

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов направления подготовки  
15.03.01 «Машиностроение» очной формы обучения*



Могилев 2022

УДК 621.791.7  
ББК 30.61  
К38

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» «20» сентября 2022 г., протокол № 2

Составитель канд. техн. наук, доц. А. Н. Сеница

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Даны методические рекомендации к лабораторным работам по дисциплине «Компьютерное моделирование термомодеформационных процессов при сварке».

Учебно-методическое издание

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2022

## Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. SolidWorks Simulation. Статический линейный анализ сварной конструкции.....	5
2 Лабораторная работа № 2. SolidWorks Simulation. Статический нелинейный анализ сварной конструкции.....	9
3 Лабораторное занятие № 3. SolidWorks Simulation. Термический анализ сварной конструкции.....	14
4 Лабораторное занятие № 4. SolidWorks Simulation. Анализ усталости сварной конструкции.....	23
5 Лабораторное занятие № 5. SolidWorks Simulation. Анализ напряжённо-деформированного состояния сварной конструкции (самостоятельная работа).....	29
6 Охрана труда.....	31
Список литературы.....	32

## Введение

Конкуренция в области производства сварных конструкций требует предельно коротких циклов разработки, низких цен и высокого качества продукции. Особую роль при этом играют быстрота профессиональной реакции на потребности рынка, скорость выполнения проектов и оказания высокотехнологичных услуг командами специалистов, обладающих компетенциями, оборудованием и технологиями мирового уровня.

САЕ-системы (Computer-Aided Engineering) – системы автоматизации инженерных расчетов применяют разнообразные варианты современного, наиболее мощного и универсального численного метода – метода конечных элементов (МКЭ; Finite Element Analysis, FEA).

FEA (конечно-элементный анализ; КЭ-анализ) в первую очередь применим для эффективного решения задач механики деформируемого твёрдого тела, статики, колебаний, устойчивости, динамики и прочности машин, конструкций, приборов, аппаратуры, установок и сооружений.

С помощью различных вариантов МКЭ эффективно решают задачи механики конструкций, теплообмена, электромагнетизма и акустики, строительной механики, технологической механики (в первую очередь задачи пластической обработки металлов, задачи сварки и термообработки, литья металлов, литья пластмасс под давлением), задачи механики контактного взаимодействия и разрушения, задачи механики композитов и композитных структур.

Целью преподавания дисциплины является развитие у студентов направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение» представлений, знаний и умений по составу и возможностям современных прикладных программ для компьютерного моделирования процессов, имеющих место в сварочном производстве.

# 1 Лабораторная работа № 1. SolidWorks Simulation. Статический линейный анализ сварной конструкции

**Цель работы:** провести статические исследования в программном продукте SolidWorks Simulation.

**Применяемое программное обеспечение:**

– программный комплекс SolidWorks-2017 Simulation.

## 1.1 Общие сведения

Статические исследования (или исследования напряжения) вычисляют перемещения, силы реакции, нагрузки, напряжения и распределение запаса прочности. Материал разрушается там, где нагрузки превысили определённый уровень. Статические исследования позволяют избежать разрушения, вызванного высоким напряжением.

### **Линейный статический анализ.**

Тело, когда к нему применяются нагрузки, деформируется и воздействие нагрузок передаётся через все тело. Внешние нагрузки включают в себя внутренние силы и реакции, которые компенсируют воздействия и возвращают тело в состояние равновесия. Линейный статический анализ рассчитывает силы перемещений, напряжения, нагрузки и реакции при воздействии приложенных нагрузок.

В линейном статическом анализе используются следующие допущения:

– **допущение статики.** Все нагрузки прилагаются медленно и постепенно, пока не достигнут своих полных величин. По достижению своих полных величин нагрузки остаются постоянными (неизменными по времени). Такое допущение позволяет пренебречь внутренними и демпфирующими силами ввиду пренебрежимо малых ускорений и скоростей. Меняющиеся по времени нагрузки, включающие существенные внутренние и/или демпфирующие силы, могут обеспечить динамический анализ. Динамические нагрузки меняются по времени и во многих случаях включают в себя существенные внутренние и демпфирующие силы, пренебречь которыми нельзя;

– **допущение линейности.** Взаимоотношения между нагрузками и вызванными реакциями предполагаются линейными. Если, например, увеличить вдвое величину нагрузок, реакция модели (перемещения, нагрузки и напряжения) также увеличится вдвое.

Можно принимать допущение линейности, если:

– все материалы в модели подчиняются закону Гука, в соответствии с которым напряжение прямо пропорционально деформации;

– вызванные перемещения достаточно малы, чтобы можно было пренебречь изменениями в жёсткости, вызванными нагружением;

– граничные условия не изменяются во время приложения нагрузок. Нагрузки должны быть постоянными по величине, направлению и распределе-

нию. Они не должны изменяться во время деформирования модели.

### Соединители.

Соединитель является алгоритмом, который определяет, как узел (вершина, кромка, грань) соединён с другим узлом или с основанием. Использование соединителей упрощает моделирование, так как во многих случаях можно моделировать желаемое поведение без необходимости создавать подробную геометрию или определения условий контактов.

Торцевой сварной шов  – соединитель, который оценивает приблизительный размер шва, необходимый для сварки двух металлических компонентов.

Сварные точки  – соединители, которые соединяют два или более тонких перекрывающихся металлических листов в небольших зонах (точках) без использования какого-либо заполняющего материала.

## 1.2 Порядок выполнения работы

- 1 Создать в папке «Иванов И. И.» новую папку с именем «ЛР1».
- 2 Запустить SolidWorks.
- 3 Добавить SolidWorks Simulation.
- 4 Создать новый документ **Деталь**.
- 5 Создать лист  $200,0 \times 100,0 \times 10,0$ .
- 6 Создать дополнительную плоскость на расстоянии  $5,0$  мм от плоскости «Спереди» (рисунок 1.1).

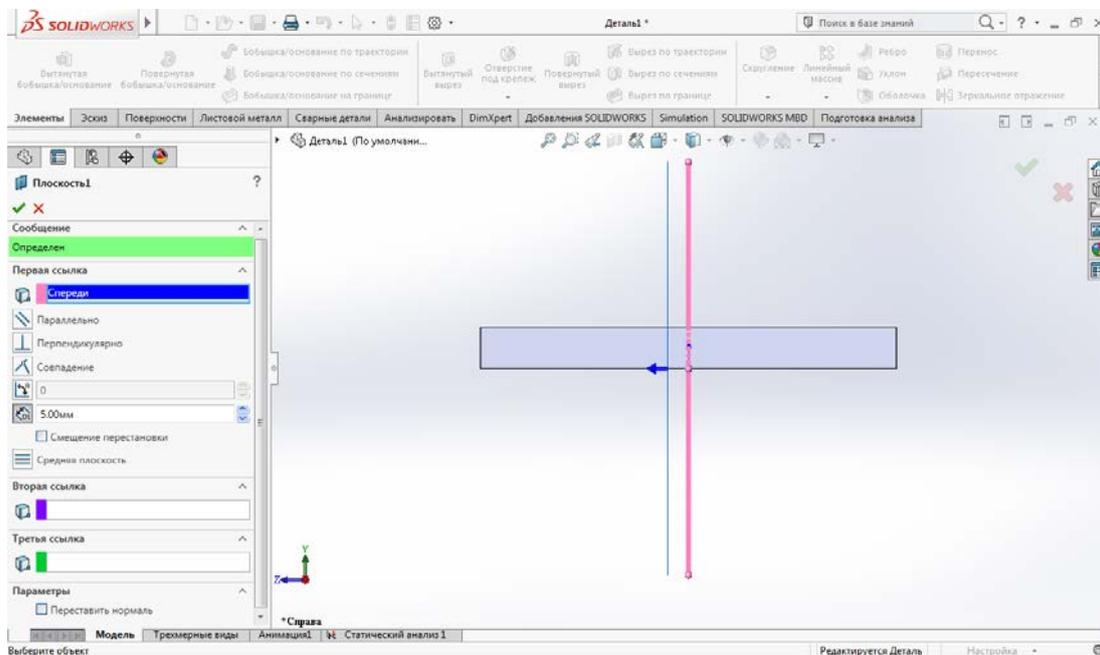


Рисунок 1.1 – Этап создания плоскости

7 Создать второй лист  $200,0 \times 100,0 \times 10,0$  таким образом, чтобы получилось тавровое соединение (рисунок 1.2). При создании базовой кромки обратить внимание на пункт «Объединить результаты». Объединение не требуется.

8 Редактировать материал модели. Для этого в дереве конструирования

нажать правую клавишу мыши по строке **Материал <не указан>**, далее **Редактировать материал**.

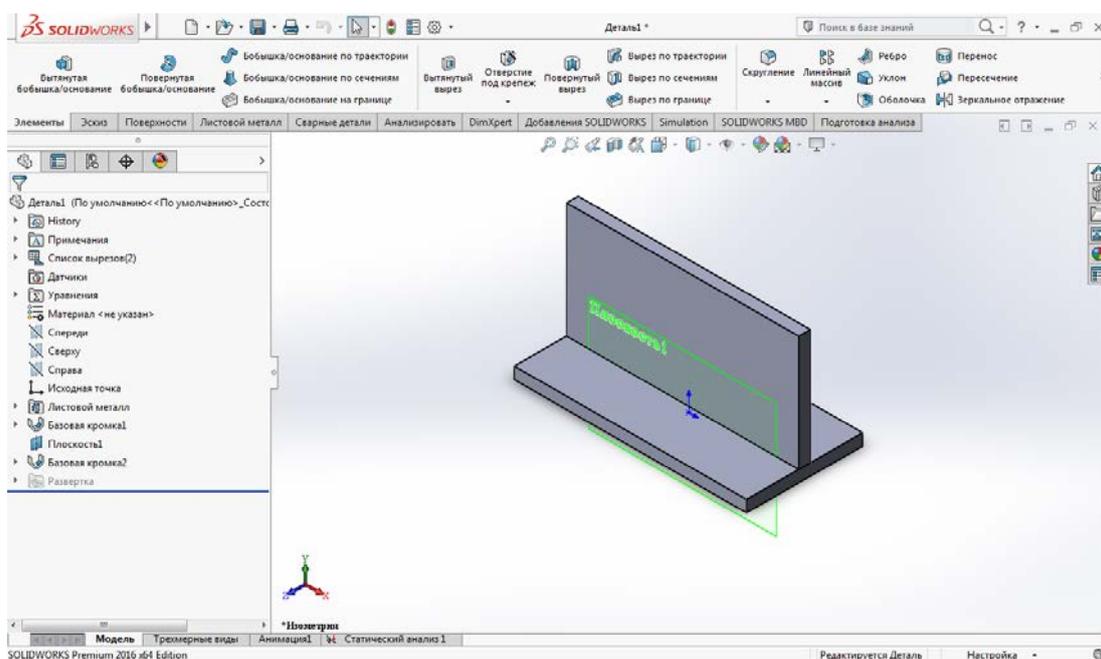


Рисунок 1.2 – Тавровое соединение

9 Задать материал **solidworks materials – Стали – 1023 Листовая углеродистая сталь (SS)**.

10 Нажать кнопки **Применить** и **Заккрыть**.

11 Сохранить созданный документ в папку «ЛР1».

12 Создать исследование. Для этого последовательно выбрать **Вкладка Simulation → Новое исследование → Статическое анализ**.

13 Закрепить модель. Для этого последовательно выбрать **Стрелочка под Консультант по креплениям → Фиксированная геометрия**. Выбрать нижнюю грань модели (рисунок 1.3).

14 Задать нагрузки. Для этого последовательно выбрать **Стрелочка под Консультант по внешним нагрузкам → Сила**. Выбрать верхнюю грань модели, направить силу вверх и задать усилие равным 100 000 Н (рисунок 1.4).

15 Задать соединения. Для этого последовательно выбрать **Стрелочка под Консультант по соединениям → Торцевой сварной шов**.

16 Выбрать в разделе **Тип сварного шва: Тавровый или угловой двусторонний; грань 1; грань 2; пересекающиеся кромки**.

17 Выбрать в разделе **Размер шва: Европейский стандарт; предел прочности на растяжение – 160 МПа; коэффициент корреляции – 1,0; частичный запас прочности – 1,25; приблизительный размер сварки – 3,0 мм**.

18 Нажать кнопку **Запустить это исследование**.

19 После проведённых расчётов в дереве исследования нажать правой клавишей мыши по строке **Результаты** и выбрать **Определить эпюру проверки сварки....**

20 Проанализировать полученные результаты.

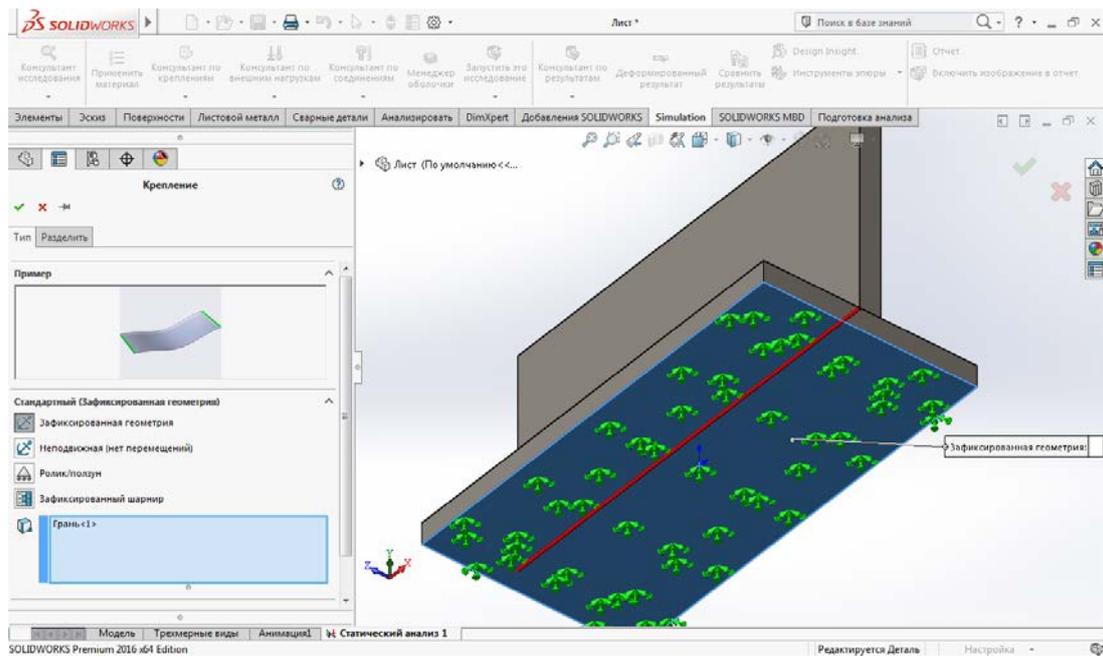


Рисунок 1.3 – Выбор нижней грани

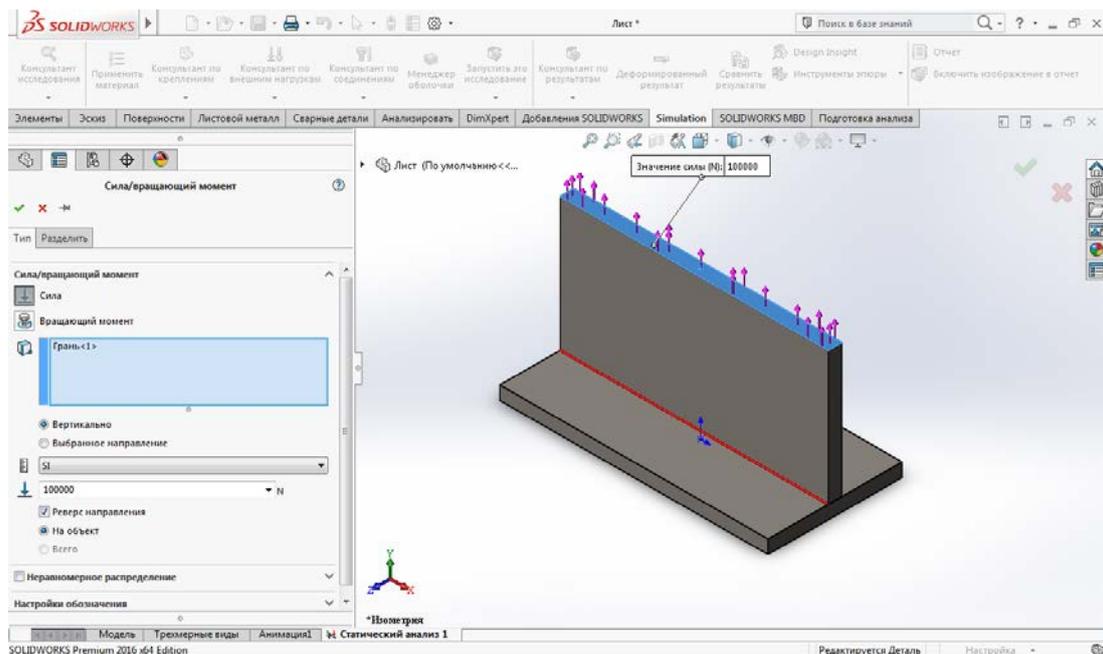


Рисунок 1.4 – Выбор верхней грани

### 1.3 Содержание отчёта

- 1 Название лабораторной работы и цели работы.
- 2 Эскизы распределения напряжений и перемещений в исследованной модели.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Дайте определение термину «метод конечных элементов» (МКЭ).
- 2 Основные этапы практической реализации МКЭ.
- 3 Типы исследований SolidWorks Simulation.
- 4 Типы сеток SolidWorks Simulation.
- 5 Шаги анализа SolidWorks Simulation.
- 6 Свойства материала SolidWorks Simulation.
- 7 Крепления и нагрузки SolidWorks Simulation.
- 8 Для чего предназначены соединители в SolidWorks Simulation?
- 9 Дать определение понятию «линейный статический анализ» (ЛСА).
- 10 Какие применяются допущения при проведении линейного статического анализа?
- 11 Какие основные шаги необходимо выполнить для запуска статического анализа в SolidWorks Simulation?

## **2 Лабораторная работа № 2. SolidWorks Simulation. Статический нелинейный анализ сварной конструкции**

**Цель работы:** ознакомиться с созданием исследования нелинейного статического анализа конструкции.

### **Применяемое программное обеспечение:**

– программный комплекс SolidWorks-2017 Simulation.

#### ***2.1 Общие сведения***

В некоторых случаях линейное решение (задачи) может создавать ошибочные результаты, так как допущения, на которых они основаны, являются нарушенными. Нелинейный анализ может использоваться для решения задач с нелинейностью, вызванной поведением материала, большими перемещениями и условиями контакта. Можно определить статическое, а также динамическое исследование.

Далее изложен порядок выполнения статического исследования.

Кронштейн, изготовленный из легированной стали, зафиксирован в двух отверстиях и нагружен давлением 6,9 МПа (рисунок 2.1).

Чтобы назначить легированную сталь из библиотеки материалов, необходимо выполнить действия, перечисленные далее.

1 Нажмите **Редактировать материал** (панель инструментов **Стандартная SolidWorks**). Появится диалоговое окно **Материал**.

2 В левой панели нажмите на знак «плюс» рядом с **Материалами SolidWorks** и затем на знак **плюс** рядом с разделом **Сталь** и выберите **Легированная сталь**.

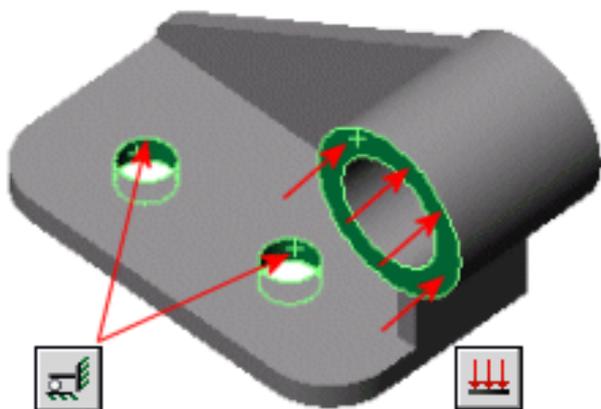


Рисунок 2.1 – Пример фиксации и нагружения кронштейна

Механические характеристики легированной стали появятся в окне **Свойства**.

3) Нажмите **Применить** и затем **Заккрыть**. Название назначенного материала появится в дереве **FeatureManager**.

Чтобы создать статическое исследование:

1) нажмите стрелку вниз в разделе **Консультант исследования (Simulation CommandManager)** и выберите пункт **Новое исследование**;

2) в окне **PropertyManager** в поле

**Имя** введите **Static-1**;

3) в разделе **Тип** нажмите **Статическое**. Программное обеспечение создаст исследование в дереве исследования **Simulation**.

Для статического анализа необходимо применить достаточные фиксирующие ограничения, чтобы стабилизировать модель. Зафиксируйте два отверстия на основании детали.

Чтобы зафиксировать эти отверстия:

1) нажмите кнопку со стрелкой вниз в поле **Консультант по креплениям** и выберите **Зафиксированная геометрия** либо нажмите правой кнопкой мыши **Крепления** в дереве исследования и выберите **Зафиксированная геометрия**. Появится вкладка **PropertyManager Крепление**;

2) в графической области выберите поверхности двух отверстий на основании детали. Программное обеспечение фиксирует поверхности двух отверстий и создаёт значок, названный **Зафиксированный-1** в папке **Крепления** в дереве исследования **Simulation**.

Приложите давление 6,9 МПа перпендикулярно круговой поверхности кронштейна.

Чтобы приложить давление:

1) нажмите кнопку со стрелкой вниз в поле **Внешние нагрузки** и выберите **Давление**;

2) в **PropertyManager** на вкладке **Тип** в разделе **Тип** выберите **Перпендикулярно выбранной грани**;

3) в графической области выберите плоскую грань втулки детали в разделе **Грани для давления**;

4) в разделе **Значение давления** выберите **МПа** в поле **Единицы измерения**, затем введите **6,9** в поле **Значение давления**. Программное обеспечение применяет давление 6,9 МПа и создаёт значок с именем **Давление-1** в папке **Внешние нагрузки** дерева исследования **Simulation**.

Создание сетки зависит от активных параметров формирования сетки.

Чтобы задать параметры формирования сетки:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши **Сетка** и выберите **Создать сетку** либо нажмите кнопку со стрелкой вниз в поле **Запуск** и выберите **Создать сетку**;

2) в **PropertyManager** примените следующие настройки в поле **Параметры сетки**:

- стандартная сетка: выбрана;
- глобальный размер: вычислено программой;
- допуск: вычислено программой;
- автоматический переход: не выбран.

В окне **Дополнительно** необходимо задать следующие параметры:

- меню проверки Якобиана установить на четыре точки;
- сетка чернового качества: не выбрана;
- автоматические пробы для твёрдых тел: выбран Число проб: 3.

При создании сетки программное обеспечение использует активные параметры создания сетки.

Чтобы создать сетку детали и запустить статическое исследование:

1) нажмите, чтобы принять значения. Откроется окно **Процедура создания сетки**. После завершения создания сетки модель с сеткой появится в графической области;

2) щёлкните **Выполнить (Simulation CommandManager)**.

Будет выполнен анализ и папка **Результаты** отобразится в дереве исследования **Simulation**.

Для отображения информации о сетке:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **Сетка** и выберите **Сведения**;

2) закройте окна списка **Сведения о сетке**. Чтобы скрыть или показать сетку нажмите **Отобразить/скрыть сетку** на панели инструментов **Simulation**.

Чтобы построить эпюру напряжений по Мизесу:

1) в дереве исследований **Simulation** откройте папку **Результаты**;

2) дважды щёлкните **Напряжение (-von Mises-)** для отображения эпюры.

На рисунке 2.2 представлено изображение распределения напряжений при статическом исследовании кронштейна.

Эпюра напряжений создаётся на деформированной форме. Чтобы показать деформированную форму, программное обеспечение масштабирует максимальную деформацию на 10 % диагонали граничной рамки модели.

Чтобы построить график результирующего перемещения:

1) в дереве исследований **Simulation** откройте папку **Результаты**;

2) дважды щёлкните **Перемещение (–Расположение результата–)** для отображения эпюры. На рисунке 2.3 представлено изображение перемещений при статическом исследовании кронштейна.

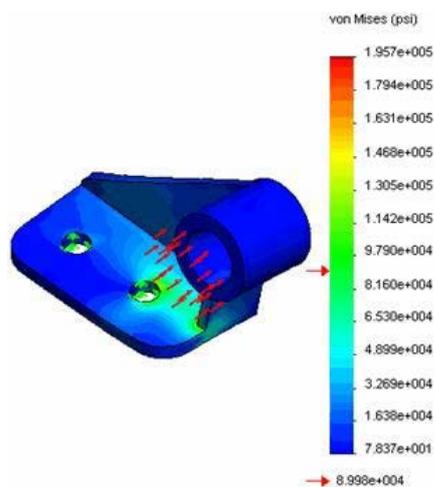


Рисунок 2.2 – Распределение напряжений при статическом исследовании кронштейна

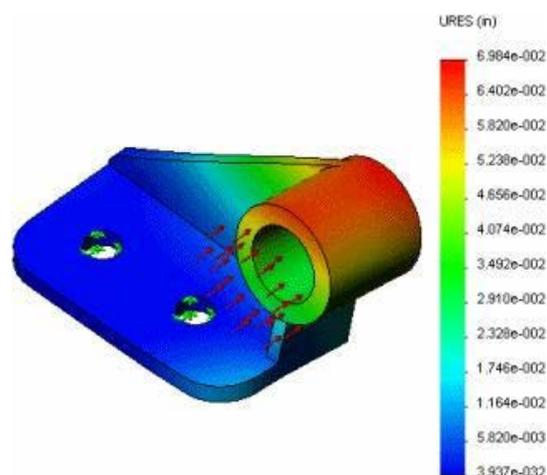


Рисунок 2.3 – Перемещения при статическом исследовании кронштейна

Чтобы построить график эквивалентных деформаций элементов:

- 1) в дереве исследований Simulation откройте папку **Результаты**;
- 2) дважды щёлкните **Деформация (-эквивалентная)** для отображения эпюры. На рисунке 2.4 представлено изображение эквивалентных деформаций при статическом исследовании кронштейна.

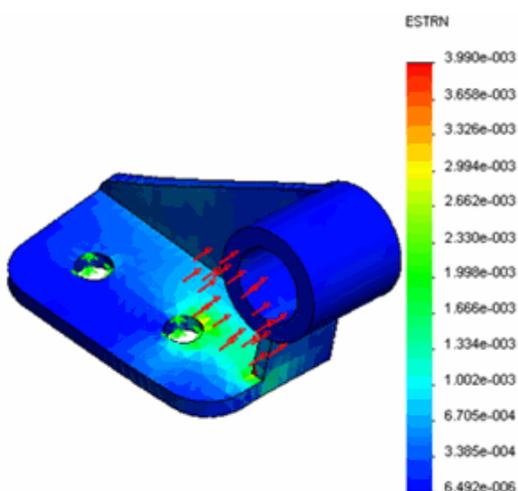


Рисунок 2.4 – Эквивалентные деформации при статическом исследовании кронштейна

Коэффициент запаса прочности поможет оценить прочности конструкции. Чтобы просмотреть распределение в модели коэффициента запаса прочности (**FOS**):

- 1) в дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши на папку **Результаты** и выберите **Определить эпюру коэффициентов запаса прочности**. Появится окно **PropertyManager Запас прочности**;

- 2) в окне **PropertyManager** в разделе **Шаг 1 из 3** выберите **Максимальное напряжение von Mises** в поле **Критерий**;

- 3) щёлкните **Далее**;

- 4) в разделе **Шаг 2 из 3** выберите **Для предела текучести**.

Обратите внимание, что отображены упругие свойства материала детали и максимальное напряжение по Мизесу;

- 5) нажмите кнопку **Далее**;

- 6) в разделе **Шаг 3 из 3**, выберите **Распределение запаса прочности**;

- 7) щёлкните **Готово**.

На рисунке 2.5 представлено изображение распределения коэффициента запаса прочности (FOS) при статическом исследовании кронштейна.

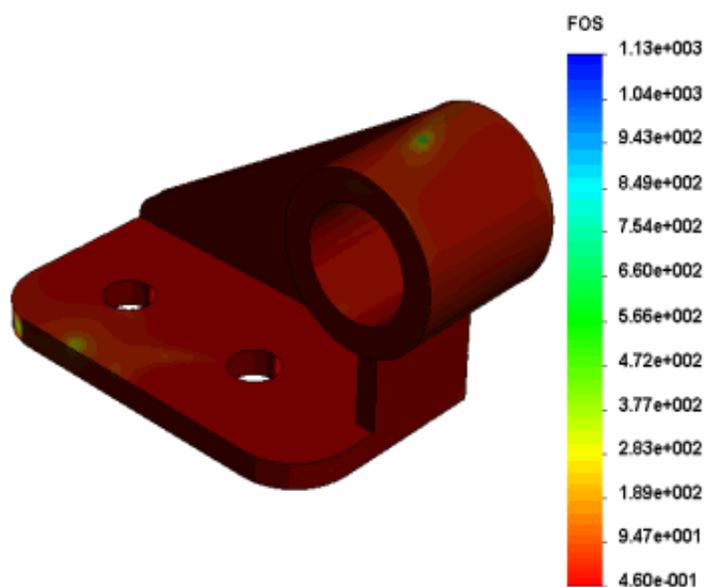


Рисунок 2.5 – Распределение коэффициента запаса прочности (FOS) при статическом исследовании кронштейна

Чтобы построить график критических областей детали:

1) нажмите стрелку вниз в разделе **Консультант по результатам** и выберите **Новая эюра, Запас прочности**;

2) в окне **PropertyManager** в разделе **Шаг 1 из 3** выберите **Максимальное напряжение von Mises** в поле **Критерий**;

3) щёлкните **Далее**;

4) в разделе **Шаг 2 из 3** выберите **Для предела текучести**;

5) нажмите кнопку **Далее**;

6) в разделе **Шаг 3 из 3** выберите **Области ниже запаса прочности** и введите **1** в поле **Запас прочности**;

7) щёлкните **Готово**.

Области с запасом прочности меньше 1 (опасные области) отображаются красным цветом. Области с более высоким коэффициентом запаса прочности (прочные области) отображаются синим цветом.

## 2.2 Порядок выполнения работы

1 Получить у преподавателя чертёж сварной конструкции и создать её трёхмерную модель.

2 Выполнить исследование, руководствуясь порядком, изложенным в п. 2.1.

## 2.3 Содержание отчёта

1 Название лабораторной работы и цели работы.

2 Эскизы распределения напряжений и перемещений в исследованной модели.

## Контрольные вопросы

1 Порядок назначения материала детали.

2 Порядок применения фиксированного ограничения и приложение нагрузки.

3 Порядок настройки параметров и создание сетки детали.

- 4 Инструменты просмотра основных результатов статического анализа.
- 5 Порядок оценки перемещений конструкции.
- 6 Порядок оценки прочности конструкции.

### 3 Лабораторное занятие № 3. SolidWorks Simulation. Термический анализ сварной конструкции

**Цель работы:** ознакомиться со следующими процедурами: создание термического исследования установившегося состояния; определение зависящих от температуры свойств материала; определение термических нагрузок и граничных условий; просмотр и зондирование результатов расчётов температуры; создание эпюры изолиний температуры; создание исследования переходного термического процесса; определение зависящих от времени термической нагрузки посредством импортирования предопределённой кривой времени; вычерчивание графиков результатов относительно времени.

#### 3.1 Пример выполнения анализа

В настоящем примере анализируется теплопередача в показанной на рисунке 3.1 сборке кристалла.

Сборка изготовлена из квадратной подложки (керамический фарфор) размером 40 мм и толщиной 1 мм. На подложке размещены 16 квадратных кристаллов размером 6 мм и толщиной 0,5 мм.

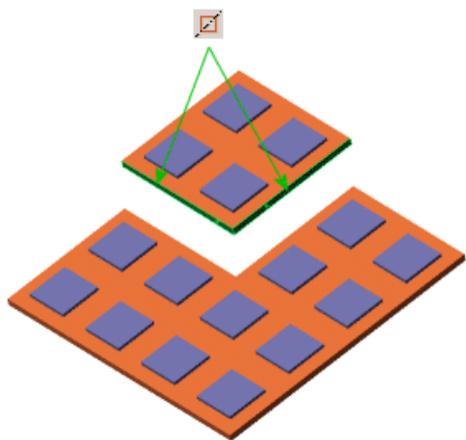


Рисунок 3.1 – Модель кристалла

Каждый кристалл выделяет максимальную тепловую мощность 0,2 Вт. Тепловая мощность увеличивается от нуля в начальный момент времени ( $t = 0$ ) и достигнет максимального значения (0,2 Вт) через 60 с ( $t = 60$ ). Коэффициент теплопроводности кристалла изменяется с температурой.

Тепло из подложки рассеивается посредством конвекции. Коэффициент конвективной теплопередачи (коэффициент плёнки) равен  $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а объёмная (окружающей среды) температура равна 300 К.

Вследствие наличия двух плоскостей симметрии анализируется одна четверть модели (см. рисунок 3.1):

- 1) нажмите стрелку вниз в разделе **Консультант исследования** и выберите пункт **Новое исследование**;
- 2) в окне **PropertyManager** в поле **Имя** введите **SteadyState**;
- 3) в разделе **Тип** нажмите **Термическая**;
- 4) щёлкните **ОК**.

Для проверки типа термического исследования:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок исследования и выберите **Свойства**;

2) в диалоговом окне на вкладке **Параметры**, в списке **Тип решения** проверьте, что выбрано исследование **Установившееся состояние**;

3) нажмите **ОК**.

Подложка изготовлена из керамического фарфора. Назначьте этот материал подложке из библиотеки материалов. Для этого:

1) в дереве исследований нажмите правой кнопкой мыши значок **Substrate-1** в разделе **Детали** и выберите **Применить/редактировать материал**;

2) в диалоговом окне разверните папки **Материалы SolidWorks**, **Другие неметаллы** и выберите **Керамика фарфор**;

3) нажмите **Применить**;

4) нажмите кнопку **Заккрыть**.

Введите нижеприведённые свойства материала кристалла вручную.

Модуль упругости:  $4,1 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>.

Коэффициент Пуассона: 0,3.

Массовая плотность: 1250 кг/м<sup>3</sup>.

Теплопроводность: зависит от температуры.

Коэффициент теплового расширения:  $10^{-6}$  К<sup>-1</sup>.

Удельная теплоёмкость (C): 670 Дж/(кг·К).

Коэффициент теплопроводности (**KX**) кристаллов зависит от температуры. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры материала кристалла задана следующими парами данных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения коэффициента теплопроводности и температуры

Температура	Коэффициент теплопроводности
100 К	390 Вт/(м · К)
150 К	260 Вт/(м · К)
200 К	195 Вт/(м · К)
250 К	156 Вт/(м · К)
300 К	130 Вт/(м · К)
350 К	110 Вт/(м · К)

Чтобы назначить свойства материала кристаллов:

1) в дереве **Simulation** выберите четыре кристалла;

2) нажмите **Применить материал** (Диспетчер команд **Simulation**);

3) в диалоговом окне нажмите правой кнопкой мыши **Материалы пользователя** и выберите **Новая категория**;

4) нажмите правой кнопкой мыши папку **Новая категория** и выберите **Новый материал**. Затем выберите только что определённый материал;

5) в окне **Свойства материала**:

- выберите **Линейный упругий изотропный** в **Тип модели**;
- выберите **SI** – Н/м<sup>2</sup> в разделе **Единицы измерения**;
- введите **Материал кристалла** в поле **Имя**;

б) в таблице свойств материала нажмите внутри окна **Значение** для каждого из свойств материала, показанных выше (за исключением КХ) и введите его значение;

7) чтобы назначить зависимый от температуры коэффициент теплопроводности выполните следующие действия:

- в поле **Значение** свойства **Теплопроводность** выберите **Температурно-зависимо**;

- на вкладке **Таблицы и кривые** выберите **Теплопроводность** в X в сравнении с температурой в поле **Тип**;

- в окне **Данные таблицы** установите **Единицы измерения** на К (Кельвин) и Вт/(м·К). Введите пары данных температура – теплопроводность согласно данным таблицы 3.1.

В области **Предварительный просмотр** отображается кривая во время ввода данных. Чтобы просмотреть фактическую кривую, выберите **Вид**;

8) нажмите **Применить** и затем **Заккрыть**.

Примените термические нагрузки и граничные условия к сборке:

- тепловую мощность (объем теплоты) к четырём кристаллам;
- конвекцию на тыльную поверхность подложки и на поверхности, показанные на рисунке 3.2.

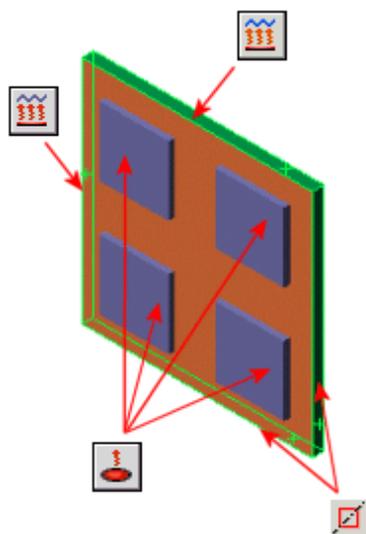


Рисунок 3.2 – Поверхности нагрева и охлаждения

Примените тепловую мощность к объёму каждого кристалла модели:

1) нажмите Термические нагрузки и выберите **Тепловая мощность**. Появится **Тепловая мощность PropertyManager (Менеджера свойств)**;

2) в графической области щелкните для раскрытия плавающего дерева конструирования **FeatureManager**;

3) выберите значки **Chip** (кристалл)<1>, **Chip**<2>, **Chip**<3> и **Chip**<4>. Chip-1, Chip-2, Chip-3 и Chip-4 появятся в окне **Грани, Кромки, Вершины, Компоненты для тепловой мощности**;

4) в окне **Тепловая мощность** выполните следующие операции:

- установите для параметра **Единицы измерения**

значение **СИ**;

- установите **Тепловая мощность** на **0,2**;

5) щелкните **ОК**.

Примените конвекцию на нижнюю поверхность подложки, **Грань 1** и **Грань 2**.

Чтобы применить конвекцию:

1) нажмите **Термические нагрузки** (Simulation CommandManager) и выберите **Конвекция**. Появится окно PropertyManager **Конвекция**;

2) в графической области выберите тыльную поверхность подложки, Грань 1 и Грань 2, как показано на рисунке 3.3. Грань<1>, Грань<2> и Грань<3> появятся в окне **Грани для конвекции**;

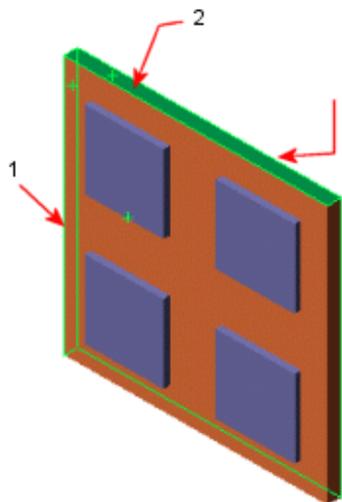


Рисунок 3.3 – Применение конвекции на грани кристалла

3) установите для параметра **Единицы измерения** значение **СИ**;

4) установите **Коэффициент конвективной теплоотдачи** на **25**;

5) установите **Массовая температура окружающей среды** на **300**;

6) щёлкните **ОК**.

Программное обеспечение применяет конвекцию к трём выбранным поверхностям и создаёт один значок в папке **Термические нагрузки**. Обозначения конвекции появятся также на трёх выбранных поверхностях модели.

Чтобы создать сетку модели и запустить исследование:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **Сетка** и выберите **Создать сетку**;

2) в PropertyManager примените **следующие настройки**;

3) в разделе **Параметры** выберите **Запуск (решение) анализа**;

4) нажмите **ОК**, чтобы принять значения.

Распределение температуры является эпюрой по умолчанию для термического анализа.

Чтобы просмотреть распределение температуры на поверхности модели кристаллов:

1) в дереве исследований **Simulation** откройте папку **Результаты**;

2) дважды щёлкните **Термическое1 (-Температура-)** для отображения эпюры.

На рисунке 3.4 представлено изображение распределения температуры на поверхности кристалла при термическом исследовании.

Угол кристалла является самым холодным, а самое горячее место находится внутри кристалла вследствие конвекции.

Используйте инструмент **Зонд**, чтобы вывести список температур на конкретном местоположении модели:

1) при необходимости активизируйте **Термическое1 (-Температура-)** двойным щелчком по его значку;

2) нажмите **Инструменты эпюры** и выберите **Зондирование**;

3) выберите вершины, показанные на рисунке 3.5, начиная с нижнего правого угла (местоположение 1);

4) в окне **PropertyManager** в папке **Результаты** просмотрите температуры и X-, Y-, Z-координаты выбранных вершин в глобаль-

ной системе координат;

5) в списке **Параметры отчета** нажмите **Эпюра**. Появится окно **Результат зондирования** с графиком температур в кельвинах на выбранных вершинах относительно номеров узлов на этих вершинах. Номера узлов могут не совпадать с изображением.

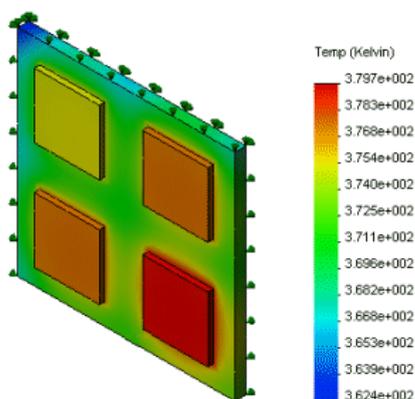


Рисунок 3.4 – Распределение температуры на поверхности кристалла

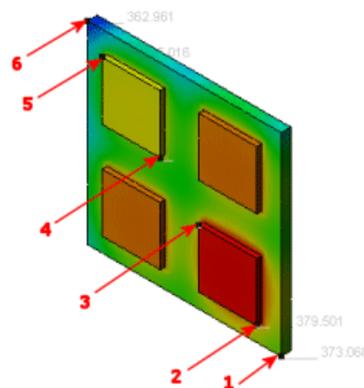


Рисунок 3.5 – Использование зонда

На рисунке 3.6 представлен график температур окна **Результат зондирования**, полученный с экрана монитора при термических исследованиях;

б) в окне **Результат зондирования** нажмите **Файл, Закрыть** и щёлкните **ОК**.

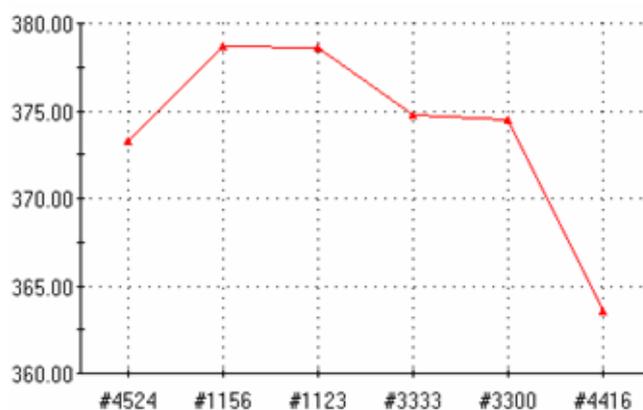


Рисунок 3.6 – Изображение графика температур в точках зондирования

Эпюры изолиний температур представляют собой эпюры изолиний поверхности заданного значения температуры. Используя эпюры изолиний, можно определять области максимальной температуры модели.

Для получения эпюры изолиний температур:

1) нажмите правой кнопкой активную термическую эпюру в дереве исследования Simulation и выберите **Ограничение Iso**;

2) в окне **PropertyManager** (Менеджер свойств), в разделе **Iso 1** перетащите ползунок **Значение Iso** по направлению к правому концу шкалы;

3) в окне группы **Параметры** выберите **Этюра только на изоповерхности** и щёлкните **ОК**.

Отобразится изоповерхность с заданной температурой, как указано на рисунке 3.7.

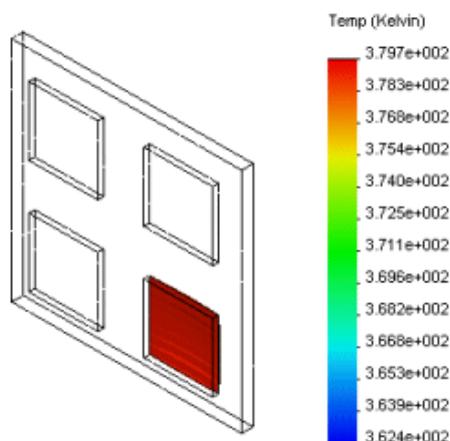


Рисунок 3.7 – Изоповерхность с заданной температурой

В установившемся состоянии тепловая энергия, поступающая в систему, должна быть равна тепловой энергии, выходящей из неё. Полная тепловая мощность, выделяемая кристаллами, равна 0,8 Вт. Тепловая энергия выходит из системы через поверхности при конвекции.

Чтобы вывести список тепловой энергии, выходящей из системы путём конвекции:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши на **Результаты** и выберите **Список тепловых мощностей**;

2) в разделе **Единицы измерения** выберите **Ватт**;

3) выберите три грани, на которых Вы задали конвекцию для параметра **Грани, кромки или вершины**;

4) нажмите кнопку **Обновить**.

Тепловая мощность, покидающая систему через выбранные грани, записана в разделе **Сводка** как – **0,8 Ватт**. Отрицательный результат означает, что тепловая мощность выходит из системы;

5) щёлкните **ОК**.

Учтём время в решении этой же задачи. Определим время, требуемое для достижения установившегося состояния.

Чтобы создать исследование переходного термического процесса:

1) нажмите на стрелку вниз в разделе **Консультант исследования (Simulation CommandManager)** и выберите **Новое исследование**;

2) в окне **PropertyManager** в разделе **Имя** выберите **Transient (Переходный процесс)**;

3) в разделе **Тип** нажмите **Термическая**;

4) щёлкните **ОК**.

Чтобы определить свойства исследования переходных процессов:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **исследования переходных процессов** и выберите **Свойства**. Появится диалоговое окно **Термический**;

2) в окне **Тип решения** выполните следующие действия:

– выберите **Transient (Переходный процесс)**;

– установите **Общее время** на **900 с**;

– установите **Временной инкремент** на **30 с**;

3) нажмите **ОК**.

Назначьте начальную температуру 300 °К всем компонентам сборки:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **Термические нагрузки** в исследовании переходных процессов и выберите **Температура**.

Появится **Температура PropertyManager** (Менеджера свойств);

2) в окне **Тип** выберите **Начальная температура**;

3) выберите все компоненты сборки, появившиеся в плавающем дереве конструирования **FeatureManager**. Выбранные компоненты появятся в окне **Грани, Кромки, Вершины, Компоненты для температуры**;

4) в разделе **Температура** введите **300** в поле значений и выберите **Кельвин** в качестве единиц измерения;

5) щелкните **ОК**.

Программа назначает указанные температуры и создает значок в папке **Термические нагрузки**.

Тепловая мощность начинается с нулевого значения при  $t = 0$  и достигнет максимума 0,2 Вт через 60 с. Изменение во времени тепловой мощности определяется файлом данных кривой. Чтобы включить эту зависимость от времени, отредактируйте условия тепловой мощности.

Чтобы добавить функциональную кривую:

1) нажмите **Simulation, Параметры**;

2) на вкладке **Параметры системы** выберите **Библиотека по умолчанию**;

3) выберите **Библиотеки функций кривых** в **Отобразить папки для**;

4) Нажмите кнопку **Добавить** и перейдите в каталог **<Examples\_dir>\Thermal**;

5) дважды щёлкните **ОК**.

Чтобы отредактировать условие тепловой мощности:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **Тепловая мощность-1** в папке **Тепловые нагрузки** и выберите **Редактировать определение**;

2) в окне **PropertyManager** в разделе **Тепловая мощность** нажмите **Использовать кривую времени**, затем нажмите **Редактировать**;

3) в диалоговом окне **Кривая времени** нажмите **Получить кривую**;

4) в диалоговом окне **Открыть** выберите **HeatPower\_time\_curve.cwcur** и щелкните **Открыть**;

5) в окне **Кривые функций** нажмите **Кривая времени-1** в списке **Кривая времени**. Данные кривой появятся в окне **Данные кривой**. Чтобы просмотреть кривую времени, выберите **Вид** и дважды щёлкните **ОК**;

б) нажмите для завершения определения зависящей от времени тепловой мощности.

Перед запуском исследования переходных процессов требуется иметь сетку. Также необходимо иметь совместимую сетку между двумя связанными компонентами.

Чтобы определить совместимую сетку для связанных компонентов:

1) в дереве исследований **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши

**Глобальный контакт (-Связанный)** и выберите параметр **Редактировать определение**;

2) в **PropertyManager** в разделе **Параметры**, выберите **Совместимая сетка** нажмите **ОК**.

Чтобы создать сетку модели и выполнить исследование переходных процессов:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **Сетка** и выберите **Создать сетку**;

2) в **PropertyManager** в разделе **Параметры** воспользуйтесь параметром **Стандартная сетка с Глобальным размером 1,50 мм**;

3) в разделе **Параметры** выберите **Запуск (решение) анализа** и нажмите **ОК**.

Анализ переходного процесса предоставляет профили температуры в требуемые моменты времени решения. Для просмотра температуры на 30-й с:

1) в дереве исследований **Simulation** откройте папку **Результаты**;

2) дважды щёлкните **Термическое (-Температура-)** для отображения эпюры. Если эпюра не существует, **создайте эту эпюру**;

3) нажмите правой кнопкой мыши **Термическое (-Температура-)** и выберите **Редактировать определение**;

4) в окне **PropertyManager** в разделе **Отобразить** выберите **Кельвин** в меню **Единицы измерения**;

5) в разделе **Шаг эпюры** установите значение **1** щёлкните **ОК**.

Отобразится профиль температур в кельвинах (К) на 30-й с (первый временной шаг), как показано на рисунке 3.8.

Чтобы просмотреть температуры на 900-й с:

1) нажмите стрелку вниз в разделе **Консультант по результатам (Simulation CommandManager)** и выберите **Термическая** в списке **Новая эпюра**;

2) в окне **PropertyManager** в разделе **Отобразить** выберите **Кельвин** в меню **Единицы измерения**;

3) в разделе **Шаг эпюры** установите значение **30**;

4) щёлкните **ОК**. Отобразится профиль температур на 900-й с (последний временной шаг).

Профиль температур на 900-й с близок (отличие на 0,4 %) к решению установившегося состояния, полученному в первой части практического занятия.

Используйте инструмент **Зонд**, чтобы построить кривую температура – время в желаемом местоположении поверхности модели следующим образом:

1) в дереве исследования **Simulation** активизируйте **Thermal1 (Температура)** двойным щелчком по его значку;

2) нажмите **Инструменты эпюры (Simulation CommandManager)** и выберите **Зондирование**;

3) выберите показанную вершину как показано на рисунке 3.9.

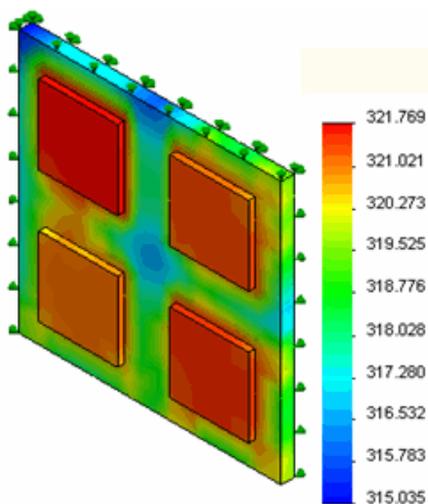


Рисунок 3.8 – Профиль температур на 30-й секунде

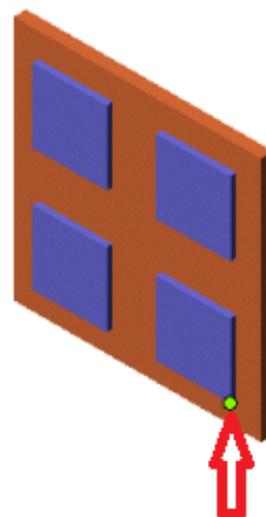


Рисунок 3.9 – Выбор вершины для зондирования

На рисунке 3.10 представлено изображение зависимости температуры (ось  $y$ ) выбранной вершины относительно номера временного шага (ось  $x$ ), полученное с экрана монитора при термических исследованиях.

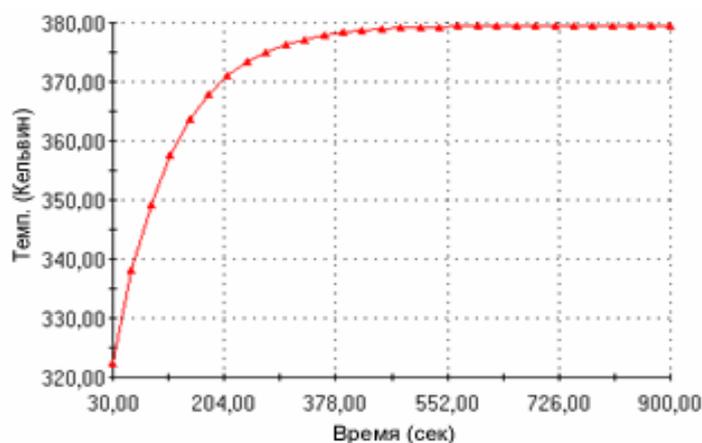


Рисунок 3.10 – Изображение графика температура – время, полученное с экрана монитора при термических исследованиях

На рисунке 3.10 видно, что условие установившегося состояния достигается приблизительно через 600 с (соответствует 20-му временному шагу);

- 5) закройте окно графика, нажимая **Файл, Закрывать**;
- 6) щёлкните **ОК**.

### 3.2 Порядок выполнения работы

1 Получить у преподавателя чертёж сварной конструкции и создать её трёхмерную модель.

2 Выполнить термический анализ, руководствуясь порядком, изложенным в п. 3.1.

### 3.3 Содержание отчёта

- 1 Название лабораторной работы и цели работы.
- 2 Эскизы распределения температур в исследованной модели.

#### Контрольные вопросы

- 1 Сущность термического исследования установившегося состояния.
- 2 Особенности задания свойств материала при термическом анализе.
- 3 Порядок определения зависящих от температуры свойств материала.
- 4 Порядок определения термических нагрузок и граничных условий.
- 5 Порядок создания эпюры изолиний температуры.
- 6 Порядок исследования переходного термического процесса.
- 7 Порядок определения зависящий от времени термической нагрузки посредством импортирования предопределённой кривой времени.
- 8 Порядок создания графиков термических результатов относительно времени.

## 4 Лабораторное занятие № 4. SolidWorks Simulation. Анализ усталости сварной конструкции

**Цель работы:** ознакомиться с порядком исследования потери/восстановления устойчивости металлоконструкции под нагрузкой.

### 4.1 Пример выполнения анализа

Нежёсткий цилиндрический лист подвергается воздействию сосредоточенной нагрузки в центре, как показано на рисунке 4.1.

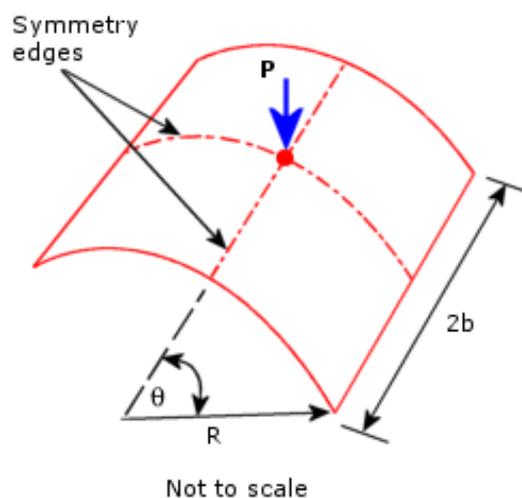


Рисунок 4.1 – Схема нагружения цилиндрического листа

Изогнутые кромки свободны, а прямые кромки неподвижны, но могут вращаться вокруг кромки. Требуется определить потерю/восстановление устойчивости цилиндрического листа под нагрузкой. Вследствие симметрии задачи анализируется только четверть модели.

$R = 2540$  мм,  $b = 254$  мм,  $q = 0,10$  радиана,  $h$  (толщина) = 6,35 мм,  $n = 0,30$ ;  $P$  (исходная нагрузка) = 10 Н.

С такими размерами лист выглядит подобно плоской поверхности.

Чтобы создать нелинейное аналитическое исследование:

1) нажмите на стрелку вниз в разделе **Консультант исследования** и выберите **Новое исследование**;

2) в **Менеджере свойств** выполните следующие действия:

- в поле **Имя** введите имя исследования;
- под **Тип** нажмите **Нелинейный**;
- в разделе **Параметры** следует выбрать **Статический**;
- щёлкните **ОК**.

Программа автоматически определяет оболочку для рельефа поверхности.

Чтобы определить модель оболочки:

1) в дереве исследований **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **оболочки** и выберите параметр **Редактировать определение**;

2) в **Менеджере свойств** выполните следующие действия:

- убедитесь, что в разделе **Тип** выбрано **Тонкая**;
- установите единицы измерения на мм, затем введите **6** в качестве **Толщины оболочки**;
- щёлкните **ОК**.

Назначьте следующие свойства материала.

Модуль упругости:  $3,10275 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>.

Коэффициент Пуассона: 0,3.

Для этого в диалоговом окне **Материал** выполните следующее:

1) нажмите правой кнопкой мыши на папку **Материалы** пользователя и выберите параметр **Новая категория**;

2) нажмите правой кнопкой мыши на новую категорию и выберите **Новый материал**;

3) в окне **Свойства материала** выполните следующие действия:

- установите **Тип модели** на **Линейный упругий изотропный**;
- выберите **СИ – Н/м<sup>2</sup> (Па)** в меню **Единицы измерения**;
- в поле **Имя** введите название материала, например, **Материал 4**;

4) в таблице свойств выполните следующие действия:

- введите  $3,10275e9$  в окне Значения EX (Модуль упругости);
- введите 0,3 в окне Значения NUXY (Коэффициент Пуассона);
- введите значение Массовой плотности, например, 9800;
- нажмите **Применить** и **Заккрыть**.

Методы управления **Сила**, а также **Деформация** будут работать неудовлетворительно в окрестностях критических точек для моделей этого типа. Метод управления длиной дуги является естественно подходящим и будет использо-

ваться в настоящей задаче.

В методе управления длиной дуги закономерность приложенных нагрузок является пропорционально прирастающей (используя множитель сосредоточенной нагрузки) для достижения равновесия под управлением заданной длины (длины дуги) равновесной траектории. Длина дуги будет автоматически вычисляться программой. Не требуется кривой «времени».

Чтобы задать свойства исследования:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок исследования и выберите **Свойства**;

2) в диалоговом окне **Нелинейное статическое** на вкладке **Решение** проверьте следующие настройки:

– **Автоматически (автоинтервал)** в окне **Временной инкремент**;

– **0,01** установлено в поле **Начальный временной инкремент**;

– **Мин.** установлен на **1e-008** и **Макс.** установлен на **0,1**;

– **Использовать постановку задачи для большого смещения** установлено в **Параметрах нелинейности геометрии**;

3) в окне **Решающая программа** убедитесь, что выбрана программа **Direct Sparse**;

4) перейдите на вкладку **Решение** и нажмите **Дополнительные параметры**;

5) на вкладке **Дополнительно**, в окне **Метод** установите **Управление на Длину дуги** и убедитесь, что **NR (Ньютон-Рафсон)** установлено на **Итерационный**;

6) в разделе **Параметры завершения длины дуги** выполните следующие действия:

– убедитесь, что **Коэффициент максимального распределения нагрузок** установлен на **1e8**;

– введите **1e8** в поле **Максимальное смещение (для смещения DOF)**;

– введите **45** в поле **Максимальное число интервалов дуги**;

7) в разделе **Параметры интервала/допуска** установите **Допуск сходимости** на **0,0001**;

8) нажмите **ОК**.

Чтобы задать параметры вывода результатов:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **Параметры результатов** и выберите **Определить/Редактировать**;

2) в **Менеджере свойств** выполните следующие действия:

– в окне **Сохранить результаты** нажмите **Для указанных шагов решения**;

– установите флажок на **Шаги решения – Набор1** и выполните следующие действия:

а) убедитесь, что **Начало** установлено на **1**;

б) убедитесь, что **Окончание** установлено на **1000**;

в) в поле **Инкремент** введите **1**;

г) в окне **Эпюры ответных реакций** выберите **<Ready -**

**Nonlinear> – Nonlinear** в Списке датчиков;

д) щёлкните **ОК**.

На рисунке 4.2 представлено изображение с экрана монитора цилиндрического листа.

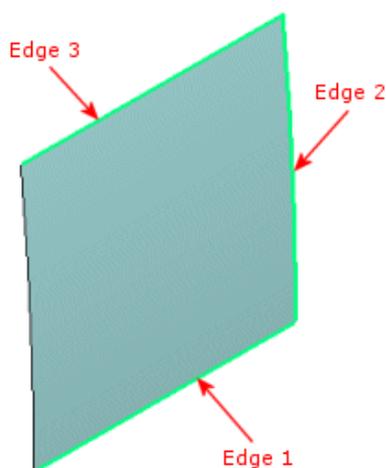


Рисунок 4.2 – Кромки цилиндрического листа

Одна из прямых кромок (Edge 3, см. рисунок 4.2) ограничена во всех направлениях, кроме вращения вокруг оси Z. Другая прямая кромка (Edge 1) и изогнутая кромка (Edge 2) имеют симметричные ограничения.

Следует зафиксировать прямую кромку (Edge 1). Для этого выполните следующие действия.

1 В дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **Крепления** и выберите **Расширенные крепления**.

2 Установите **Тип** на **Использовать справочную геометрию**.

3 Выберите окно **Грани, Кромки, Вершины** для крепления, затем нажмите **Edge 1** в графической области.

4 Выберите окно **Грань, кромка, плоскость, оси для направления**, затем выберите **Переднюю плоскость** в плавающем дереве конструирования **FeatureManager**.

5 Нажмите **Вдоль плоскости – направление 2** в разделе **Перемещения**; **Вдоль плоскости – направление 1** и **Перпендикулярно плоскости** в разделе **Вращения**. Убедитесь, что во всех кнопках, которые вы щёлкнули, появились нули.

6 Щёлкните **ОК**.

Чтобы приложить силу:

1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **Внешние нагрузки** и выберите пункт **Сила**;

2) в **Менеджере свойств** выполните следующие действия:

– в окне **Сила/вращающий** выбрать **Сила**;

– выберите окно **Грани, Кромки, Вершины, Справочные точки для силы**, затем выберите вершину модели;

- выберите параметр **Выбранное направление**;
- выберите окно **Грань, кромка, плоскость для направления**, затем выберите **Переднюю плоскость** в плавающем дереве конструирования **FeatureManager**;
- задайте для параметра **Единицы измерения** значение **СИ**;
- в окне **Сила (на объект)** нажмите **Вдоль плоскости – направление 1** и введите **–6,35** в поле его значений;
- щёлкните **ОК**.

Чтобы создать сетку модели:

- 1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **Сетка** и выберите пункт **Создать сетку**;
- 2) в **Менеджере свойств** выполните следующие действия:
  - в окне **Плотность сетки**, перетащите бегунок в крайнее левое положение (**Грубо**);
  - в поле **Параметры сетки** выберите **Стандартная сетка**»;
  - в окне **Дополнительно** выберите **Сетка чернового качества**;
  - установите флажок **Запуск (решение) анализа**;
  - щёлкните **ОК**.

Постройте эпюру перемещения в зависимости от коэффициента нагрузки в центре оболочки. Для этого:

- 1) в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши папку **Результаты** и выберите **Определить эпюру хронологии**;
- 2) в **Менеджере свойств** выполните следующие действия:
  - убедитесь, что в разделе **Реакция** выбраны **Предопределенные положения**;
  - убедитесь, что выделена **Вершина 1**;
  - в окне **Ось X** установите **Компонент** на **URES: Результирующее перемещение**;
  - в окне **Ось X** убедитесь, что **Единицы измерения** установлены на **мм**;
  - щёлкните **ОК**.

На рисунке 4.3 представлено изображение с экрана монитора зависимости коэффициента нагрузки (ось Y) от результирующего перемещения **URES**;

3) наведите указатель мыши на первую точку перегиба рисунка 4.3 и посмотрите её координаты внизу графического окна. Оболочка начинает изгибаться при коэффициенте нагрузки 57,7 или усилие примерно 144 Н ( $2,5 \cdot 57,7 = 144,25$ ).

Создайте исследование продольного изгиба и решите ту же задачу при линеаризованном анализе продольного изгиба. Исследование *изгиба* будет проводиться с типом сетки **Оболочка**.

Порядок действий следующий.

- 1 Перетащите папку **Оболочки** из нелинейного исследования в исследование потери устойчивости.
- 2 Перетащите **Крепления, Внешние нагрузки** и **Сетку** в исследование потери устойчивости.
- 3 Запустите исследование продольного изгиба.

4 После завершения анализа дважды щёлкните значок в папке **Результаты** (или нажмите правой кнопкой мыши папку **Результаты** и выберите **Показать коэффициенты критической продольной нагрузки**). Вычисленный коэффициент критической продольной нагрузки, равный примерно 122, показывает, что оболочка будет изгибаться при нагрузке примерно  $2,5 \cdot 122 = 305$  Н.

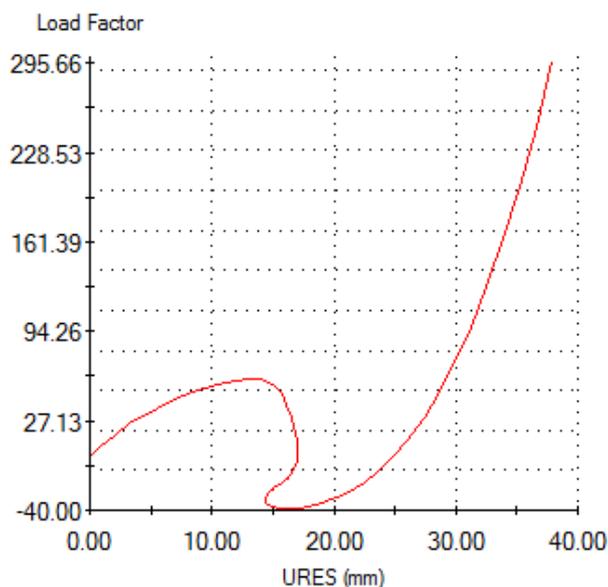


Рисунок 4.3 – Изображение с экрана монитора, отражающее поведение после продольного изгиба оболочки

**Вывод.** Линеаризованный анализ продольного изгиба даёт более чем в 2 раза завышенную критическую продольную нагрузку по сравнению с фактической, рассчитанной нелинейным анализом. Настоящий пример показывает преимущество использования нелинейного анализа и что линеаризованный анализ продольного изгиба может давать завышенные значения коэффициента критической продольной нагрузки (в этом случае 2,1).

## 4.2 Порядок выполнения работы

- 1 Получить у преподавателя чертёж сварной конструкции и создать её трёхмерную модель.
- 2 Выполнить анализ потери устойчивости, руководствуясь порядком, изложенным в п. 4.1.

## 4.3 Содержание отчёта

- 1 Название лабораторной работы и цели работы.
- 2 Эпюры перемещений в зависимости от коэффициента нагрузки в исследованной модели.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Сущность анализа потери устойчивости.
- 2 Особенности задания свойств материала при анализе потери устойчивости.
- 3 Преимущества использования нелинейного анализа перед линеаризованным.
- 4 Порядок настройки параметров и создание сетки детали.
- 5 Инструменты просмотра основных результатов анализа потери устойчивости.

## **5 Лабораторное занятие № 5. SolidWorks Simulation. Анализ напряжённо-деформированного состояния сварной конструкции (самостоятельная работа)**

**Цель работы:** получить практические навыки при самостоятельном анализе напряжённо-деформированного состояния сварной конструкции.

### ***5.1 Порядок выполнения работы***

- 1 Создать трёхмерную модель сварной конструкции согласно рисунку 5.1.
- 2 Составить схему нагружения сварной конструкции и согласовать её с преподавателем.
- 3 Выполнить исследование напряжённо-деформированного состояния, руководствуясь порядком, изложенным в разделах 1 и 2.
- 4 Получить у преподавателя чертёж сварной конструкции (см. рисунок 5.1) и выполнить анализ напряжённо-деформированного состояния.

### ***5.2 Содержание отчёта***

- 1 Название лабораторной работы и цель работы.
- 2 Схема нагружения сварной конструкции.
- 3 Эскизы распределения напряжений и перемещений в исследованной модели.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Порядок назначения материала детали.
- 2 Порядок применения фиксированного ограничения и приложение нагрузки.
- 3 Порядок настройки параметров и создание сетки детали.
- 4 Инструменты просмотра основных результатов статического анализа.
- 5 Порядок оценки перемещений конструкции.
- 6 Порядок оценки прочности конструкции.

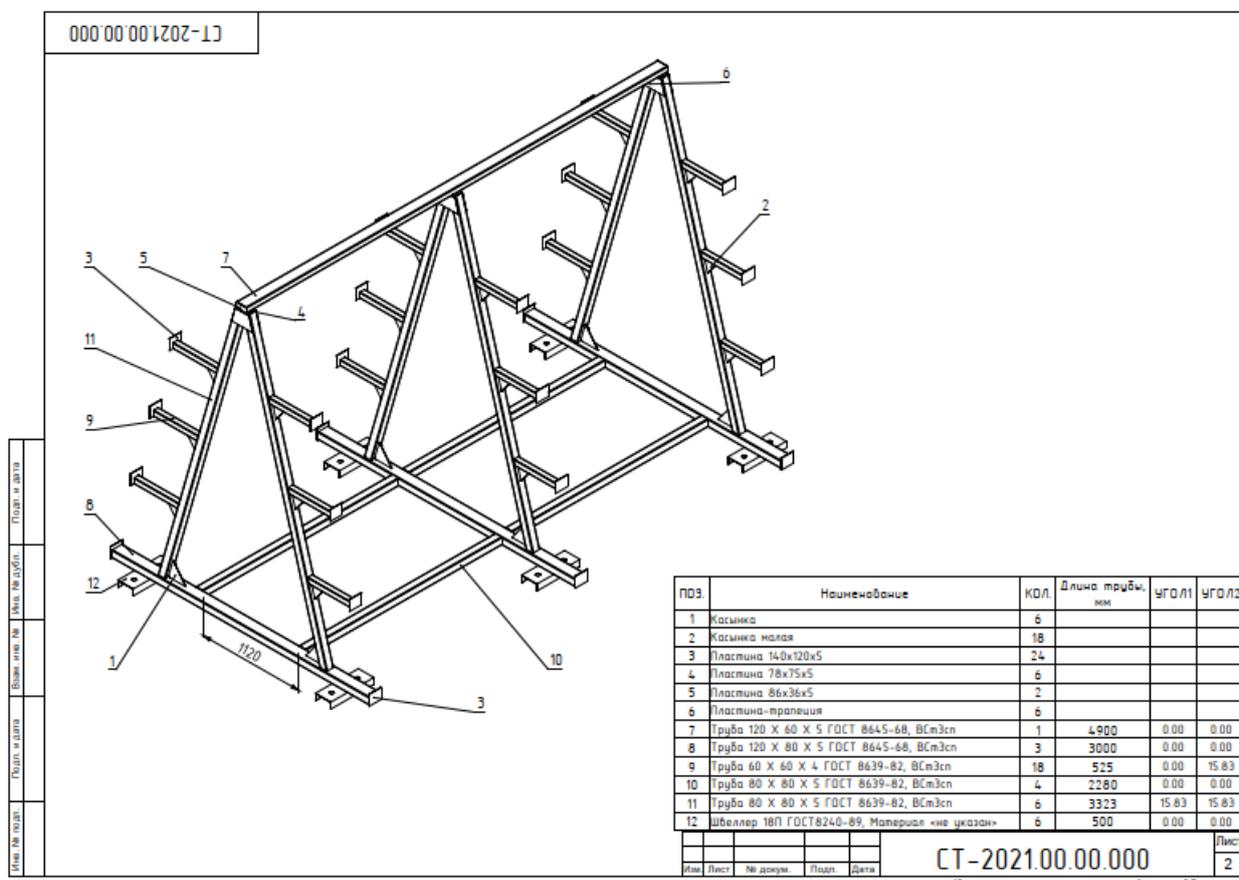
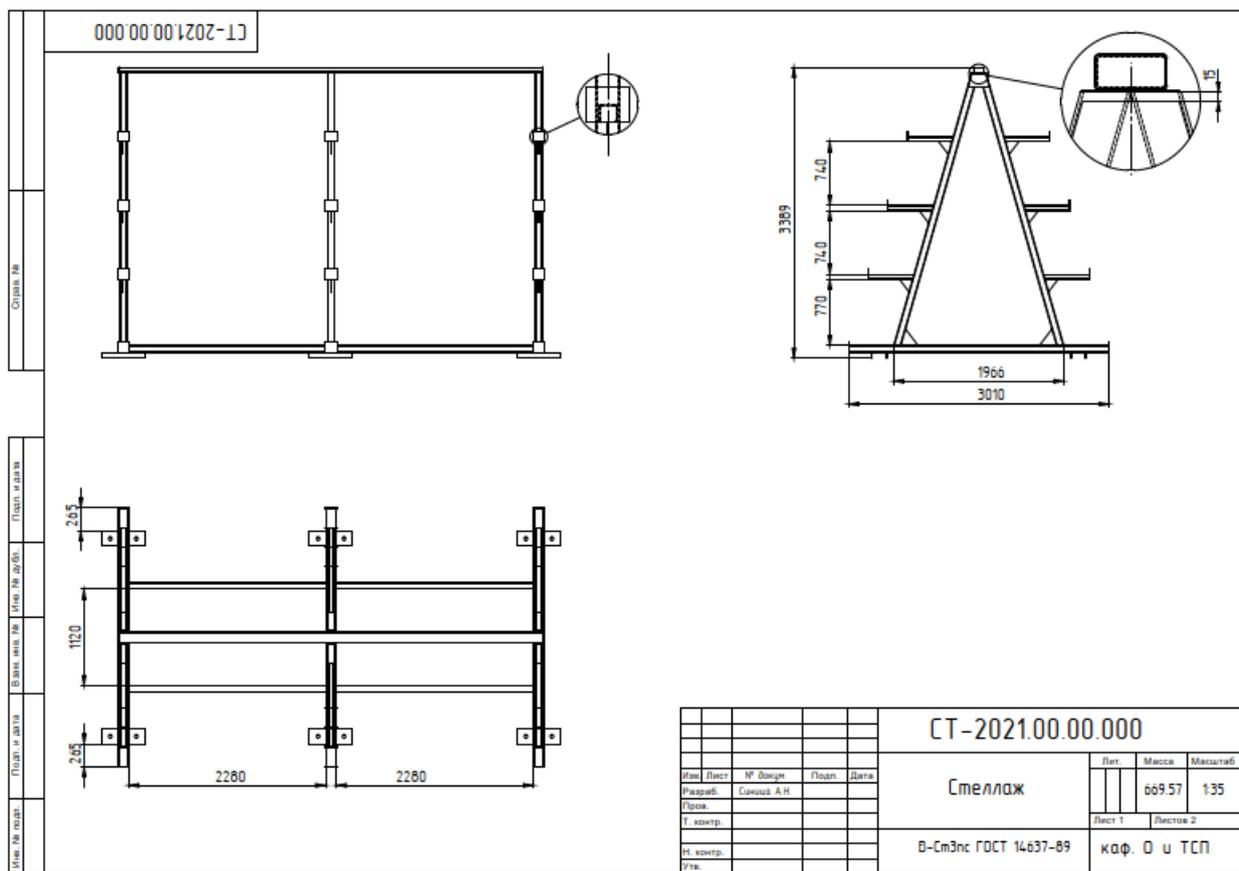


Рисунок 5.1 – Чертежи сварной конструкции

## 6 Охрана труда

### 6.1 Требования безопасности перед началом работы.

Студенту перед включением ПЭВМ необходимо:

- подготовить рабочее место, убрать ненужные для работы предметы;
- о всех замеченных технических неисправностях сообщить руководителю занятия, специалисту по работе на ПЭВМ.

### 6.2 Требования безопасности в процессе работы.

Запрещается:

- работать на неисправных ПЭВМ и средствах оргтехники;
- работать без соответствующего освещения и вентиляции рабочего места;
- работать, если при прикосновении к корпусам оборудования ощущается действие электрического тока;
- вскрывать корпуса ПЭВМ и средств оргтехники, разбирать периферийные и другие устройства;
- без необходимости включать принтер и другие периферийные устройства;
- оставлять без присмотра включенные в электросеть ПЭВМ, средства оргтехники и другие электроприборы;

### 6.3 Требования безопасности по окончании работы.

Студентам необходимо:

- закрыть приложения, завершить сеанс работы;
- привести в порядок рабочее место, убрать вспомогательные материалы и инструменты.

Требования безопасности в аварийных ситуациях.

При возникновении сбоев в работе, появлении дыма, искрения, посторонних шумов и запахов, теплового излучения, при ощущении действия электрического тока от прикосновения к корпусам ПЭВМ, средств оргтехники, приборов и инструментов необходимо отключить их от электрической сети и сообщить об этом преподавателю или специалисту по работе на ПК.

Категорически запрещено:

- без разрешения преподавателя входить и работать с ПЭВМ;
- без разрешения преподавателя работать с личными носителями информации;
- работать с ПЭВМ в верхней одежде;
- работать, положив клавиатуру на колени;
- открывать корпус системного блока, монитора, периферийных устройств;
- самостоятельно устранять какие-либо неисправности;
- изменять параметры (настройки) операционной системы;
- прикасаться пальцами к экрану монитора и изменять его настройки;
- устанавливать любые программы, а также запускать программы, не относящиеся к учебному процессу;
- предпринимать попытки несанкционированного доступа к близлежащим

или удаленным серверам, производить массовые рассылки электронных писем, рассылать сообщения, противоречащие законодательству Республики Беларусь;

- покидать рабочее место, не завершив работу с системой;
- выносить любые материальные ценности из компьютерного класса.

## Список литературы

1 **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / В. П. Куликов. – 3-е изд., стер. – Минск: Новое знание, 2019. – 463 с.

2 Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: учебное пособие / С. А. Куркин и [др.]; под ред. С. А. Куркина, В. М. Хохлова. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 464 с.

3 **Кондаков, А. И.** САПР технологических процессов: учебник / А. И. Кондаков. – 3-е изд., стер. – Москва: Академия, 2010. – 272 с.

4 SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский и [др.]. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.

5 **Присекин, В. Л.** Основы метода конечных элементов в механике деформируемых тел: учебник / В. Л. Присекин, Г. И. Расторгуев. – Новосибирск: Новосибир. гос. техн. ун-т, 2010. – 237 с.: ил.