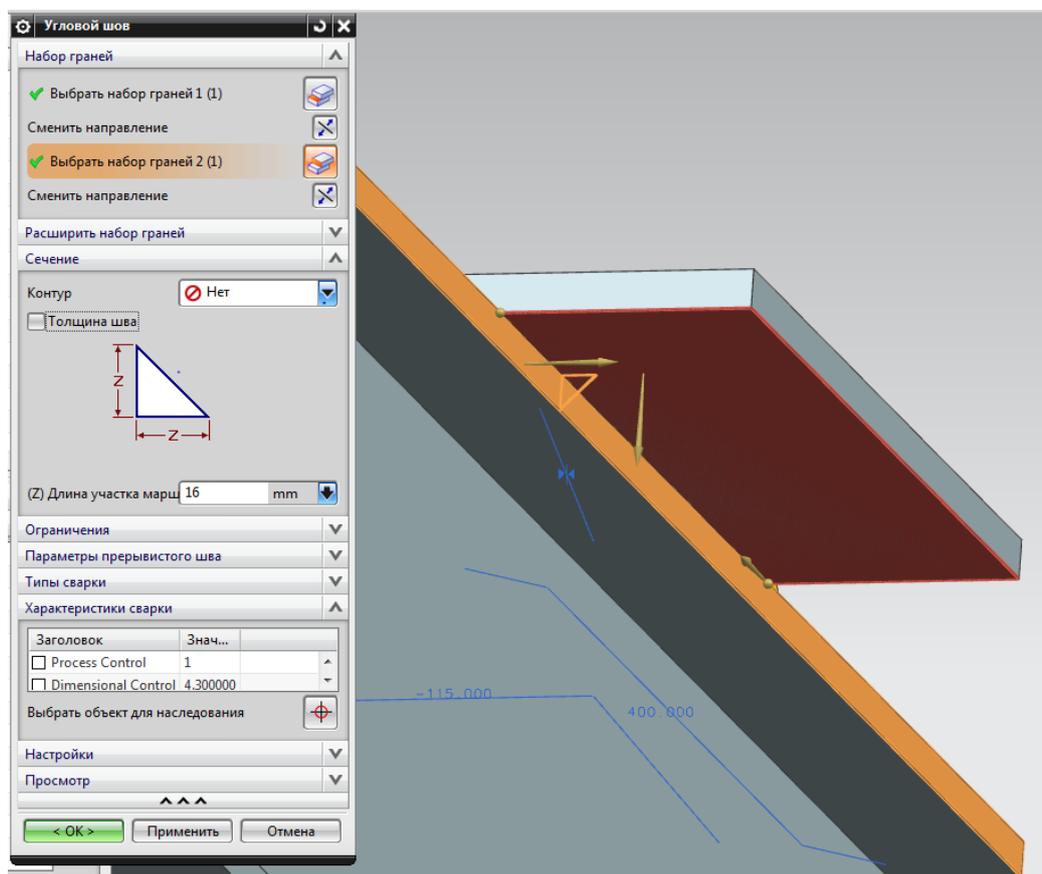


Рисунок 3.76 – Создание таврового соединения

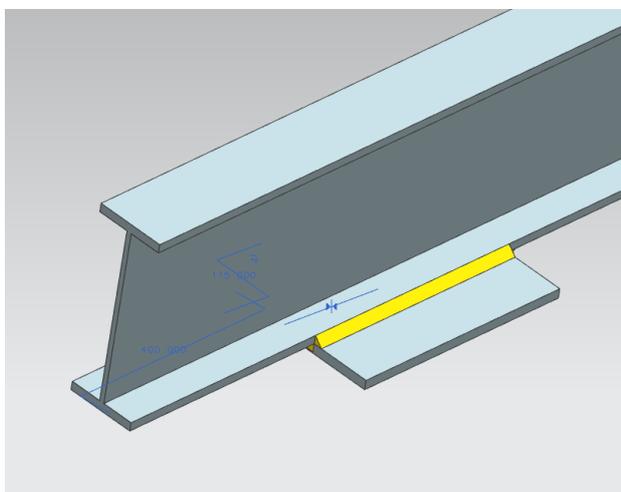


Рисунок 3.77 – Тавровый шов

На рисунке 3.78 показано, как отображаются сварные швы в навигаторе модели модели, они входят в историю модели, содержат информацию о гранях которые они соединяют – в виде зависимостей. Двойным щелчком по выбранному соединению в навигаторе модели можно вызвать его диалоговое окно с настройками и редактировать их.

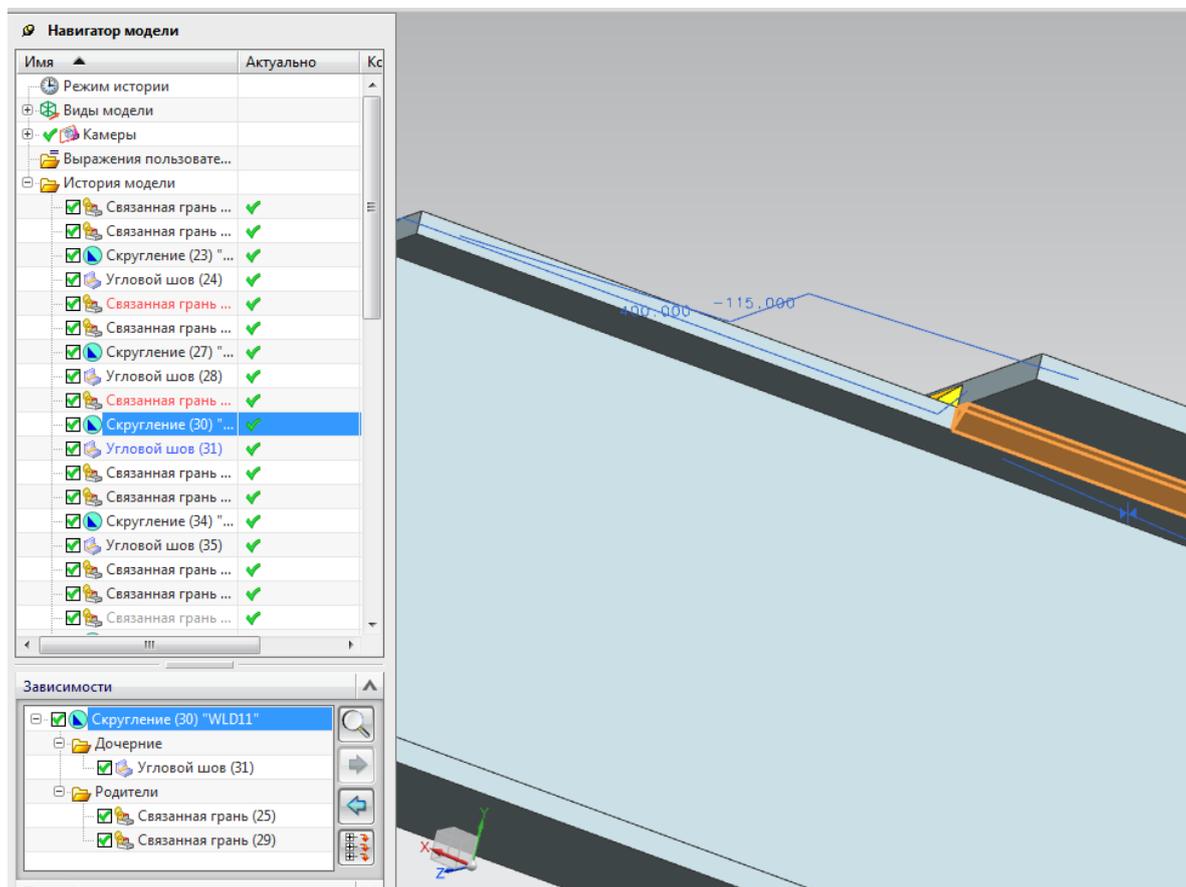


Рисунок 3.78 – Отображение швов в навигаторе модели

На рисунках 3.79, 3.80 видим спроектированную балку-монорельс, состоящую из нескольких элементов, на которой смоделированы все сварные соединения. Теперь 3D-модель сварной конструкции готова к обработке в САЕ модуле NX Advanced Simulation для анализа методом конечных элементов решателем NX Nastran.

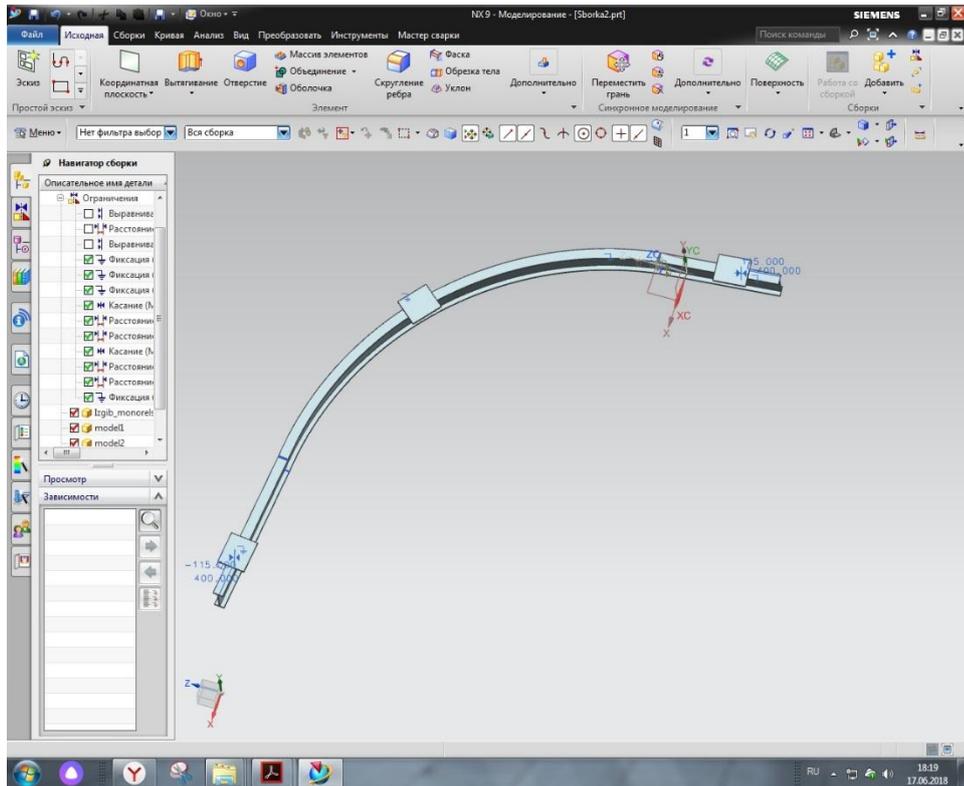


Рисунок 3.79 - Сварная конструкция, подвесная балка-монорельс

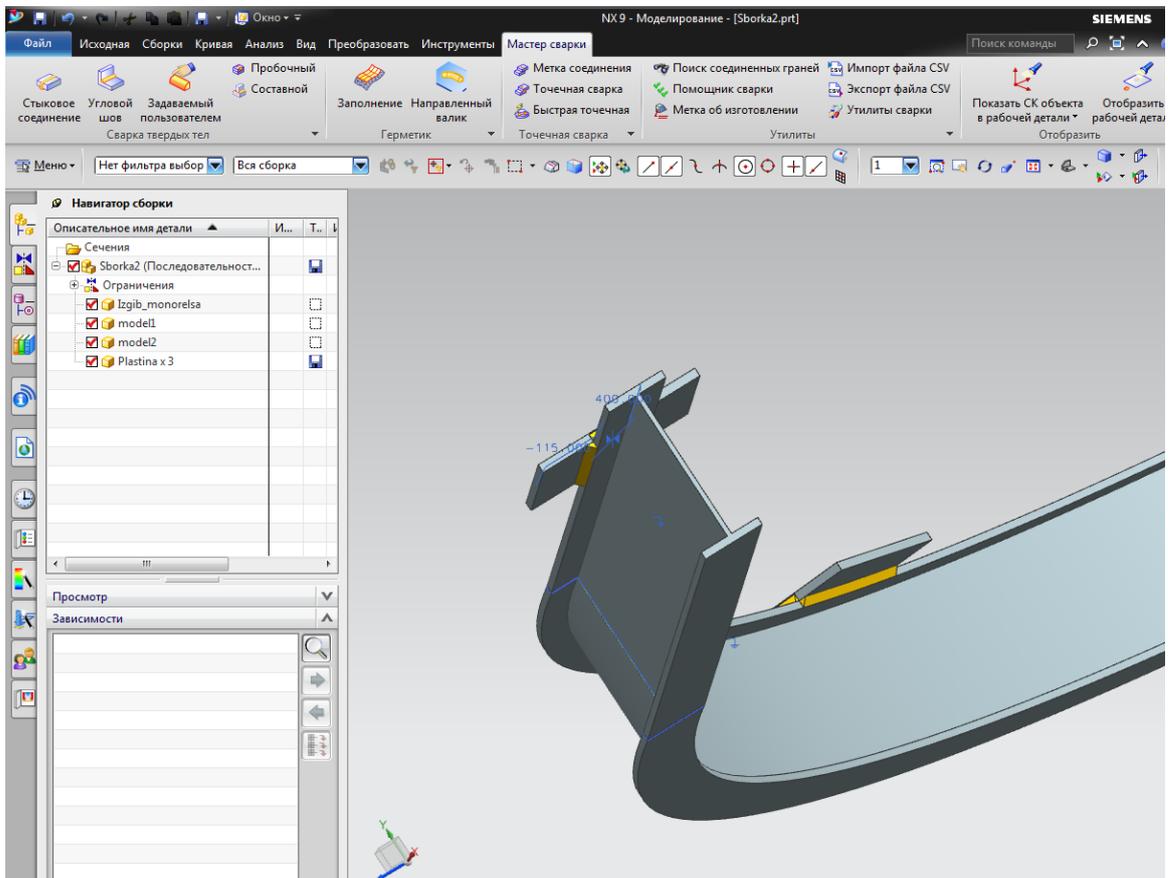


Рисунок 3.80 – Сварные швы на балке

Примеры создания угловых швов. Выбор места сварки и задание параметров углового шва (рисунок 3.81, 3.82).

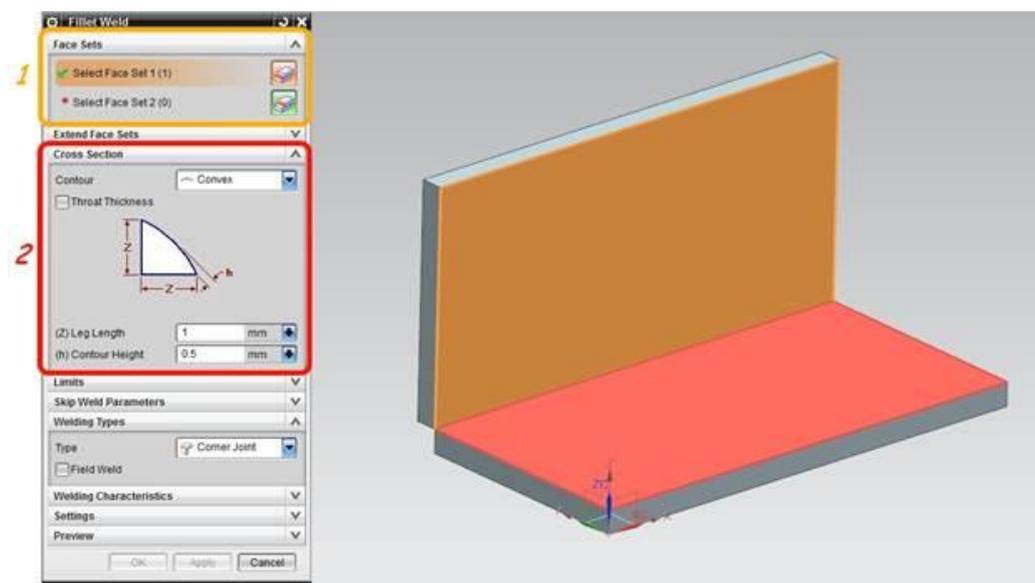


Рисунок 3.81 - Выбор места сварки

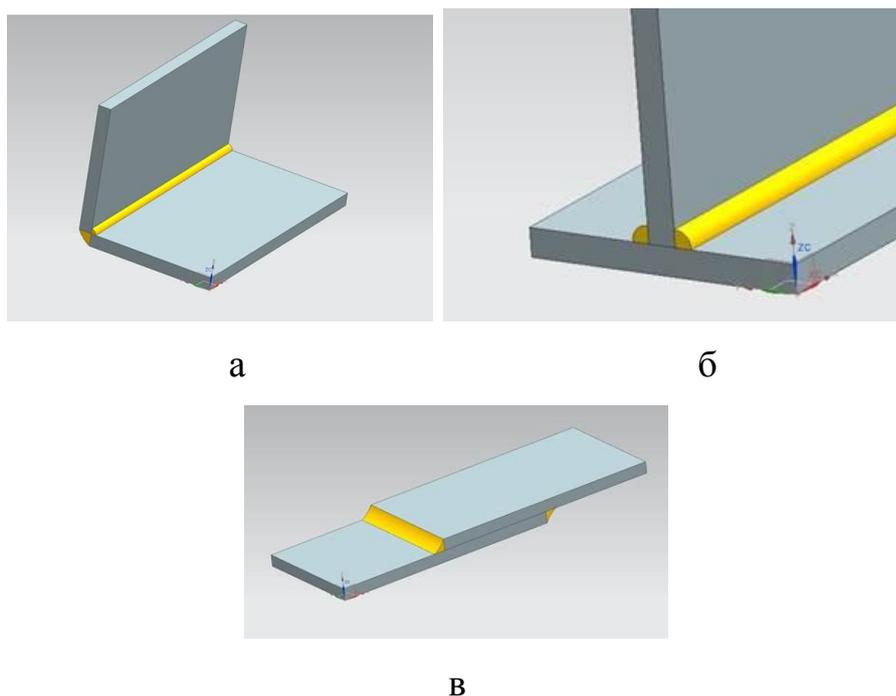


Рисунок 3.82 - Соединение: а - угловое; б - тавровое; в - нахлесточное

Нестандартные сварные швы. Эта команда используется для задания твердого тела, как тип пользовательской сварки. Это полезно, когда необходимо задать пользовательскую сварку, которую нельзя получить

стандартными методами элемента «Сварка». Пользовательская сварка имеет те же свойства, что и другие элементы типа «Сварка».

Можно выполнить следующее:

- Использовать любую допустимую технику моделирования для моделирования формы сварного шва.
- Назначить атрибуты твердому телу для идентификации его как сварного шва.
- Твердое тело отображается как элемент «Сварка» в «Навигаторе модели» и используется в расчетах длины и объема сварного шва.
- Создать символ ТУ для сварки в то же время, когда создаете пользовательскую сварку.
- Открыть пользовательскую сварку в диалоговом окне Фильтр атрибутов сварки.
- Пользовательская сварка также отображается в диалоговом окне «Уточненная фильтрация», когда для фильтра выбора задается значение «Объекты сварки».
- Публиковать пользовательские сварки в Teamcenter как отдельные сварные объекты.

Задаются атрибуты свойств пользовательской сварки с помощью диалогового окна «Настройки по умолчанию». Можно включить получение значений из списка, задать атрибуты как обязательные и задать значения по умолчанию для атрибутов.

Удалить из сборки файл детали, которая выбрана как соединенная деталь. В результате элемент «Сварка» станет удержанным и будет обозначен значком удержания в «Навигаторе модели». Можно сделать элемент «Сварка» допустимым вновь, выбрав новые компоненты в сборке.

Расположение команды: вкладка «Мастер сварки» (Weld Assistant) – группа «Сварка твердых тел» (Solid Weld) – команда «Задаваемый пользователем» (User Defined). Условные обозначения сварных соединений на чертежах устанавливаются ГОСТ 2.312-72 «Условные изображения и обозначения швов сварных соединений».

Окно (рисунок 3.83), открывается при установленной галочке «Создать объект ТУ» в разделе «Настройки только для Стыкового соединения», «Углового шва», «Пробочного шва» и «Пользовательской сварки».

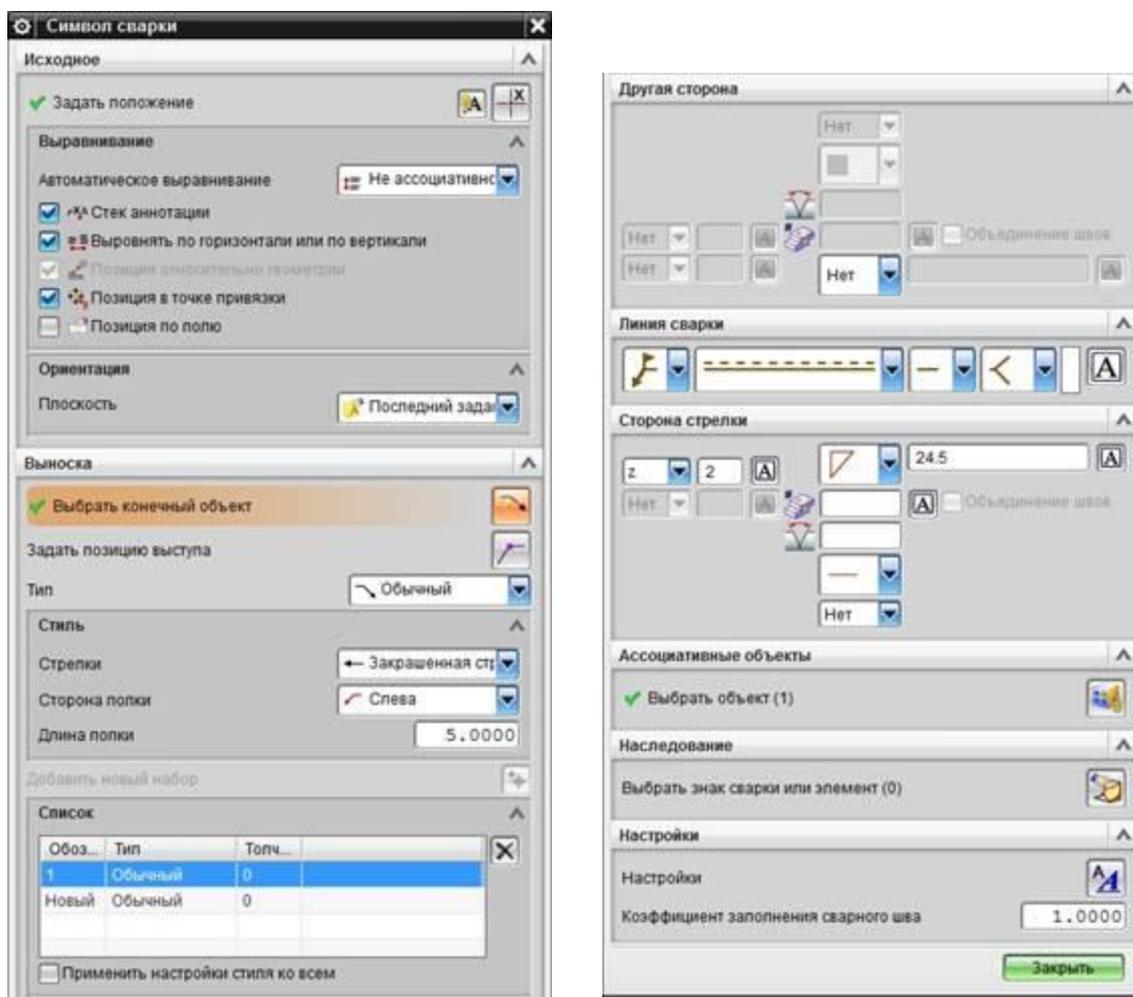


Рисунок 3.83 - Окно параметров пользовательской сварки

3.4 Выводы по третьей главе

На данном этапе исследования была предложена методика пошагового построения моделей в NX. Были спроектированы модели деталей, рассмотрен интерфейс приложения и инструментов для моделирования. Был представлен процесс создания сборки, рассмотрены инструменты, которые представлены в модуле «Сборки».

Была получена модель сварной конструкции, на примере которой изучены возможности и интерфейс модуля сварки - NX Weld Assistant.

Модуль предназначен для моделирования сварных соединений. Модуль предоставляет информацию о сварных швах и соединениях для выполнения анализа методом конечных элементов. В приложении автоматически создается 2D документация и аннотации на основе 3D элементов сварки. В приложении смоделированы сварные швы конструкции, тем самым обеспечена возможность проведения анализа методом конечных элементов в NX Nastran.

Глава 4 Инженерный анализ 3D-модели сварной конструкции методом конечных элементов

4.1 Алгоритм работы в NX Advanced Simulation

1. Запуск программы NX.
2. Создание нового файла или открытие файла, с которым ведется работа (см. пункт 3.1, рисунок 3.1).
3. Для проведения CAE расчета созданной модели сборки сварной конструкции необходимо запустить приложение «Расширенная симуляция» (рисунок 4.1).

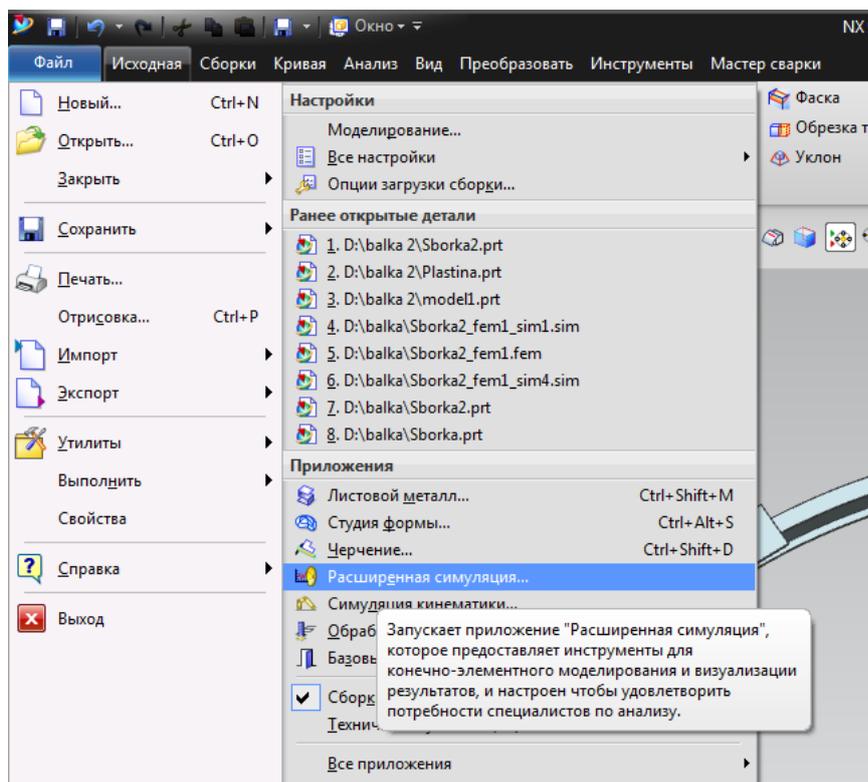


Рисунок 4.1 - Запуск приложения «Расширенная симуляция»

4. В навигаторе симуляции вызываем контекстное меню, в списке которого выбираем строку «Новая КЭ модель и симуляция» (рисунок 4.2). При выборе «Новая КЭ модель», симуляцию и меню «Решение» придется создавать дополнительно.

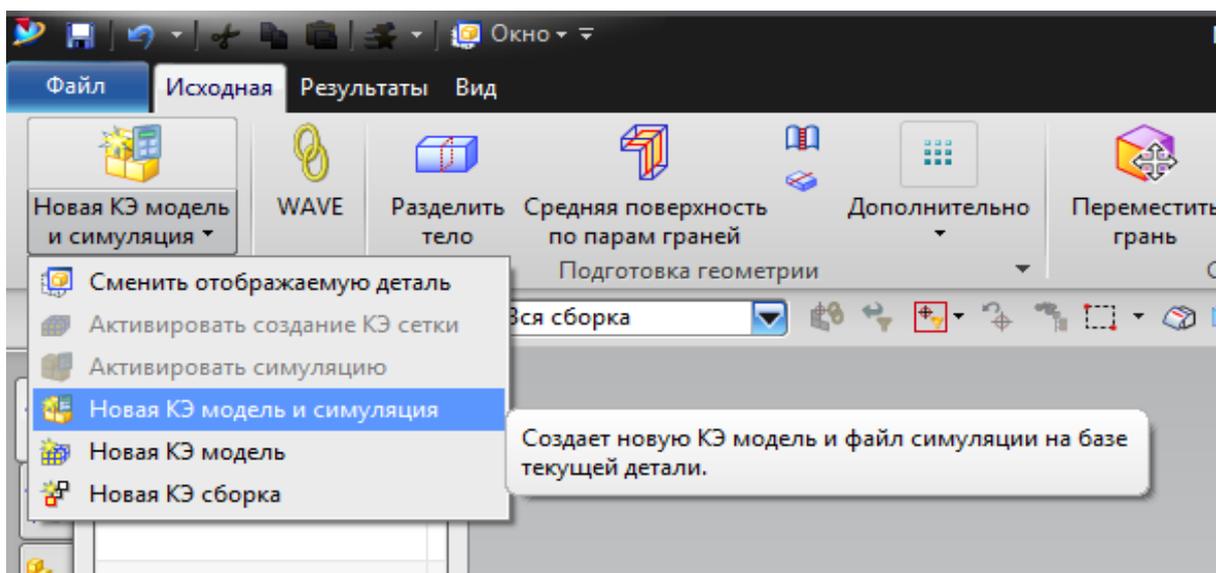


Рисунок 4.2 - Команда создания «Новая КЭ модель и симуляции»

5. В открывшемся окне диалога проверяем название решателя, тип анализа, выбранное тело, видим имена файла с расширением Fem1.fem и Sim1.sim, нажимаем подтверждение «ОК» (рисунок 4.3).

6. Всплывает диалоговое окно «Решение». Здесь необходимо задать имя, выбрать решатель NX Nastran из списка, задать тип - структурный, 2D тело - нет, Тип решателя определяем исходя из потребности задания решения, оставляем - SQL 101 линейная статика общие ограничения. Имеется много гибких настроек, возможность учитывать или опускать различные моменты и процессы, и возможность вносить пользовательские изменения.

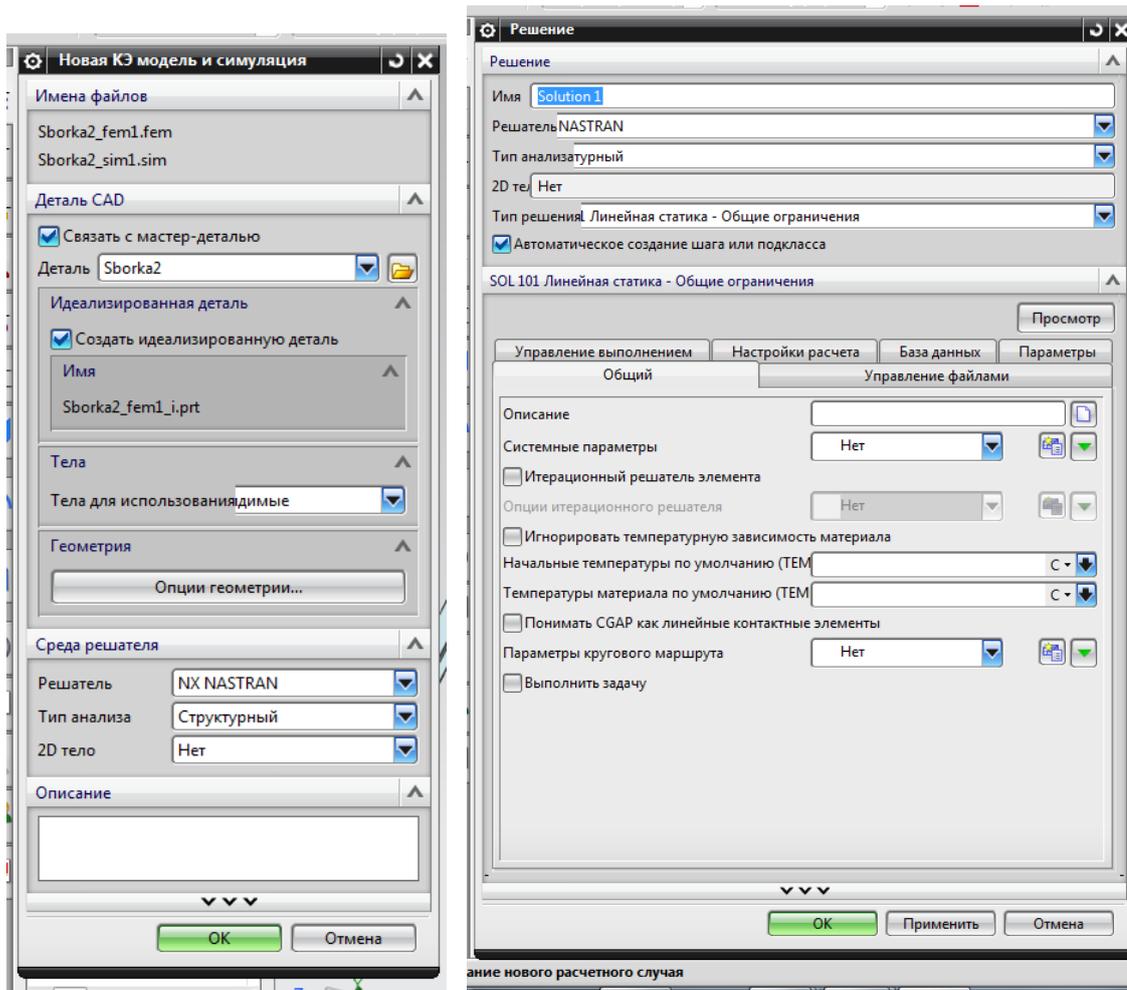


Рисунок 4.3 - Выбор параметров создания новой КЭ и симуляции

После введения основных полей, открываем вкладку «Настройки расчета» (рисунок 4.4). Вызываем опцию «Изменить» в конце строки «Запросы вывода». В обновленном окне диалога изменяем по необходимости параметры, которые будем получать в виде результатов. Устанавливаем галочки во вкладках, которые хотим видеть в результате, и завершаем работу с окном нажатием «ОК».

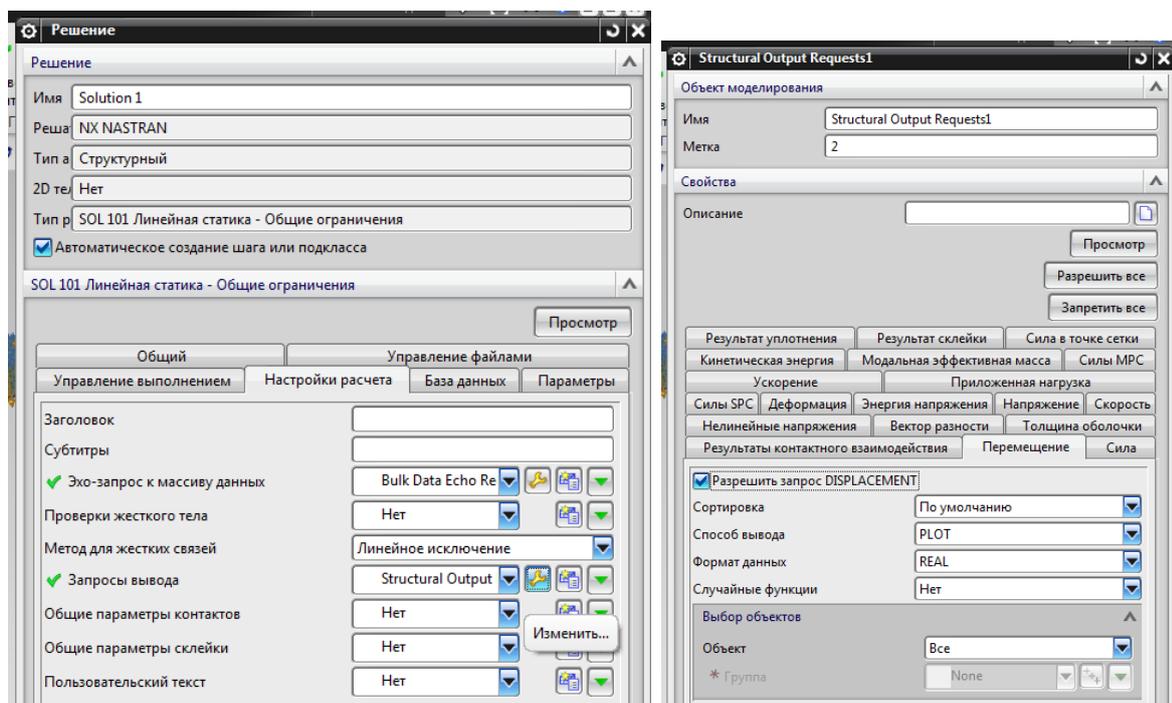


Рисунок 4.4 - Возможности меню «Решение»

Во вкладке настройки расчета вызвав опцию «Изменить» напротив строки «Нелинейные параметры». Обновленное окно (рисунок 4.5) даёт возможность осуществить настройку количества шагов симуляции - число приращений и максимум итераций на приращение нагрузки. Флаг промежуточного вывода - для вывода результата после каждого шага расчета. Подтверждение изменений - «ОК».

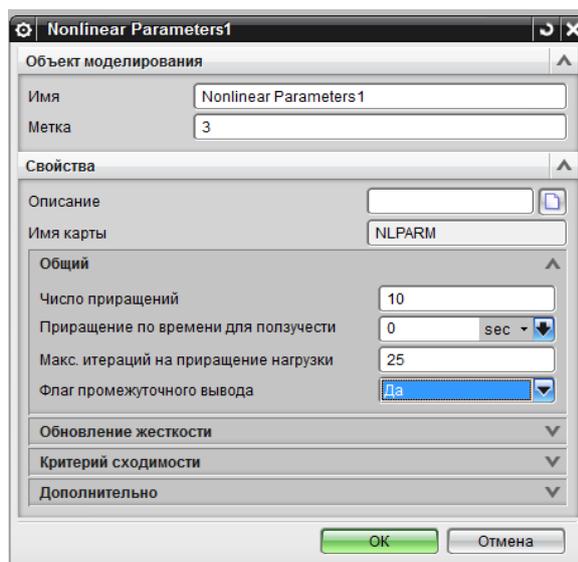


Рисунок 4.5 - Меню «Нелинейные параметры»

7. На данном этапе файл _fem1.fem содержащий в себе данные о конечно-элементной сетке, автоматически становится активным.

8. Для применения к сборке сетки, разбивающей модель на конечные элементы, необходимо выбрать на панели инструментов опцию 3D четырёхгранный (рисунок 4.6).

9. В открывшемся диалоговом окне выбираем тело, тип сетки CTETRA 4. Параметр размера элемента сетки назначаем равный толщине детали или автоподбор. Ставим при необходимости галочки для произведения более регулярной сетки, автоматического исправления ошибок элементов и минимум 2 элемента по толщине (рисунок 4.7).

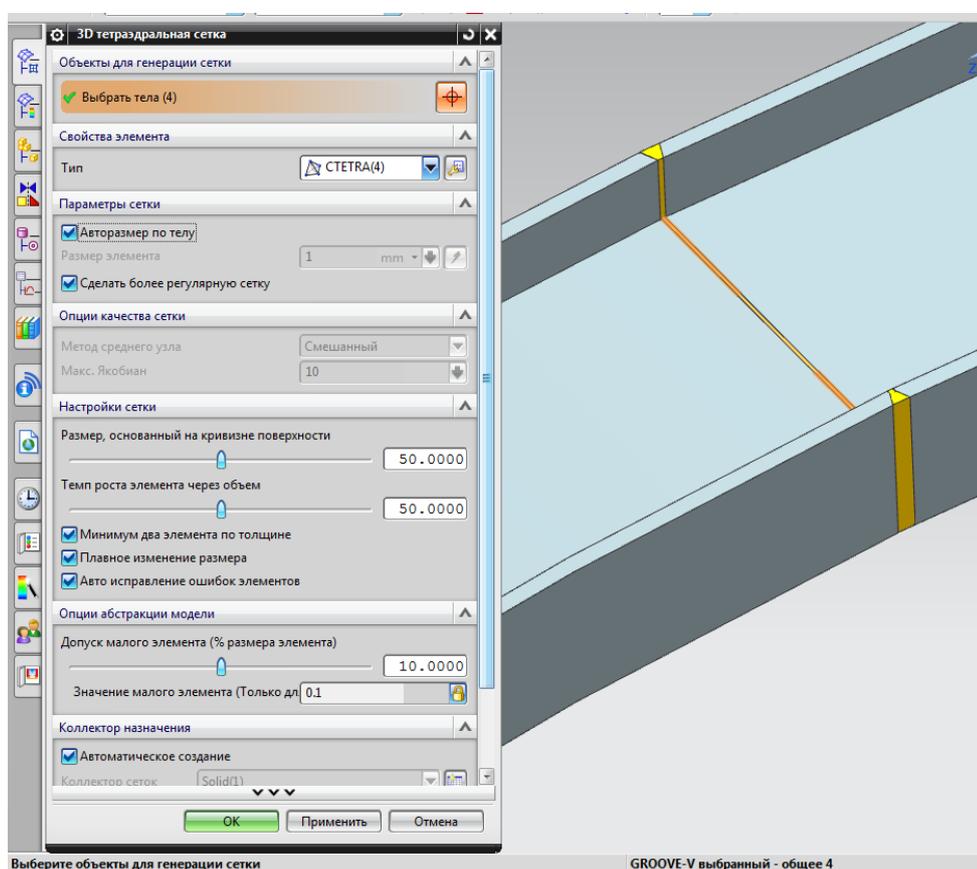


Рисунок 4.6 - Создание конечно-элементной сетки

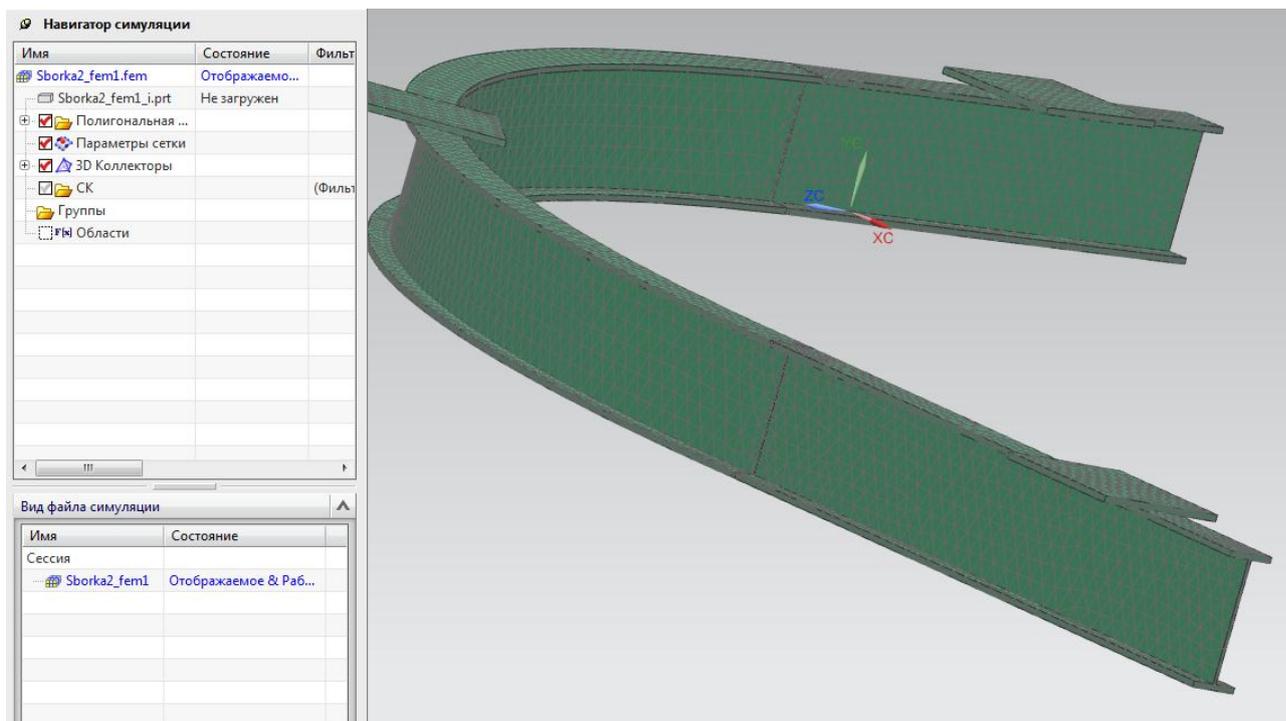


Рисунок 4.7 – Модель с построенной конечно-элементной сеткой

10. Задаем материал для тела. Для добавления необходимого материала его потребуется создать, т.к. библиотека материалов ограничена.

Материалом балки будет являться строительная сталь С345, в промышленности её обозначение 09Г2С. Параметры материала представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры стали С345

Характеристика материала		Единица измерения	Величина
Плотность		кг/мм ³	$7,85 \times 10^{-6}$
Модуль Юнга		мН/мм ² (кПа)	$2,06 \times 10^8$
Коэффициент Пуассона			0.3
Тип нелинейности			1
Функция критерия текучести			1
Правило упрочнения			1
Предел текучести		мН/мм ² (кПа)	$34,5 \times 10^4$
Начальная деформация		мм/мм	0,02
Показатели степени жесткости			0,22
Модуль пластичности		Н/мм ²	976
Коэффициенты анизотропии	R0		1,66
	R45		1,66
	R90		1,66

Для создания материала необходимо создать новую или открыть уже существующую модель. Вызывается диалоговое окно «Управление материалами» («Меню» → «Инструменты» → «Материалы» → «Управление материалами») (рисунок 4.8).

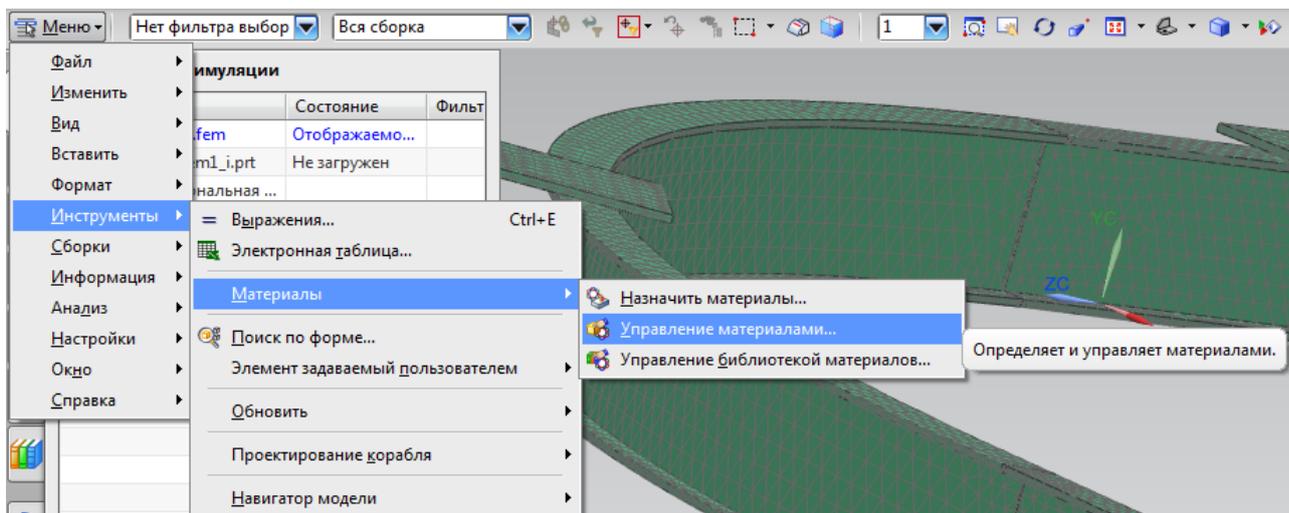


Рисунок 4.8 – Расположение функции управления материалами

Установить в строке «Список материалов» → «Локальные материалы» (рисунок 4.9).

В списке «Тип» задать тип создаваемого материала. Кликнуть опцию «Создать».

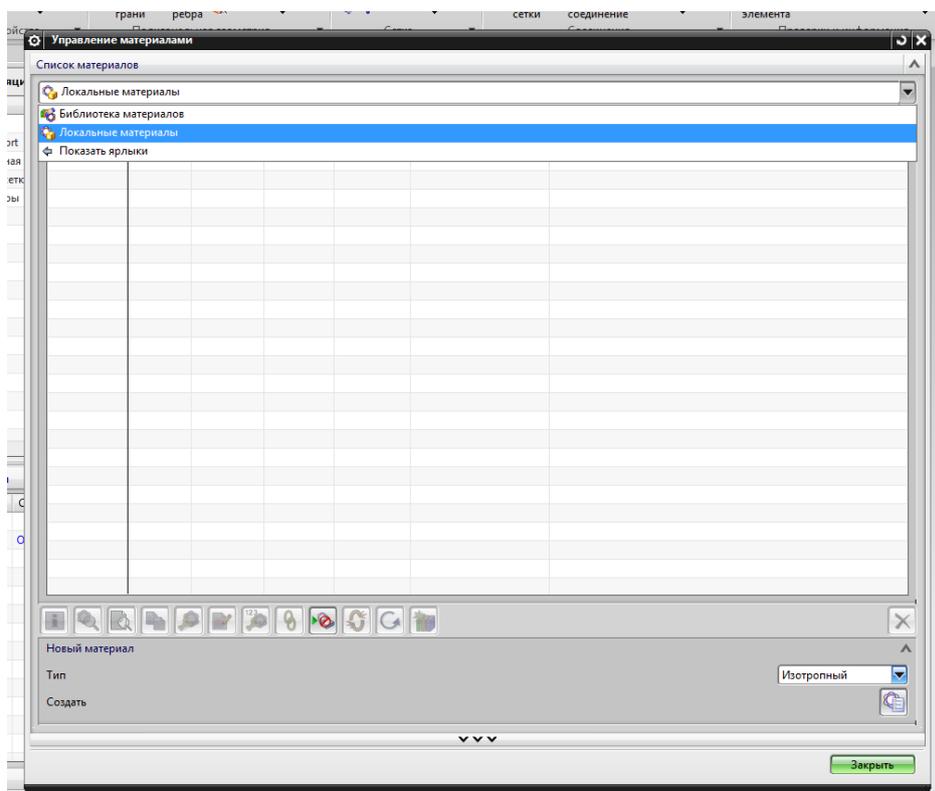


Рисунок 4.9 – Список материалов

В появившемся окне диалога необходимо указать параметры создаваемого материала (рисунок 4.10).

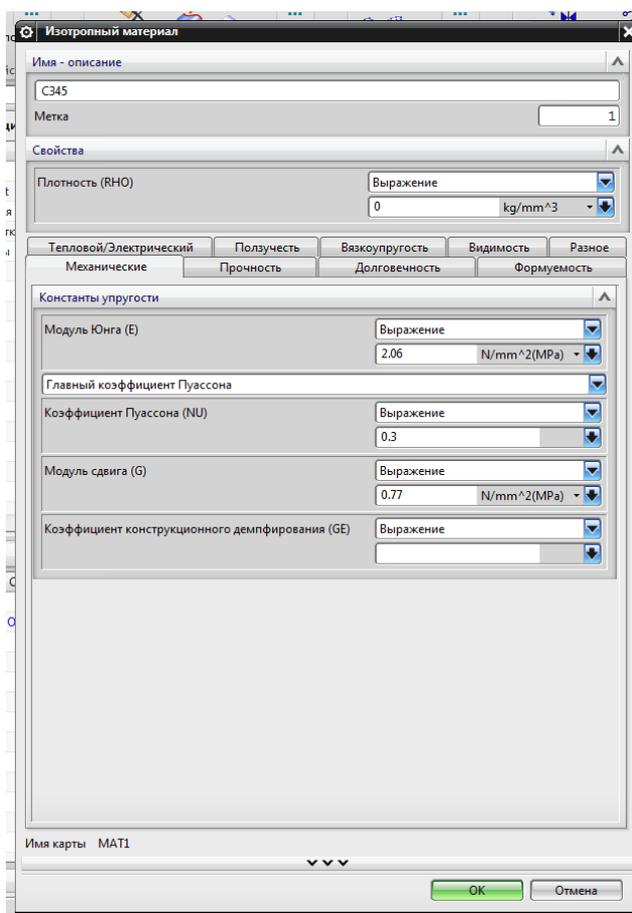


Рисунок 4.10 – Окно параметров материала

Диалоговое окно параметров материала содержит следующие основные функции:

а - раздел «Имя – описание» (предназначен для назначения имени и описания нового материала);

б - раздел «Свойства» (предназначен для назначения свойств создаваемого материала).

8. После завершения работы с диалоговым окном создания материала необходимо нажать клавишу «ОК».

Теперь, для применения этого материала в навигаторе симуляции, вызываем контекстное меню нажатием правой кнопки мыши по строке Solid(1) – «Изменить» (рисунок 4.11). В появившемся окне диалога вызовите опцию «Изменить» (рисунок 4.12) – «Выбрать материал». В открывшемся списке выберите материал С345 (рисунок 4.13) – ОК.

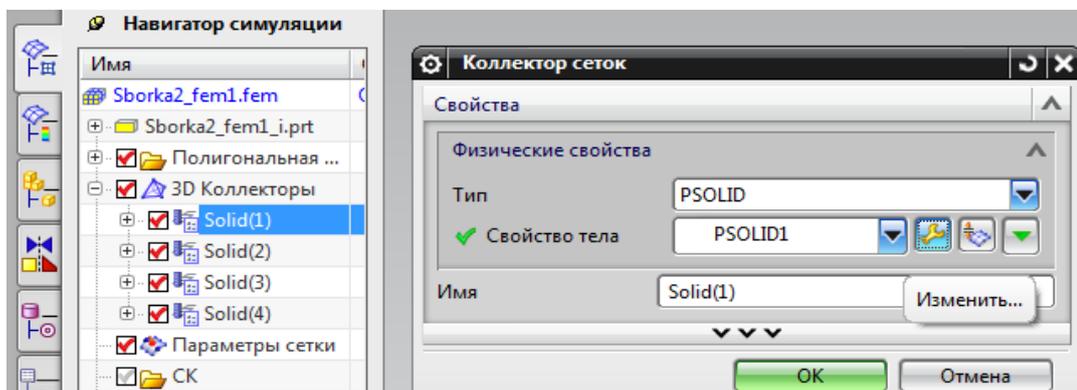


Рисунок 4.11 - Изменение свойств тела

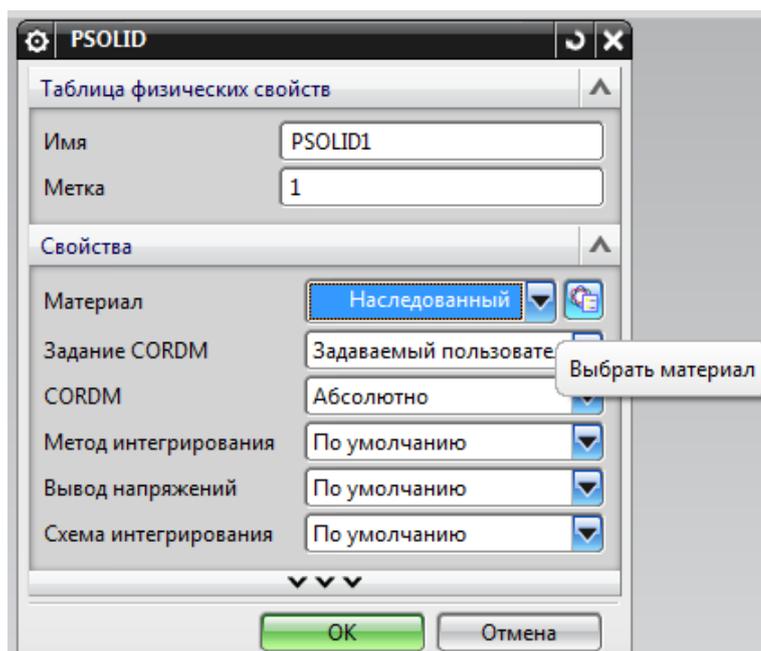


Рисунок 4.12 - Изменение материала

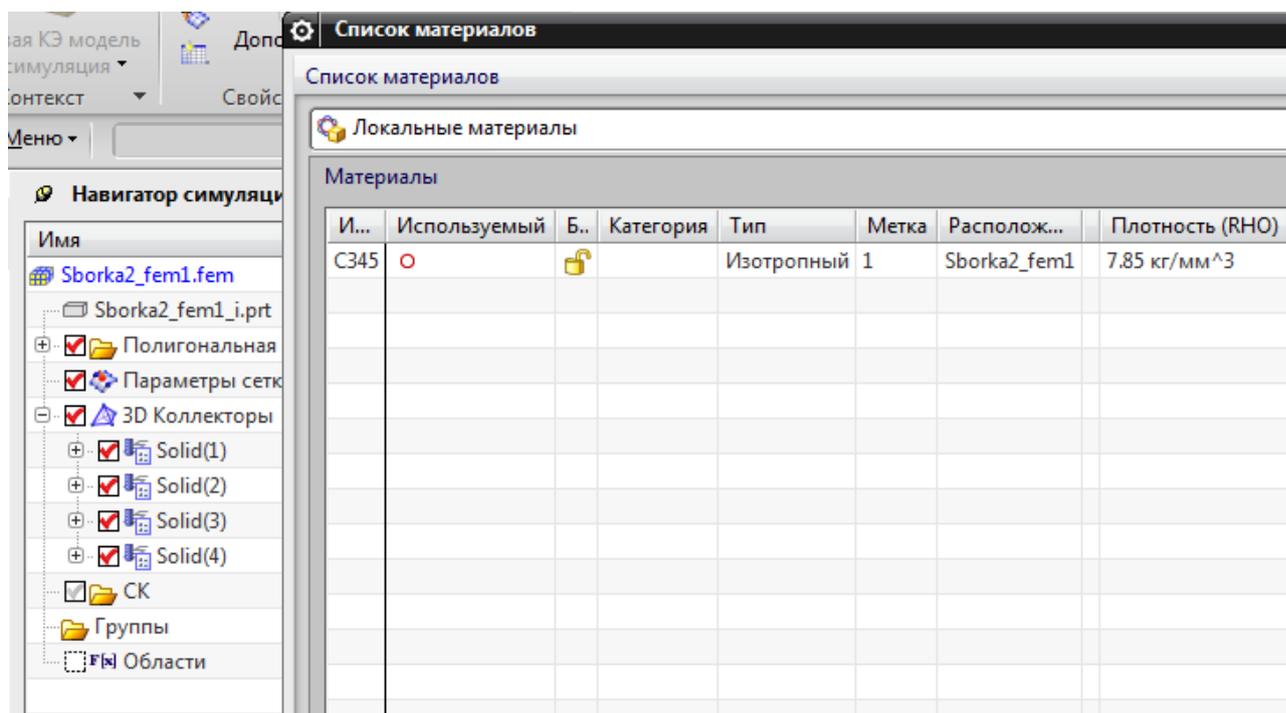


Рисунок 4.13 - Выбор материала

11. Активируем файл симуляции, для этого в навигаторе симуляции двойным щелчком выбираем строку «_sim1.sim». Выполним переход на верхний уровень в окне «Вид файла симуляции» (рисунок 4.14).

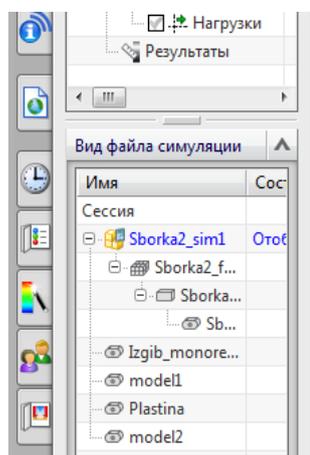


Рисунок 4.14 - Окно «Вид файла симуляции»

12. Выбираем команду «Тип объекта симуляции» – «Контакт поверхность-поверхность» – «Создать пары граней автоматически» и выделяем всю сборку - «ОК» (рисунок 4.15).

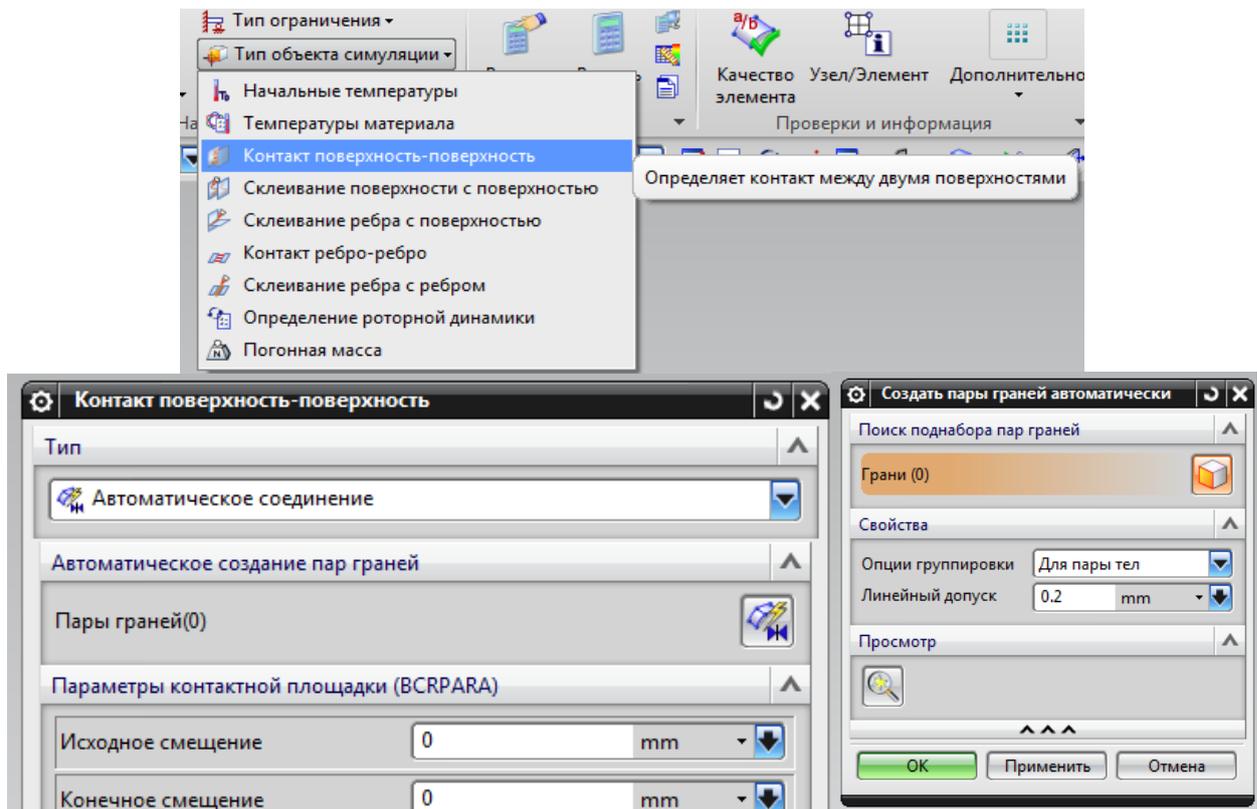


Рисунок 4.15 - Создание контакта между поверхностями деталей сборки

13. Применяем ограничения. На панели инструментов выбирается опция «Тип ограничения» (рисунок 4.16).

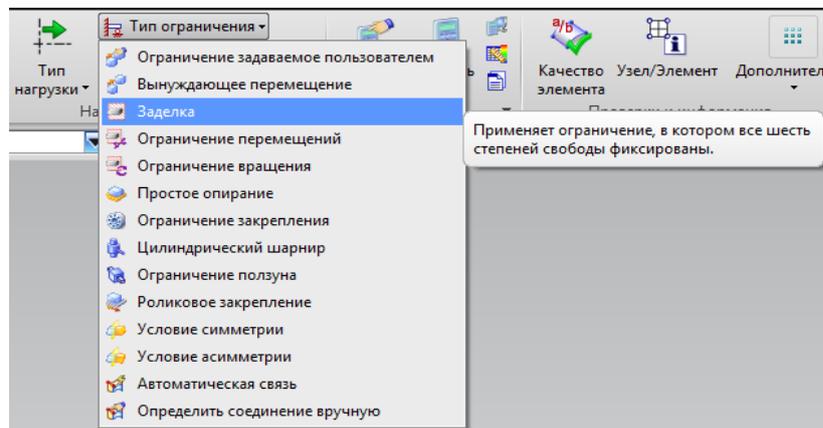


Рисунок 4.16 - Задание ограничения

14. Задаём нагрузку «Панель инструментов» - опция «Тип нагрузки» - выбор нагрузки, которую хотим применить (рисунок 4.17). В открывшемся меню диалогового окна вводим необходимые величины применяемой нагрузки, применяем - ОК.

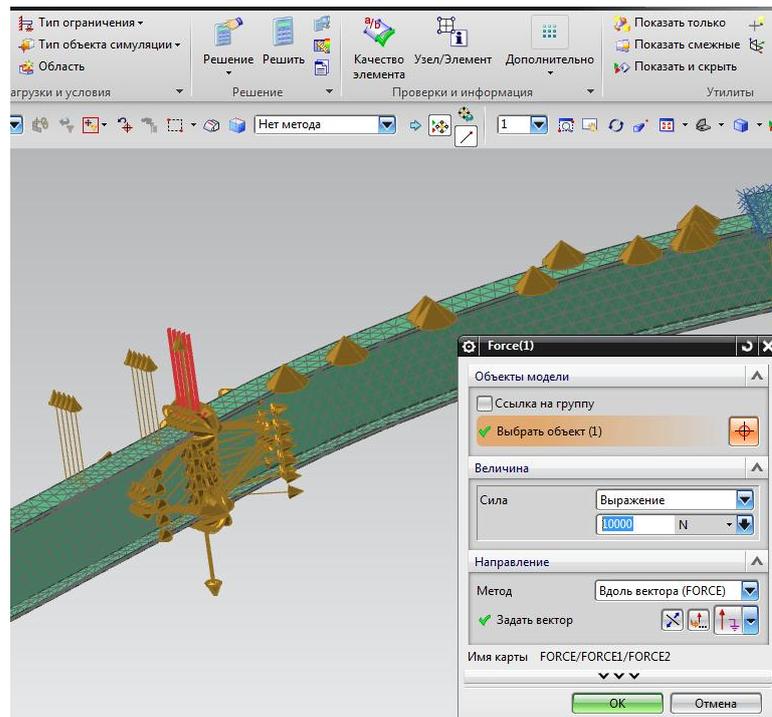


Рисунок 4.17 - Задание нагрузки

15. В навигаторе симуляции перенесите с помощью мыши содержимое из контейнеров нагрузки и ограничений в соответствующие группы «Ограничение» и «Нагрузка для симуляции» (рисунок 4.18).

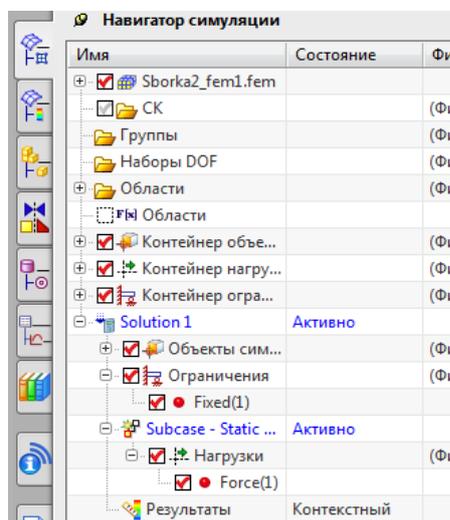


Рисунок 4.18 - «Ограничения» и «Нагрузка»

16. В навигаторе симуляции вызовите контекстное меню для строки с симуляцией, вызовите опцию «Решить» (рисунок 4.19). В появившемся окне

оставьте все значения по умолчанию. Нажмите клавишу ОК. Второй вариант запуска решения – выбор опции на панели инструментов.

В результате запустится решатель NX Nastran. При завершении расчета в окне монитора решений появится строка «Задача выполнена». Закрываем все окна решения.

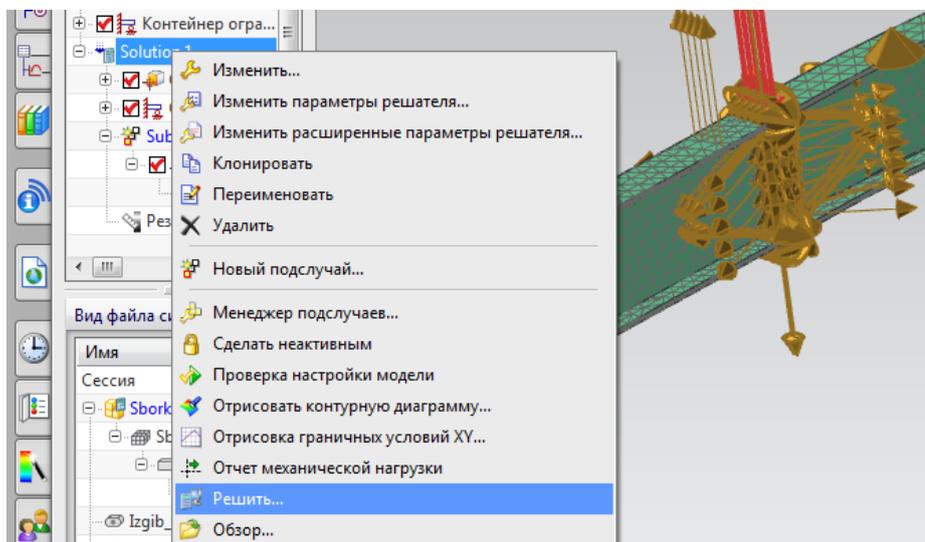


Рисунок 4.19 - Вызов опции «Решить»

17. В навигаторе симуляции вызываем опцию «Результаты» (рисунок 4.20).

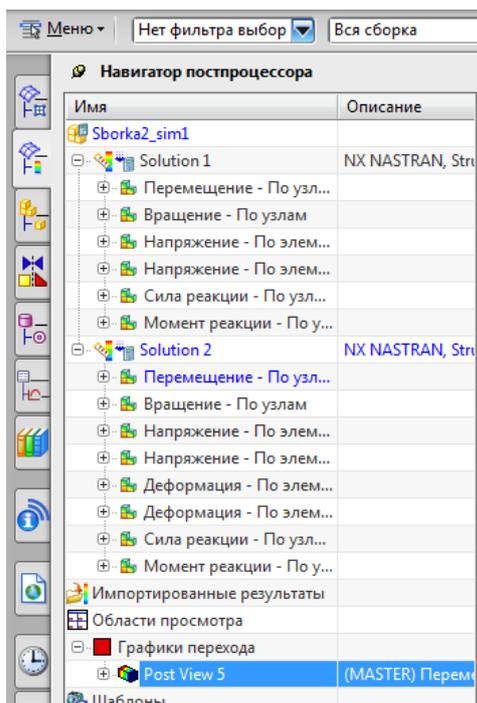


Рисунок 4.20 – Выбор результатов в навигаторе постпроцессора

Для просмотра результатов доступны выбранные на этапе настройки решателя параметры, которые можно открывать по отдельности и запускать воспроизведение симуляции. Есть возможность отображения начального вида геометрии сборки, для этого на панели инструментов вызовите опцию «Изменить вид постпроцессора» – в появившемся окне откройте вкладку «Ребра и грани» – выберите в списке «Грани» строку «Прозрачный». Откройте вкладку «Отобразить» – установите галочку напротив опции «Показать недеформируемую модель». Нажмите клавишу «ОК». Запустите симуляцию.

Результаты, представленные на рисунке 4.21-4.24 показывают, что при заданных нагрузках с установленными для балки ограничениями расчет на перемещение по узлам показал наибольшее перемещение равное 0.205 мм. То есть не критическое и не значительное изменение в геометрии конструкции произошло, и далее необходимо оценить степень допустимости таких изменений. Также наглядно можно видеть, что наибольшее смещение и напряжение в структуре балки происходит не в самом сварном шве, а рядом с ним, что не противоречит многочисленным физическим испытаниям и примерам в сварке. Вывод результатов силы реакции по узлам - указывает места наибольшего взаимодействия конструкции в момент наложения силы. На представленном примере это места жёсткого крепления балки, то есть нагрузка на сварные соединения не критична и увеличивать прочность конструкции не требуется. Отображение результатов – «перемещение по узлам» (рисунок 4.21)

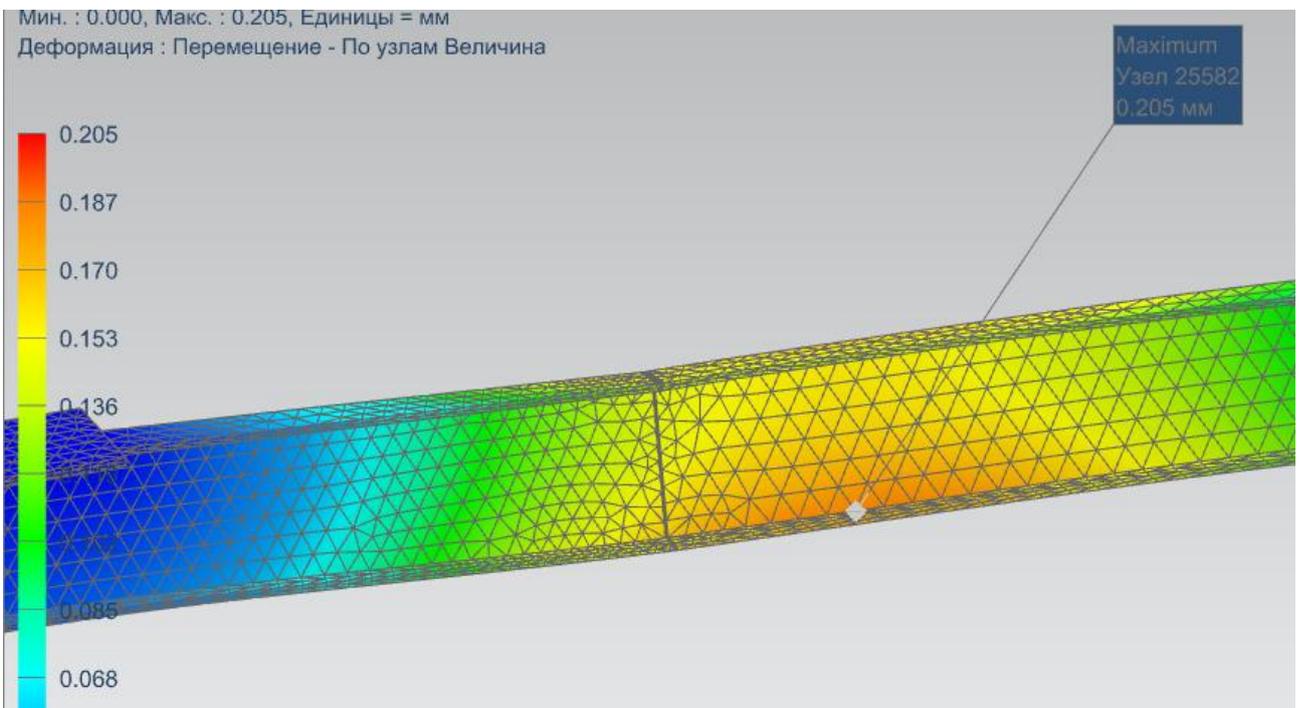
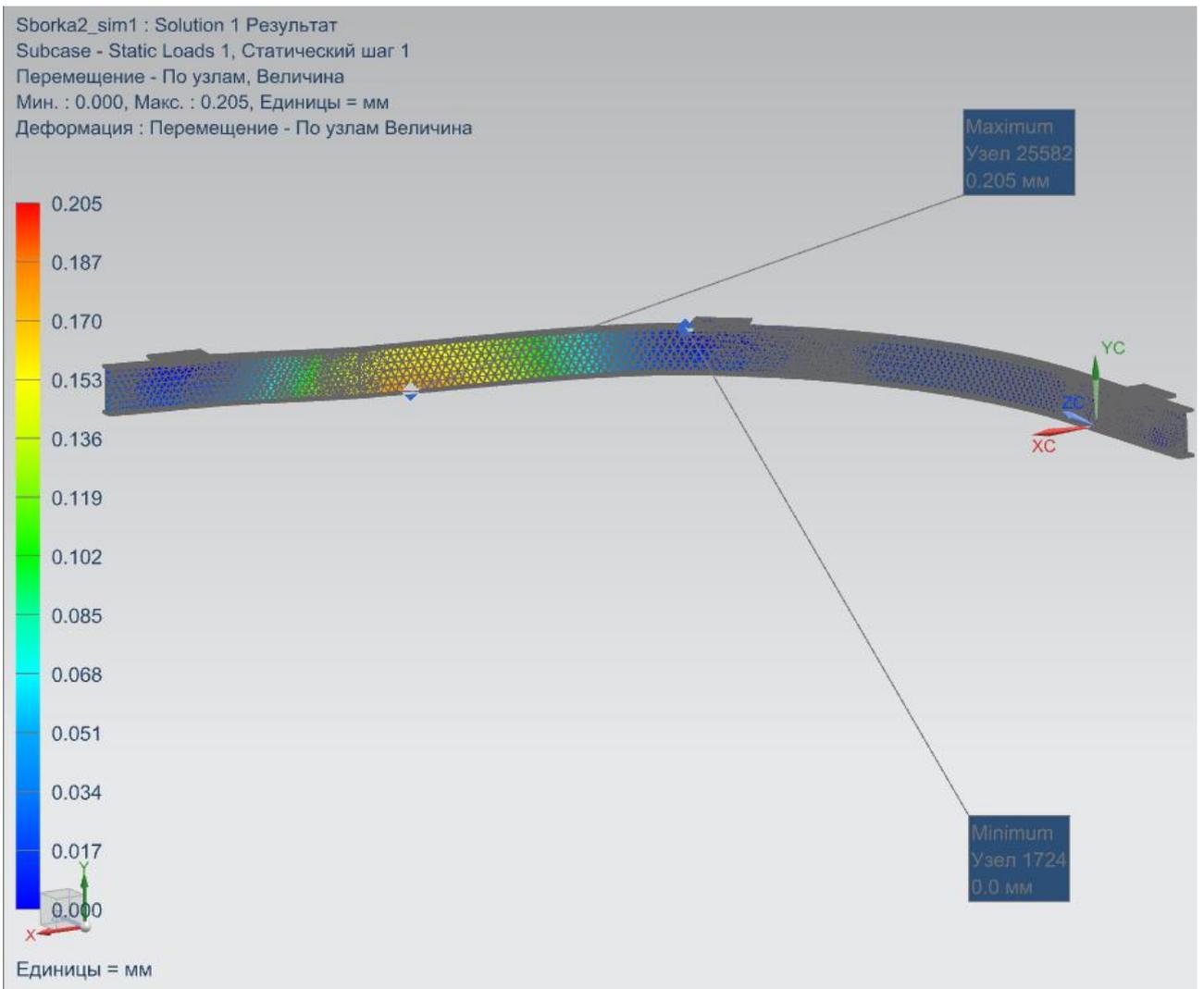


Рисунок 4.21 – Перемещение по узлам

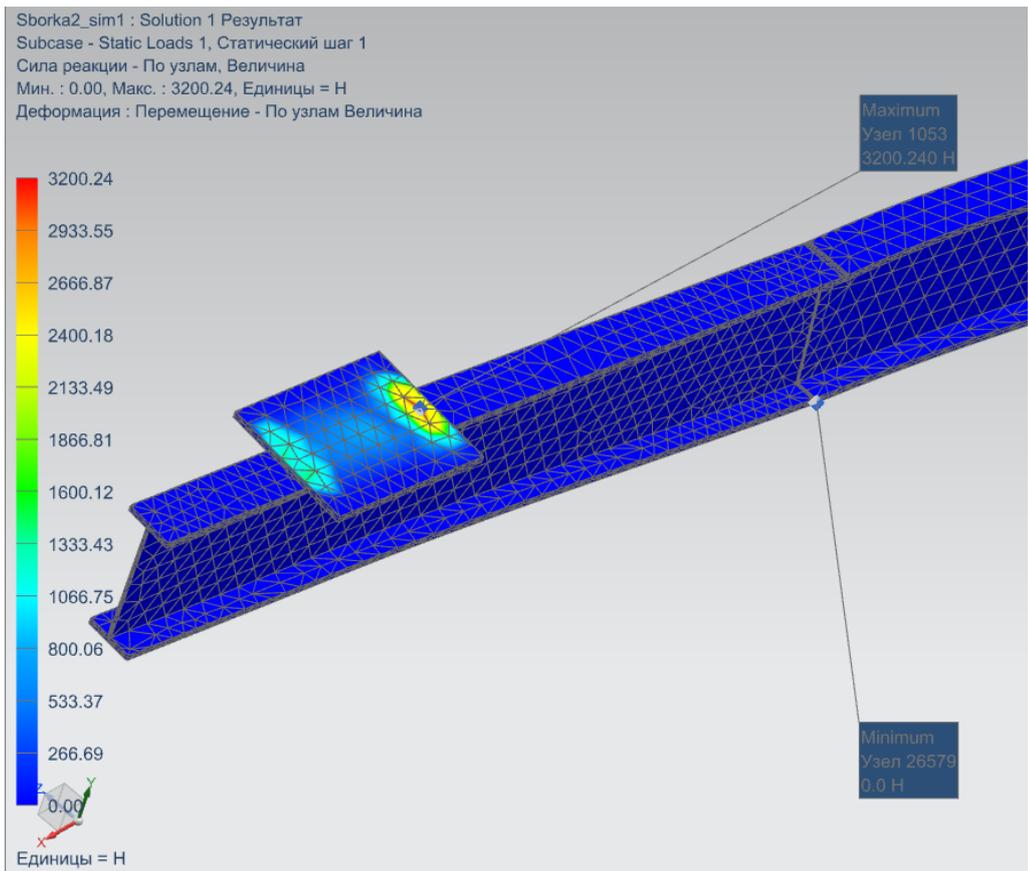


Рисунок 4.22 - Результаты симуляции «Сила реакции»

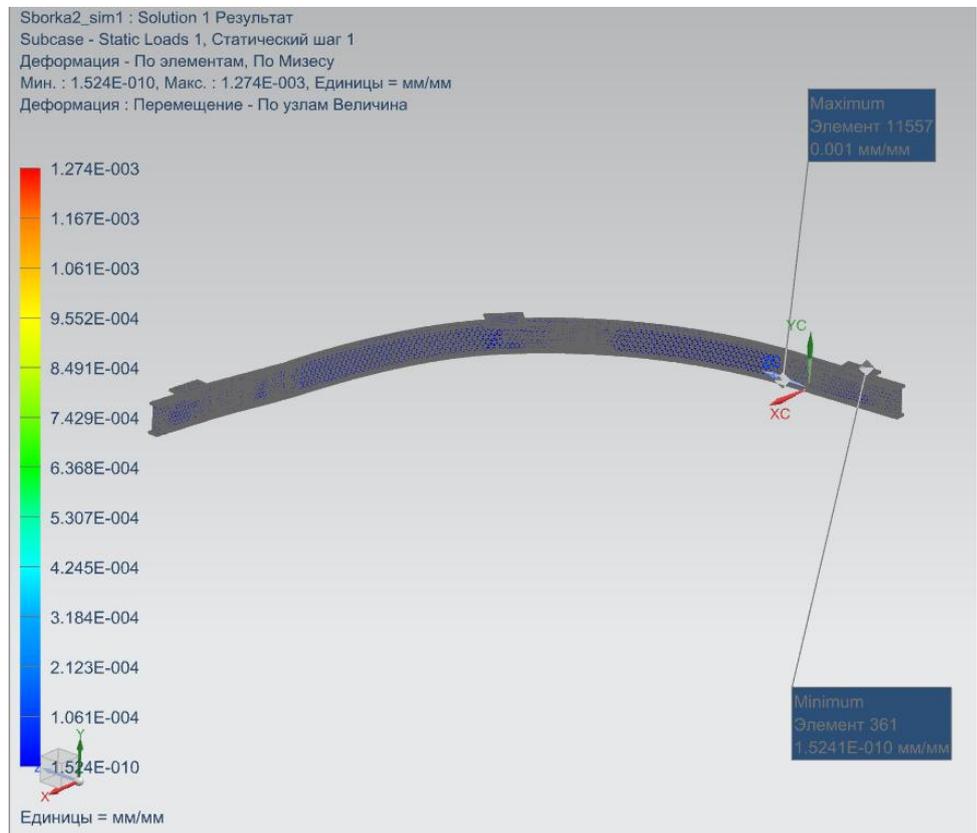


Рисунок 4.23 – Деформация по узлам

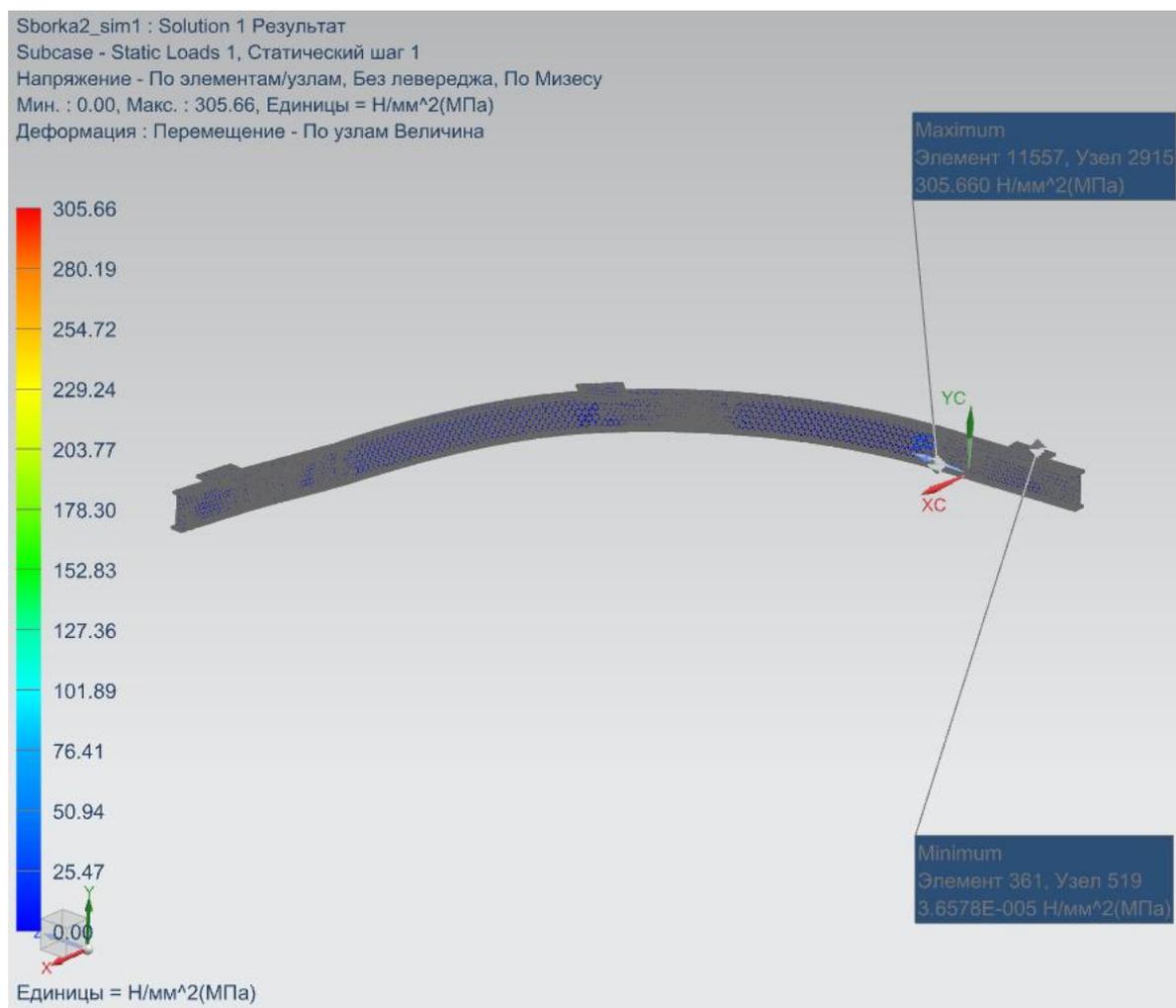


Рисунок 4.24 – Напряжение по элементам/узлам

4.2 Выводы по четверной главе

На данном этапе исследование было детально изучено модуль NX Advanced Simulation. Создан пошаговый алгоритм проведения инженерного анализа сварной конструкции с помощью приложения решателя NX Nastran. В алгоритм входит подробное описание действий с моделью, для того чтобы провести расчет: разбиение модели сборки на конечные элементы, объединение поверхностей сборки, задание ограничений и применение действующих сил. Были описаны действия для настройки различных параметров решателя для получения и вывода необходимых решений.

Заключение

1. Обзор САПР показал, что использование автоматизированных программ позволяет существенно повысить качество проектирования сварных конструкций, а также установить, что современные возможности моделирования стремительно развиваются в направлении повышения точности и отказа в дальнейшем от реальных испытаний в пользу смоделированных ситуаций.

2. Установлено, что основные методы проектирования сварных конструкций, основаны на физических расчетах прочности, ручного определения параметров конструкции, подбора разделок кромок швов, выбора метода и режимов сварки. Разработка методики проектирования сварной конструкции при помощи NX Weld Assistant и расчета модели в NX Nastran, позволяет повысить проектирования сварной конструкции за счет наличия вспомогательных баз материалов, сварных швов, документации и т.д.

3. Создана методика пошагового построения модели сварной конструкции на примере разработки модели балки-монорельса в NX Weld Assistant.

4. Разработан пошаговый алгоритм проведения инженерного анализа сварной конструкции с помощью инструментов модуля NX Advanced Simulation и возможностей решателя NX Nastran. Выполнен анализ полученных результатов конечно-элементного расчета, который показал, что спроектированная модель при нагружении, получает незначительное изменение геометрии с максимальной величиной смещения равной 0.2 мм, при этом напряжения от воздействия силы в основном приходятся на основную область балки, расположенную на расстоянии от сварного шва. Наибольшее взаимодействие конструкции проявляется в местах жесткого закрепления балки, в местах сварных соединений его нет, что говорит об отсутствии необходимости внесения изменений в конструкцию.

Список использованных источников

1. Гуляев, В.Г. Автоматизация проектирования технологических процессов сварки [Текст] / В.Г. Гуляев, И.А. Хармац // Журнал САПР и графика, 4/2008. С. 92-94.
2. Колчков, В.И. Метрология, стандартизация и сертификация сталей [Текст] : учеб. пособие для вузов. М.: Гуманитарный издательский центр ВЛАДОС, 2002. 287 с.
3. Масаков, В.В. Сварка нержавеющей сталей [Текст] : учеб. пособие для вузов / В.В. Масаков, Н.И. Масакова, А.В. Мельзитдинова; под. общ. ред. В. П. Сидорова. Тольятти: ТГУ, 2011. 184 с.
4. Одинцов, С.В. Электрод, журнал о сварке [электронный ресурс]. URL: <http://electrod.biz/tehnologii/vidji-svarnyix-konstruktsiy.html> (дата обращения: 15.04.2018).
5. Кондаков, А.И. САПР технологических процессов: учебник для вузов. М.: Академия, 2007. 227 с.
6. Лахтин, А.Н. Конструкционные материалы и термическая обработка сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1984. 370 с.
7. Берлинер, Э.М. САПР конструктора машиностроителя [Электронный ресурс] : учебник / Э.М. Берлинер, О.В. Таратынов. М.: Форум: ИНФРА-М, 2015. 288 с.: ил.
8. Макарова, Э.П. Сварка и свариваемые материалы. Справочник в 3-х т. / под общ. ред. В.Н. Волченко, т.1; Свариваемость материалов, под ред. Э.П. Макарова. М.: Металлургия, 1991. 528 с.
9. ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры [Текст]. Стандартиформ, 2010. 17 с.

10. ГОСТ 5264-80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры [Текст]. Взамен ГОСТ 5264-69; введ. 1981-07-01 М.: Стандартиформ, 2010. 12 с.
11. ГОСТ 8713-79. Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры [Текст]. Взамен ГОСТ 8713-70; введ. 1981-01-01. Стандартиформ, 2010. 7 с.
12. ГОСТ 16037-80. Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры [Текст]. ВЗАМЕН ГОСТ 16037-70; введ. 1981-07-01. Стандартиформ, 2010. 8 с.
13. Куркина, С.А. Проектирование сварных конструкций в машиностроении. Атлас / под ред. С.А. Куркина. М.: Машиностроение, 1975. 336 с.
14. Терентьев, В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 288 с.
15. Стеклов, О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. М.: Машиностроение, 1990. 383 с.
16. Интеллектуальные системы принятия проектных решений / А.В. Алексеев, А.Н. Борисов, Э.Р. Вилюмс и др. Рига: Зинатне, 1997. 320 с.
17. NX Nastran 8 Advanced Nonlinear Theory and Modeling Guide. 2011
18. Чернявский, А.О. Метод конечных элементов. Основы практического Применения. М.: Metallurgia, 1991. 106 с.
19. Сегерлинд, Л.Дж. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979 г. 304 с.
20. Гончаров, П.С. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. / П. С. Гончаров, И. А. Артамнов. М.: ДМК, 2012. 504 с.
21. 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 г. 477 с.
22. Водопьянов, В.И. Курс сопротивления материалов с примерами и

задачами / В. И. Водопьянов, А. Н. Савкин, О.В. Кондратьев. Волгоград: Стандарт, 1992. 287 с.

23. Гоц, А.Н. Расчёты на прочность при переменных напряжениях. Владимир: Искра, 2012. 139 с.

24. Ковтунов, А.И. Исследование жидкофазных процессов формирования слоистых композиционных материалов системы железо-алюминий / А.И. Ковтунов, С.В. Мямин // Цветные металлы. 2010. №7. с.65-66.

25. Войтович, В.А. Новые противокоррозионные материалы в строительстве. Киев: Наукова думка, 1980. - 96 с.

26. Вестбрук, Д.Х. Механические свойства металлических соединений. М.: Metallurgizdat, 1962. 388 с.

27. САПР изделий и технологических процессов в машиностроении / Р.А. Аллик, В.И. Бородянский и др. – под общей ред. Р.А. Аллик. Л.: Машиностроение, 1986. 319 с.

28. СНиП. 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. Взамен главы СНиП II-6-74. Введ. 1987-01-01.

29. Мандриков, А.П. Примеры расчета металлических конструкций : учебное пособие. 3-е изд. СПб.: Лань, 2012. 432 с.

30. Казаков, С.И., Гончаров, А.Е. Свариваемость. Свариваемые и сварочные материалы. Прочность и деформации : справочное пособие. Ч. 1: Свариваемость. Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2009. 156 с.

31. Металлургический портал “Сталеварим.ру”. [электронный ресурс]. URL: <http://stalevarim.ru/pub/klassifikatsiya-svarnyh-konstruktsiy/> (дата обращения: 15.04.2018).

32. Weber, G., Thommes, H., Gaul, H., Hahn, O. and Rethmeier, M. (2010) Resistance Spot Welding and Weldbonding of Advanced High Strength Steels // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 41, pp. 931-939.

33. Nied, H. (1984) The Finite Element Modelling of the Resistance Spot Welding Process // Welding Journal, 63, pp. 123-132.

34. Nodeh, I.R., Serajzadeh, S. and Kokabi, A.H. (2008) Simulation of Welding Residual Stresses in Resistance Spot Welding, FE Modeling and X-Ray Verification // Journal of Materials Processing Technology, 205, pp. 60-69.
35. Shen, J., Zhang, Y., Lai, X. and Wang, P.C. (2011) Modeling of Resistance Spot Welding of Multiple Stacks of Steel Sheets // Materials and Design, 32, pp. 550-560.
36. Svensson, B. A Simulation-Based Optimisation Method for PLC Systems // Manufacturing Science and Engineering, vol. 124, pp. 109-118, 2002.