




МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДФУ)


ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА ДФУ

«СОГЛАСОВАНО»  
Руководитель ОП

  
В.Н. Стаценко  
(подпись)

«15» октября 2015 г.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Заведующий кафедрой  
сварочного производства

  
А.В. Гридасов  
(подпись)

«15» октября 2015г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
Теория сварочных напряжений и деформаций  
**Направление подготовки 15.03.01 Машиностроение**  
Профиль «Оборудование и технология сварочного производства»  
**Форма подготовки очная/ заочная**

курс 3/4 семестр 6/7-8  
лекции 16/8 час.  
практические занятия 32/12 час.  
лабораторные работы - час.  
в том числе с использованием МАО лек. 4/2 /пр. 12/4 /лаб. - час.  
всего часов аудиторной нагрузки 48/20 час.  
в том числе с использованием МАО 16/6 час.  
самостоятельная работа 69/115 час.  
в том числе на подготовку к экзамену 27/9 час.  
контрольные работы не предусмотрены  
курсовая работа / курсовой проект 6/8 семестр  
зачет          семестр  
экзамен 6/8 семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования, утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от 03.09.2015 № 957.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры сварочного производства протокол № 3 от «15» октября 2015 г.

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Гридасов А.В.  
Составитель (ли): к.т.н., доцент Негода Е.Н.

**Оборотная сторона титульного листа РПУД**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**АННОТАЦИЯ**

Учебная дисциплина «Теория сварочных напряжений и деформаций» предназначена для направления подготовки 15.03.01 Машиностроение, профиль «Оборудование и технология сварочного производства» и относится к вариативной части блока 1 «Дисциплины (модули)» учебного плана, является обязательной дисциплиной (индекс Б1.В.ОД.6).

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 4 зачетные единицы, 144 часа и включает в себя следующее:

- лекционные занятия 16/8 час., в том числе по МАО 4/2 час.;
- практические занятия 32/12 час., в том числе по МАО 12/4 час.;
- лабораторные работы не предусмотрены учебным планом;
- самостоятельная работа студентов 69/107 час., в том числе на подготовку к экзамену 27/9 час.

Дисциплина с логически и содержательно связана с такими курсами, как «Высшая математика», «Физика», «Информатика», «Технология сварки плавлением», «Проектирование сварных конструкций», «Производство сварных конструкций».

### **Особенности построения и содержания курса**

Технологический нагрев материалов - один из основных или сопутствующих процессов обработки, особенно в области сварки. Совокупность явлений в металлах, вызванных изменением температуры, определяют технологические и эксплуатационные свойства изделия. Неравномерный нагрев металлов приводит к возникновению временных и остаточных напряжений и деформаций, наличие которых существенно влияет как на технологическую прочность соединений, так и на их эксплуатационную работоспособность. Навыки расчетного определения остаточных сварочных деформаций и напряжений, умение оценить их влияние на работоспособность конструкций и владение методами уменьшения их негативного влияния являются базовыми для специалиста сварочного производства. Овладение этими навыками является целью преподавания дисциплины.

### **Цель изучения дисциплины:**

приобретение студентами знаний в области термомеханики сварных конструкций и навыков расчета сварочных напряжений и деформаций.

**Задачи :**

- Сформировать представление о физических основах термомеханики сварочных деформаций.
- Изучить схему Николаева определения динамики сварочных деформаций.
- Изучить основы метода Кузьмина при определении сварочных деформаций.
- Освоить методы расчета сварочных деформаций и напряжений при сварке плоских конструкций.
- Выяснить особенности расчета сварочных деформаций и напряжений в конструкциях вращения.
- Изучить методы уменьшения остаточных сварочных напряжений и деформаций.
- Рассчитывать сварочные деформации металлических конструкций, в том числе, с использованием современных программных средств.
- Применять навыки анализа сварочных напряжений и деформаций при оценке технологической и эксплуатационной прочности сварных конструкций.

Для успешного изучения дисциплины «Теория сварочных напряжений и деформаций» у обучающихся должны быть сформированы следующие предварительные компетенции:

- **ОПК-1** - умением использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
- **ОПК-3** - владением основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации.

- **ОПК-5** - способностью решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.
- **ПК-11** - способностью обеспечивать технологичность изделий и процессов их изготовления; умением контролировать соблюдение технологической дисциплины при изготовлении изделий.
- **ПК-12** - способностью разрабатывать технологическую и производственную документацию с использованием современных инструментальных средств.
- **ПК-13** - способностью обеспечивать техническое оснащение рабочих мест с размещением технологического оборудования; умением осваивать вводимое оборудование.
- **ПК-14** - способностью участвовать в работах по доводке и освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новой продукции, проверять качество монтажа и наладки при испытаниях и сдаче в эксплуатацию новых образцов изделий, узлов и деталей выпускаемой продукции.
- **ПК-17** - умением выбирать основные и вспомогательные материалы и способы реализации основных технологических процессов и применять прогрессивные методы эксплуатации технологического оборудования при изготовлении изделий машиностроения.

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие профессиональные компетенции (элементы компетенций).

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции
--------------------------------	--------------------------------

<b>ПК-11.</b> Способностью обеспечить технологичность изделий и процессов их изготовления; умением контролировать соблюдение технологической дисциплины при изготовлении изделий.	Знает	методы уменьшения сварочных деформаций
	Умеет	разрабатывать технологические приемы изготовления конструкций при минимальных деформациях
	Владеет	способами измерения осевых сварочных деформаций
<b>ПК-14.</b> Способностью участвовать в работах по доводке и освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новой продукции, проверять качество монтажа и наладки при испытаниях и сдаче в эксплуатацию новых образцов изделий, узлов и деталей выпускаемой продукции.	Знает	методы уменьшения сварочных деформаций в ходе подготовки производства новой продукции
	Умеет	участвовать в работах по доводке и освоению технологических процессов
	Владеет	проверять качество монтажа при испытаниях и сдаче в эксплуатацию новых образцов изделий

Для формирования вышеуказанных компетенций в рамках дисциплины «Теория сварочных напряжений и деформаций» применяются следующие методы активного/ интерактивного обучения: круглый стол, дискуссия, дебаты, case-study (анализ конкретных ситуаций, ситуационный анализ); мастер класс.

## **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единиц 144 часа.

**Раздел 1. Физические основы термдеформирования (6/3 час, в том числе по МАО 2/1 час. - Лекция-визуализация)**

)

**Тема 1. Напряженное состояние (2/1 час).**

Понятие тензора напряжений. Тензор деформаций. Шаровой тензор. Девиатор

напряжений. Инварианты девиатора напряжений. Интенсивность напряжений. Интенсивность деформаций. Закон Гука. Предельные состояния материалов. Явление текучести. Диаграмма растяжения стали. Диаграмма Прандтля. Температурное расширение металлов. Коэффициент температурного расширения. Температурная зависимость механических свойств. Деформация и напряжения равномерно нагретого стержня. Стержень, заземленный одним концом. Стержень, упирающийся вторым концом. Полностью заземленный стержень. Диаграмма деформирования заземленного стержня. Плоское напряженное состояние. Плоская деформация. Линейное напряженное состояние. Плоское напряженное состояние при температурной деформации. Уравнения связи напряжений и деформаций. Температурные деформации при сварке пластин. Основные гипотезы и допущения. Гипотеза плоских сечений. Уравнения равновесия. Временные и остаточные сварочные напряжения и деформации. Продольные сварочные напряжения. Поперечные сварочные напряжения. Продольное укорочение листа. Поперечное укорочение листа. Деформации по краям листа. Деформации цилиндрических конструкций. Тангенциальные деформации. Осевые деформации. Деформации сферических конструкций.

## **Тема 2. Метод Николаева (2/1 час).**

Основные гипотезы и допущения метода. Деформации при нагреве края пластины. Расчет деформаций на стадии нагрева. Кривая температурной деформации. График полной деформации. Упругая деформация. Учет температурной зависимости предела текучести при построении кривой упругой деформации. Распределение пластической деформации. Расчет деформаций на стадии охлаждения. Пластическая деформация стадии нагрева как нагрузка стадии охлаждения. График полной деформации при охлаждении. Упругая деформация при охлаждении. Обратная пластическая деформация удлинения. Остаточные деформации. Остаточные напряжения. Эпюра остаточных продольных напряжений поперек шва. Метод Окерблома. Кривая темпера-

турной деформации. График полной деформации. Упругая деформация. Учет температурной зависимости предела текучести при построении кривой упругой деформации. Распределение пластической деформации. Расчет деформаций на стадии охлаждения. Пластическая деформация стадии нагрева как нагрузка стадии охлаждения. График полной деформации при охлаждении. Упругая деформация при охлаждении. Обратная пластическая деформация удлинения. Остаточные деформации. Остаточные напряжения. Эпюра остаточных продольных напряжений поперек шва. Метод Кузьмина. Уравнения равновесия в двух координатах. Термомеханическая и деформационная задачи. Максимальные температуры полубесконечного тела. Распределение деформаций при наплавке валика на полубесконечное тело. Погонный объем укорочения. Продольные деформации полубесконечного тела. Максимальные температуры при наплавке валика в пластине. Распределение деформаций при наплавке валика в пластине. Продольные деформации пластин. Эпюры остаточных напряжений.

### **Тема 3. Поперечные деформации (2/1 час).**

Механизм образования поперечных деформаций. Три зоны при возникновении поперечных деформаций во время нагрева. Поперечное укорочение при охлаждении. Погонный объем поперечного укорочения сварного шва. Поперечные деформации при неравномерном нагреве по толщине листа. Угловые деформации пластин, вызванные неравномерным нагревом по толщине. Поперечные деформации угловых сварных соединений. Три вида поперечных деформаций при сварке углового шва. Отличие первого и второго шва при двусторонней сварке таврового соединения. Деформации тавровых соединений. Приведенная ширина таврового соединения. Продольное укорочение полотнищ, Поперечное укорочение полотнищ Углы поворота сечений полотнищ. Расчет общих деформаций полотнищ с набором. Эпюра остаточных сварочных напряжений. Распределение продольных сварочных напряжений поперек шва. Распределение продольных сварочных напряже-



ний вдоль шва. Распределение поперечных сварочных напряжений поперек шва. Распределение поперечных сварочных напряжений вдоль шва. Результаты численного определения сварочных напряжений. Концевой эффект сварочных напряжений. Возникновений сварочных деформаций от потери устойчивости полотна. Закономерности распределения остаточных напряжений в пластинах. Остаточные напряжения в коротких швах. Причины образования дефектов при сварке коротких швов.

## **Раздел 2. Экспериментальные и расчетные методы оценки ОСН (6/3 час, в том числе по МАО 2/1 час. - Лекция-визуализация)**

### **Тема 1. Взаимодействие остаточных сварочных напряжений и нагрузки (2/1 час).**

Статическая нагрузка. Эпюра остаточных сварочных напряжений при приложении продольной растягивающей нагрузки. Эпюра остаточных сварочных напряжений при снятии продольной растягивающей нагрузки. Зависимость величины остаточных сварочных напряжений от амплитуды внешней растягивающей нагрузки. Поперечная статическая нагрузка. Эпюры остаточных сварочных напряжений при приложении и снятии поперечной нагрузки. Динамическая усталостная нагрузка на сварное соединение.

Основные параметры усталостного разрушения. Диаграмма Веллера. Диаграмма Смита при наличии сварочных напряжений. Определения асимметрии цикла нагружения. Определение эквивалентных напряжений. Примеры численного анализа усталости сварных конструкций. Датчики малых перемещений. Стрелочные индикаторы, механотроны, тензодатчики. Определение временных и остаточных сварочных деформаций непосредственным измерением. Определение остаточных сварочных напряжений. Разрушаю-

щие методы. Метод тензометрирования при определении сварочных напряжений. Розетка датчиков при определении сварочных напряжений. Достоинства и недостатки метода. Другие разрушающие методы. Неразрушающие методы. Электромагнитные методы. Достоинства и недостатки. Исследование остаточных напряжений на моделях. Оптические методы определения остаточных напряжений.

## **Тема 2. Цилиндрические конструкции (2/1 час).**

Основные допущения и расчетные схемы определения сварочных деформаций в конструкциях вращения. Цилиндрические конструкции. Длинные цилиндры (трубы). Напряжения при выполнении продольных швов трубопроводов. Деформации изгиба при выполнении продольных швов. Поперечные деформации при сварке трубопровода. Деформации и напряжений при выполнении кольцевых швов. Изменение диаметра. Расчет геометрических характеристик сварочных деформаций при сварке трубопроводов. Короткие цилиндры. Деформации и напряжения от продольных швов. Деформации и напряжения при выполнении кольцевых швов обечаек. Расчет деформаций и напряжений при выполнении кольцевых швов обечаек.

## **Тема 3. Численные методы расчета термомеханической задачи (2/1 час).**

Метод конечных элементов при расчете сварочных деформаций и напряжений. Основы метода конечных элементов. Входная информация МКЭ. Формирование геометрии. Задание сил. Задание граничных условий. Матрица жесткости. Система уравнений МКЭ. Решение системы уравнений. Результат решения. Вычисление деформаций и напряжений. Программа ANSYS. Интерактивный и программный режимы. Формирование геометрии. Задание сил. Задание граничных условий. Задание сварочного термического цикла в программе ANSYS. Результат решения. Построение полей деформаций и напряжений. Примеры решения инженерных задач сварочного произ-

водства в пакете ANSYS. Программа КОМПАСС. Формирование геометрии. Задание сил. Задание граничных условий. Результат решения. Программы SYSWELD, WELD PLANNER, VISUAL WELD

### **Раздел 3. Определение остаточных деформаций и прочности конструкций (4/2 час)**

#### **Тема 1. Циклическая нагрузка в цилиндрических конструкциях (2/1 час).**

Взаимодействие остаточных сварочных напряжений и циклической нагрузки в цилиндрических конструкциях. Технологические приемы выполнения кольцевых швов обечаек. Сварка снизу вверх. Сварка сверху вниз. Выполнение швов трубопроводов большого диаметра. Численный расчет сварочных напряжений и деформаций при выполнении швов труб малого диаметра. Распределение асимметрии цикла. Распределение предельной поврежденности в усталостном разрушении. Численный расчет сварочных напряжений и деформаций при выполнении швов труб большого диаметра по схеме В1. Особенности моделирования сварочного цикла. Распределение предельной поврежденности в усталостном разрушении при выполнении шва по схеме В1. Моделирование сварочного цикла при сварке труб большого диаметра по секторной схеме. Распределение асимметрии цикла и предельной поврежденности в усталостном разрушении при многоцикловом нагружении. Деформации и напряжения как компоненты энергетического состояния сварной конструкции. Соотношение между напряжениями и деформациями в процессе внешних воздействий. Уменьшение сварочных деформаций как путь повышения точности изготовления сварных конструкций. Методы предотвращения остаточных деформаций. Средства уменьшения деформаций, возникающих при сварке конструкций. Конструктивные меры уменьшения сварочных деформаций. Закрепление свариваемых деталей. Применение обратных выгибов. Предварительный изгиб. Начальное растяжение. Сварка в

закрепленном состоянии. Технологические методы уменьшения сварочных деформаций. Технологические методы уменьшения сварочных напряжений. Меры уменьшения деформаций при сварке плоских конструкций. Меры уменьшения деформаций при сварке конструкций рамного типа. Уменьшение деформаций при сварке трубопроводов. Уменьшение деформаций при сварке сосудов и цистерн.

## **Тема 2. Методы исправления конструкций (2/1 час).**

Методы правки. Тепловая правка конструкций. Тепловая правка балочных конструкций. Тепловая правка плоских конструкций. Тепловая правка участков потери устойчивости плоских конструкций. Механическая прокатка шва. Деформации, возникающие при прокатке шва. Прокатка околошовной зоны. Проковка шва. Приложение статической нагрузки. Растяжение сварного соединения.

Основные принципы уменьшения остаточных сварочных напряжений. Конструктивные меры. Уменьшение объемности напряженного состояния. Технологические меры уменьшения сварочных напряжений. Влияние погонной энергии на возникновение сварочных напряжений. Влияние последовательности выполнения швов на остаточные напряжения. Термическая обработка сварных соединений с целью уменьшения сварочных напряжений. Локальная и общая термообработка. Увеличение деформаций при термообработке. Методы и средства термообработки. Термообработка труб большого диаметра. Влияние фазовых превращений на сварочные напряжения.

## **II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

**Практические занятия (32/12 час, в том числе по МАО 12/4 час.)**

**Занятие 1. Расчет деформаций и напряжений стержня при термическом цикле (4/2 час, в том числе по МАО 2/1 час.)**

1. Построение диаграммы деформирования для свободного стержня.
2. Построение диаграммы деформирования для упертого стержня.
3. Построение диаграммы деформирования для защемленного стержня.
4. Оформление отчета.

**Занятие 2. Метод Николаева при расчете сварочных деформаций и напряжений (8/4 час, в том числе по МАО 4/1 час.)**

1. Расчет стадии нагрева края пластины.
2. Расчет стадии охлаждения края пластины.
3. Расчет стадии нагрева центра пластины.
4. Расчет стадии охлаждения центра пластины.
5. Оформление отчета.

**Занятие 3. Расчет сварочных деформаций по методу Кузьмина (6/4 час, в том числе по МАО 2/1 час.)**

1. Определение данных задания.
2. Расчет параметров сварочного нагрева.
3. Расчет геометрических параметров сечения.
4. Расчет сварочных деформаций.
5. Оформление отчета.

**Занятие 4. Расчет напряженно – деформированного состояния сварных конструкций методом конечных элементов (6/2 час, в том числе по МАО 2/1 час.)**

1. Изучение основ метода конечных элементов.
2. Изучение основ работы в пакете ANSYS.
3. Расчет напряженно-деформированного состояния пластины.

4. Знакомство с другими пакетами расчета МКЭ – Visual Weld, Simufact Welding.

5. Оформление отчета.

### **Занятие 5. Расчет напряженно – деформированного состояния МКЭ в программе КОМПАС (8/0 час, в том числе по МАО 2/0 час.)**

1. Изучение работы в пакете КОМПАС.

2. Изучение примера выполнения расчета напряженно-деформированного состояния в пакете КОМПАС.

3. Формирование геометрии заданной конструкции.

4. Расчет конструкции в АРМ FEM КОМПАС.

5. Оформление отчета.

## **III. УЧЕБНО – МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Учебно – методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

план – график дисциплины в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;

характеристики заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;

требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;

критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

**Лабораторные работы не предусмотрены учебным планом.**

## **IV. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

№	Контролируемые модули/	Коды и этапы форми-	Оценочный средства-
---	------------------------	---------------------	---------------------

	разделы/темы дисциплины	формирования компетенций		наименование	
				Текущий контроль	Промежуточная аттестация
1	Напряженное состояние	ПК-11 ПК-14	Знает	Опрос. УО-1	1-2
			Умеет	Опрос. УО-1	1-2
			Владеет	ПЗ-1 ПР-12	
2	Метод Николаева	ПК-11	Знает	Опрос. УО-1	3-5
			Умеет	ПЗ-2 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-2 ПР-12	
3	Поперечные деформации	ПК-11	Знает	Опрос. УО-1	6-10
			Умеет	ПЗ-2 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-2 ПР-12	
4	Взаимодействие ОСН и нагрузки	ПК-14	Знает	Опрос. УО-1	11-14
			Умеет	ПЗ-3 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-3 ПР-12	
5	Цилиндрические конструкции	ПК-11	Знает	Опрос. УО-1	15-19
			Умеет	ПЗ-3 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-3 ПР-12	
6	Численные методы расчета термомеханической задачи	ПК-11	Знает	Опрос. УО-1	20-24
			Умеет	ПЗ-4 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-4 ПР-12	
7	Циклическая нагрузка в цилиндрических конструкциях	ПК-14 ПК-11	Знает	Опрос. УО-1	25-28
			Умеет	ПЗ-4 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-4 ПР-12	
8	Методы правки конструкций	ПК-14	Знает	Опрос. УО-1	29-31
			Умеет	ПЗ-5 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-5 ПР-12	
9	Заключительная лекция	ПК-14 ПК-11	Знает	Опрос. УО-1	32-40
			Умеет	КР ПР-5	
			Владеет	КР ПР-5	

Типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и(или) опыта деятельности, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, представлены в Приложении 2.

## **V. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

## **Основная литература**

*(печатные и электронные издания)*

1. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров, В.М. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с. Режим доступа: <http://baumanpress.ru/books/563/563.pdf>

2. Теория свариваемости сталей и сплавов / Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин ; под ред. Э. Л. Макарова. – Москва : Изд-во Московского технического университета, 2014. – 487 с. Режим доступа: <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:791470&theme=FEFU>

3. Дедюх Р.И. Теория сварочных процессов. Превращения в металлах при сварке [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Дедюх Р.И.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский политехнический университет, 2012.— 155 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55210> .— ЭБС «IPRbooks»

## **Дополнительная литература**

*(печатные и электронные издания)*

1. Негода Е.Н. Методические указания по выполнению практических заданий по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций» для студентов специальности 150202. – Владивосток: Издательство ДВГТУ, 2011.-24 с.

2. Гатовский К.М. Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. - Л.: ЛКИ, 1980. – 331с.- Режим доступа: <http://booktech.ru/books/svarka/9284>

с.

3. Николаев Г.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 446 с.- Режим доступа: <http://www.materialscience.ru/subjects/svarka/knigi>



4. А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. ANSYS для инженеров. М.: Машиностроение, 2004. 512 с. Режим доступа: <http://bookfi.net/book/497235>

5. Кузминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. – Л.: Изд-во Судостроение, 1974. – 287 с. – Режим доступа: <http://www.morkniga.ru/p189170.html>

### **Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»**

- <http://websvarka.ru>
- <http://www.svarka.com>
- <http://autoweld.ru/statyai.php>
- <http://www.shtorm-its/ru>
- <http://www.osvarke.com>
- <http://www.autowelding.ru>
- <http://www.drevniymir.ru>
- <http://www.weldportal.ru>
- <http://www.esab.ru>
- <http://www.spetsselektrode.ru>

### **Перечень информационных технологий и программного обеспечения.**

При выполнении практических заданий и курсовой работы используются следующие программы:

1.Nikol\_sntu.m – программа в пакете MatLab, предназначенная для расчета сварочных деформаций в пластинах. Используется при выполнении практического задания №2.

2.KOMPAS, ANSYS – пакеты программ для расчета напряженно-деформированного состояния сварных конструкций. Предназначены для выполнения практического задания №3.

3.Visual Weld, Simufact Welding – пакеты программ для моделирования сварочных процессов. Предназначены для выполнения дополнительных заданий и ВКР по направлению «Теория сварочных напряжений и деформаций».

## **VI.МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **6.1. Рекомендации по планированию и организации времени, отведенного на изучение дисциплины**

На изучение дисциплины отведено 144 часа, из них 69/107 часов – самостоятельная работа студентов. Данное время должно быть использовано обучающимся планомерно в течение всего семестра.

Планирование – важнейшая черта человеческой деятельности, один из характерных, обязательных признаков человеческого труда. Для организации сложной учебной деятельности очень эффективным является использование средств, напоминающих о стоящих перед нами задачах, их последовательности выполнения. Такими средствами могут быть мобильный телефон, имеющий программу органайзера, включающего будильник, календарь и список дел; таймеры, напоминающие о выполнении заданий по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций»; компьютерные программы составления списка дел, выделяющие срочные и важные дела.

Регулярность – первое условие поисков более эффективных способов работы. Рекомендуется выбрать один день недели для регулярной

подготовки по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций». Регулярность не просто позволяет подготовиться к делу, она создает настрой на это дело, позволяет выработать правила выполнения дела (например, сначала проработка материала лекции, учебника, чтение первоисточника, затем выделение и фиксирование основных идей в тетради).

Еженедельная подготовка по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций» требует временных затрат – это 5 часов в неделю.

Начиная изучение дисциплины «Теория сварочных напряжений и деформаций» необходимо:

- ознакомиться с программой, изучить список рекомендуемой литературы. К программе курса необходимо будет возвращаться постоянно, по мере усвоения каждой темы в отдельности, для того чтобы понять: достаточно ли полно изучены все вопросы;

- внимательно разобраться в структуре дисциплины в системе распределения учебного материала по видам занятий, формам контроля, чтобы иметь представление о курсе в целом, о лекционной и практической части всего курса изучения;

- обратиться к методическому пособию по дисциплине, позволяющим ориентироваться в последовательности выполнения практических заданий;

При подготовке к занятиям по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций» необходимо руководствоваться нормами времени на выполнение заданий. Например, при подготовке к занятию на проработку конспекта одной лекции, учебников, как правило, отводится около 0,5 часа, а на изучение первоисточников объемом 16 страниц печатного текста с составлением конспекта 1,5–2 часа, с составлением лишь плана около 1 часа.

## **6.2 Описание последовательности действий при изучении дисциплины**

В соответствии с целями и задачами дисциплины студент изучает на занятиях и дома разделы лекционного курса, готовится к практическим занятиям, проходит контрольные точки текущей аттестации, включающие разные формы проверки усвоения материала: контрольный опрос.

Освоение дисциплины включает несколько составных элементов учебной деятельности.

1. Внимательное чтение программы курса (помогает целостно увидеть структуру изучаемых вопросов).

Важная роль в планировании и организации времени на изучение дисциплины отводится знакомству с планом-графиком выполнения самостоятельной работы студентов по дисциплине. В нем содержится перечень контрольных испытаний для всех разделов и тем, включая экзамен; указаны сроки сдачи заданий, предусмотренных учебной программой курса дисциплины «Теория сварочных напряжений и деформаций».

2. Важнейшей составной частью освоения курса является посещение лекций (обязательное) и их конспектирование. Глубокому освоению лекционного материала способствует предварительная подготовка, включающая чтение предыдущей лекции, работу с учебниками.

3. Регулярная подготовка к практическим занятиям и активная работа на занятиях, включающая:

- повторение материала лекции по теме семинара;
- знакомство с планом занятия и списком основной и дополнительной литературы, с рекомендациями по подготовке к занятию;
- изучение научных сведений по данной теме в разных учебных пособиях;
- чтение первоисточников и предлагаемой дополнительной литературы;
- посещение консультаций с целью выяснения возникших сложных вопросов при подготовке к практике, сдаче практических заданий, подготовке к тестовым заданиям.

4. Самостоятельная проработка тем, не излагаемых на лекциях.  
написание конспекта.

5. Подготовка к экзамену (в течение семестра), повторение материала  
всего курса дисциплины.

## **VII. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Занятия лекционного типа проводятся в учебной аудитории L-346, оборудованной рядом компьютеров, предназначенных для выполнения практических заданий. Для организации самостоятельной работы обучающимся должен быть обеспечен доступ к компьютеру, удаленный доступ к современным профессиональным базам данных и информационным справочным системам.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДВФУ)

---

---

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ  
РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**  
**по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций»**  
**Направление подготовки 15.03.01. Машиностроение**  
**профиль «Оборудование и технология сварочного производства»**  
**Форма подготовки очная/ заочная**

**Владивосток**  
**2015**

### План график выполнений самостоятельной работы по дисциплине

№	Дата выполнения	Вид самостоятельной работы	Нормы времени на выполнение	Форма контроля
1	5-й семестр 2 неделя 4 неделя 6 неделя 8 неделя 10 неделя 12 неделя 14 неделя 16 неделя	Подготовка к практическим занятиям	60	опрос
2	8 неделя 18 неделя	Выполнение курсовой работы	42	Контроль промежуточных и окончательного результатов выполнения курсовой работы.

**Характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению.**

#### 1. Подготовка к практическим занятиям

**Практическое занятие № 1.** *Расчет деформаций и напряжений стержня при термическом цикле.*

Цель занятия: изучение процесса термдеформирования с возникновением остаточных напряжений и деформаций.

Практическое занятие направлено на изучение процесса термдеформирования при нагреве стержня в трех вариантах: 1) стержень свободно подвешен; 2) стержень уперт между двумя плитами; 3) стержень защемлен обоими концами. Здесь важно не только осознать механизм образования остаточных явлений в стержне, но и изобразить соответствующие диаграммы термдеформирования.

**Практическое занятие № 2.** *Метод Николаева при расчете сварочных деформаций и напряжений.*

Цель занятия: освоение инженерных методов анализа сварных конструкций.

Практическое занятие направлено на изучение процесса формирования временных и остаточных сварочных деформаций и расчет их по методу Николаева. Для выполнения задания необходимо:

1. Изучить теоретические сведения по методу Николаева.
2. Разобраться со смыслом всех входных параметров программы Nikol\_stu, предназначенной для расчета и построения кривых деформирования.
3. Ввести в программу данные варианта и получить расчет.
4. На полученные в результате расчета графики нанести все обозначения соответствующих линий, точек и размеров.

Основное внимание нужно уделить пониманию принципиального смысла метода Николаева.

**Практическое занятие № 3.** *Расчет сварочных деформаций по методу Кузьмина.*

Цель занятия – приобретения навыков расчета общих деформаций сварных конструкций на примере тавровой балки по методу Кузьмина.

Основная трудоемкость выполнения задания связана с расчетом момента инерции таврового сечения. Здесь нужно повторить соответствующий раздел сопротивления материалов. Все вычисления необходимо систематизировать в соответствии с таблицей, приведенной в методических указаниях по выполнению практических заданий по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций».

**Практическое занятие № 4.** *Расчет напряженно – деформированного состояния сварных конструкций методом конечных элементов.*

Цель занятия – приобретение навыков расчета сварных конструкций с использованием метода конечных элементов.



При выполнении расчетов с использованием МКЭ необходимо представлять, что существует последовательность процедур метода, а именно:

- Создание геометрической модели (процедура Geometri). Модель может быть создана или средствами ANSYS или в другом графическом пакете, но в этом случае необходимо согласовать расширение файлов экспорта – импорта.

- Задание физико – механических свойств материала (процедура Material). На этом этапе задаются свойства материала, которые могут быть весьма сложными. На этапе обучения можно ограничиться модулем упругости, коэффициентом Пуассона, пределом текучести, билинейным упрочнением.

- Разбиение модели на конечные элементы (процедура Mesh). От особенностей разбиения зависит не только точность решения, но и возможность его получения в принципе. В начале работы с МКЭ нужно воспользоваться процедурами автоматического разбиения.

- Задание граничных условий (закреплений) (процедура Clamping Conditions). Эта процедура предназначена для фиксации конструкции в пространстве. Компьютеру нужно «объяснить», что конструкция должна оставаться на месте, не лететь куда-то и вращаться. Это задается предотвращением перемещений в нескольких точках в различных направлениях.

- Задание нагрузок (процедура Load). Здесь нужно задать или сосредоточенные нагрузки в узлах, распределенные по плоскости. Для задач определения сварочных напряжений задается только температурная «нагрузка». Для этого в процедуре Load есть соответствующие опции.

- Расчет (процедура Solve). В этой процедуре осуществляется решение системы уравнений, создание которой есть задача предыдущих процедур. Результатом решения являются перемещения всех узлов конечных элементов, по которым вычисляются деформации и напряжения в соответствии с геометрической и физической моделью материала.

- Представление результатов (Postprocessor). Это целый блок, позволяющий представить результаты расчета в графическом виде.

Таким образом, осуществив последовательно все процедуры, можно анализировать результат.

### **Практическое занятие № 5. Расчет напряженно – деформированного состояния МКЭ в программе КОМПАС**

Пакет программ КОМПАС предназначен в основном для создания 3D моделей конструкций и построения по ним чертежей. Расчет МКЭ вспомогательный. В общем, существует несколько пакетов, в которых создается геометрия конструкции и ее расчет методом конечных элементов. В них делается акцент или на геометрию, или на расчет МКЭ. Пакет ANSYS достаточно универсален, но все же с акцентом на МКЭ. Пакет КОМПАС имеет то достоинство, что позволяет построить объемную геометрическую модель и сделать по ней качественные чертежи, то есть провести конструкторскую подготовку производства, в том числе и осуществить проверку конструкции на прочность.

### **Курсовая работа**

Целью курсовой работы является приобретение практических навыков в инженерно-технологической работе при определении ожидаемых остаточных деформаций сварных конструкций, расчете их основных параметров, а также при расчете режимов и технологии сварки различных материалов. При выполнении работы студент должен выбрать в зависимости от задания способ сварки или резки. В соответствии с выбранным способом студенту необходимо определить тип оборудования. При этом для правильной эксплуатации требуется учитывать ряд критериев, связанных с техническими и эксплуатационными характеристиками.

Срок выдачи задания студентам дневного отделения 6 неделя после начала семестра.

Срок окончания работы и его защита не позже 16 недели.

**Курсовая работа должна содержать следующие разделы:**

1. Описание конструкции из заданного материала (химические, физические и механические свойства);
2. Выбор режимов сварки (форма разделки кромок, количество проходов и режимы сварки);
3. Причины возникновения остаточных сварочных деформаций и классификация остаточных сварочных деформаций;
4. Расчет и построение эпюры продольных сварочных деформаций;
5. Расчет продольных сварочных деформаций;
6. Расчет поперечных сварочных деформаций;
7. Расчет общих сварочных деформаций;
8. Мероприятия по уменьшению остаточных сварочных деформаций и напряжений.

Работа должна быть представлена расчетно-пояснительной запиской объемом не менее 20-25 стр., в которой должно быть отражены все главы.

**Порядок выполнения работы**

1. Во введении необходимо подробно описать заданную конструкцию, объяснить причины вызывающие деформации и напряжения сварных конструкций, дать классификацию сварочных деформаций и напряжений.
2. Для расчетного определения ожидаемых сварочных деформаций сварной конструкции необходимо знать механические и теплофизические свойства материала.
3. Выбор режима сварки.

Технологию сварки и сборки конструкции следует разрабатывать с учетом обеспечения минимальной величины сварочных напряжений, и там, где это диктуется условиями работы конструкции, предусматривать снятие

этих напряжений. При этом следует учитывать, что снятие сварочных напряжений – весьма трудоемкая и сложная операция, и к ней следует прибегать только при действительной, технически обоснованной необходимости. Если значения сварочных напряжений достигнут предела текучести металла, они вызовут его пластическую деформацию, а следовательно, и изменения размеров и формы свариваемой конструкции, т.е. ее деформацию (коробление).

В соответствии с ОСТ 5.9083–83 «Корпуса стальных судов. Сварка углеродистых и низколегированных сталей» в работе необходимо выбрать способ сварки, род тока, полярность, положение при сварке. Геометрические размеры формы подготовки кромок, а также режимы сварки привести в таблице.

#### 4. Построение эпюры продольных деформаций.

Для построения эпюры продольных деформаций необходимо пользоваться методом Г.А. Николаева. При этом принимается:

- гипотеза плоских сечений, устанавливающая, что поперечные сечения пластин в процессе сварки не искривляются;
- гипотеза одноосных напряжений, согласно которой в свариваемых пластинах возникают лишь напряжения  $\sigma_x$ ;
- схематизированная зависимость предела текучести от относительной упругой деформации на уровне предела текучести от температуры;
- модель идеально упругопластического тела;
- независимость теплофизических свойств металла от температуры в широком интервале температур;
- равномерность распределения температур, деформаций и напряжений по толщине пластины.

Цель метода – определение параметров  $\varepsilon_{пол}^{ост}$ ,  $b_{п}$ ,  $u^*$ , которые позволяют построить эпюру остаточных упругих  $\varepsilon_{упр}^{ост}$  деформаций (напряжений) в поперечном сечении сварного стыкового соединения. Чтобы определить указанные параметры, необходимо рассмотреть продольные деформации в поперечном сечении на двух стадиях – нагрева и в остаточном состоянии после

полного охлаждения. В каком именно поперечном сечении по длине соединения рассматривать деформации после охлаждения – не имеет значения, поскольку считается, что все поперечные сечения в смысле напряженно-деформированного состояния одинаковы. Что же касается стадии нагрева, то в этом состоянии далеко не безразлично, какое поперечное сечение необходимо рассматривать. Г.А. Николаев предлагает рассматривать деформации в поперечном сечении, в котором при нагреве в процессе движения источника тепла достигается максимальная ширина изотермы 600 °С.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДФУ)

---

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
**по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций»**  
**Направление подготовки 15.03.01. Машиностроение**  
**профиль «Оборудование и технология сварочного производства»**  
**Форма подготовки очная/заочная**

**Владивосток**  
**2015**

**Паспорт  
фонда оценочных средств  
По дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций»**

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
<b>ПК-11.</b> Способностью обеспечивать технологичность изделий и процессов их изготовления; умением контролировать соблюдение технологической дисциплины при изготовлении изделий.	Знает	методы уменьшения сварочных деформаций
	Умеет	разрабатывать технологические приемы изготовления конструкций при минимальных деформациях
	Владеет	способами измерения осевых сварочных деформаций
<b>ПК-14.</b> Способностью участвовать в работах по доводке и освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новой продукции, проверять качество монтажа и наладки при испытаниях и сдаче в эксплуатацию новых образцов изделий, узлов и деталей выпускаемой продукции.	Знает	методы уменьшения сварочных деформаций в ходе подготовки производства новой продукции
	Умеет	участвовать в работах по доводке и освоению технологических процессов
	Владеет	проверять качество монтажа при испытаниях и сдаче в эксплуатацию новых образцов изделий

№	Контролируемые модули/разделы/темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства-наименование		
			Текущий контроль	Промежуточная аттестация	
1	Напряженное состояние	ОПК-1 ОПК-3	Знает	Опрос. УО-1	1-2
			Умеет	Опрос. УО-1	1-2
			Владеет	ПЗ-1 ПР-12	
2	Метод Николаева	ОПК-1 ОПК-3 ПК-11	Знает	Опрос. УО-1	3-5
			Умеет	ПЗ-2 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-2 ПР-12	
3	Поперечные деформации	ОПК-1 ОПК-3 ПК-11	Знает	Опрос. УО-1	6-10
			Умеет	ПЗ-2 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-2 ПР-12	
4	Взаимодействие ОСН и нагрузки	ОПК-1 ОПК-3 ПК-14	Знает	Опрос. УО-1	11-14
			Умеет	ПЗ-3 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-3 ПР-12	
5	Цилиндрические конструкции	ОПК-1 ОПК-3 ПК-11	Знает	Опрос. УО-1	15-19
			Умеет	ПЗ-3 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-3 ПР-12	
6	Численные методы расчета термомеханической задачи	ОПК-1 ОПК-3 ПК-11	Знает	Опрос. УО-1	20-24
			Умеет	ПЗ-4 ПР-12	
			Владеет	ПЗ-4 ПР-12	
7	Циклическая нагрузка в	ОПК-1	Знает	Опрос. УО-1	25-28

	цилиндрических конструкций	ПК-14 ПК-11	Умеет Владеет	ПЗ-4 ПР-12 ПЗ-4 ПР-12	
8	Методы правки конструкций	ОПК-1 ОПК-3 ПК-14	Знает Умеет Владеет	Опрос. УО-1 ПЗ-5 ПР-12 ПЗ-5 ПР-12	29-31
9	Заключительная лекция	ОПК-1 ПК-14 ПК-11	Знает Умеет Владеет	Опрос. УО-1 КР ПР-5 КР ПР-5	32-40

**Шкала оценивания уровня сформированности компетенций по дисциплине «Автоматизация сварочных процессов»**

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		критерии	показатели	баллы
<b>ОПК-1.</b> Умением использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	Знает	физические процессы образования остаточных сварочных напряжений и деформаций. Методы предотвращения остаточных деформаций	Знание основных понятий и определений теории сварочных напряжений и деформаций;	-способность дать определения основных понятий теории сварочных напряжений и деформаций	45-64
	Умеет	рассчитывать сварочные деформации. Определять технологические схемы устранения сварочных деформаций	Умение рассчитывать сварочные напряжения и деформации.	-способность определять технологические схемы устранения сварочных деформаций	65-84
	Владеет	методами численного расчета деформаций и напряжений, нормативной документацией по данному направлению.	Владеет Численными методами расчета сварочных напряжений и деформаций	-способность рассчитывать на ЭВМ сварочные напряжения и деформации.	85-100
<b>ОПК-3.</b> Владением основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации.	Знает	способы и средствами получения, хранения, переработки информации	Знает способы и средствами получения, хранения, переработки информации	-способность разбираться в методах получения, хранения, переработки информации	45-64
	Умеет	получать, хранить, перерабатывать информацию	Умеет получать, хранить, перерабатывать информацию	- способность получать, хранить, перерабатывать информацию	65-84
	Владеет	владеет основными методами переработки информации.	Владеет основными методами переработки ин-	- способность применять различные методы получения, хра-	85-100



			формации.	нения, переработки информации	
<b>ПК-11.</b> Способностью обеспечивать технологичность изделий и процессов их изготовления; умением контролировать соблюдение технологической дисциплины при изготовлении изделий.	Знает	методы уменьшения сварочных деформаций	Знает методы борьбы с остаточными сварочными деформациями	- способность выбрать метод уменьшения сварочных деформаций	45-64
	Умеет	разрабатывать технологические приемы изготовления конструкций при минимальных деформациях	Умеет разрабатывать технологические приемы изготовления конструкций при минимальных деформациях	- способность рассчитать технологические приемы изготовления конструкций при минимальных деформациях	65-84
	Владеет	способами измерения остаточных сварочных деформаций	Владеет способами измерения и оценки остаточных сварочных деформаций	- способность организовать технологию изготовления конструкций с получением минимума сварочных деформаций.	85-100
<b>ПК-14</b> Способностью участвовать в работах по доводке и освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новой продукции, проверять качество монтажа и наладки при испытаниях и сдаче в эксплуатацию новых образцов изделий, узлов и деталей выпускаемой продукции.	Знает	основные методы проектирования конструкций с минимумом ОСН	Знает основные методы проектирования конструкций с минимумом ОСН	-способность ориентироваться в методах расчета и анализа сварочных напряжений и деформаций	45-64
	Умеет	применять знание формирования ОСН при проектировании и ремонте сварных конструкций	Умеет применять знание формирования ОСН при проектировании и ремонте сварных конструкций	-способность рассчитывать сварочные напряжения и деформации в конструкциях	65-84
	Владеет	методами проверки качества сварных конструкций при анализе сварочных напряжений и деформаций	Владеет методами проверки качества сварных конструкций при анализе сварочных напряжений и деформаций	-способность выбрать и реализовать метод предупреждения сварочных деформаций при минимуме сварочных напряжений	85-100

### Критерии оценки (устный ответ)

✓ 100-85 баллов - если ответ показывает прочные знания основных процессов изучаемой предметной области, отличается глубиной и полнотой раскрытия темы; владение терминологическим аппаратом; умение объяснять сущность, явлений, процессов, событий, делать выводы и обобщения, давать аргументированные ответы, приводить примеры; свободное владение монологической речью, логичность и последовательность ответа; умение приводить примеры современных проблем изучаемой области.

✓ 85-76 - баллов - ответ, обнаруживающий прочные знания основных процессов изучаемой предметной области, отличается глубиной и полнотой раскрытия темы; владение терминологическим аппаратом; умение объяснять сущность, явлений, процессов, событий, делать выводы и обобщения, давать аргументированные ответы, приводить примеры; свободное владение монологической речью, логичность и последовательность ответа. Однако допускается одна - две неточности в ответе.

✓ 75-61 - балл – оценивается ответ, свидетельствующий в основном о знании процессов изучаемой предметной области, отличающийся недостаточной глубиной и полнотой раскрытия темы; знанием основных вопросов теории; слабо сформированными навыками анализа явлений, процессов, недостаточным умением давать аргументированные ответы и приводить примеры; недостаточно свободным владением монологической речью, логичностью и последовательностью ответа. Допускается несколько ошибок в содержании ответа; неумение привести пример развития ситуации, провести связь с другими аспектами изучаемой области.

✓ 60-50 баллов – ответ, обнаруживающий незнание процессов изучаемой предметной области, отличающийся неглубоким раскрытием темы; незнанием основных вопросов теории, несформированными навыками анализа явлений, процессов; неумением давать аргументированные ответы, слабым владением монологической речью, отсутствием логичности и последовательности. Допускаются серьезные ошибки в содержании ответа; незнание современной проблематики изучаемой области.

**Критерии выставления оценки студенту на экзамене  
по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций»  
(тестовые вопросы)**

<b>Процент правильных ответов</b>	<b>Экзаменационная оценка</b>
Менее 60%	неудовлетворительно
От 61% до 75%	удовлетворительно
От 76% до 85%	хорошо

### **Методические материалы, определяющие процедуры оценивания результатов освоения дисциплины**

**Текущая аттестация студентов.** Текущая аттестация студентов по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций» проводится в соответствии с окальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций» проводится в форме контрольных мероприятий по оцениванию фактических результатов обучения студентов и осуществляется ведущим преподавателем.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина (активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость всех видов занятий по аттестуемой дисциплине);
- степень усвоения теоретических знаний;
- уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы;
- результаты самостоятельной работы

Текущая аттестация студентов по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций» осуществляется в соответствии с рейтинг - планом.

**Рейтинг-план дисциплины  
Теория сварочных напряжений и деформаций**

**Календарный план контрольных мероприятий по дисциплине и внесения данных в  
АРС**

№	Примерная дата внесения в АРС	Примерная дата проведения	Наименование контрольного мероприятия	Форма контроля	Весовой коэффициент (%)	Максимальный балл	Минимальное требование
1	4 неделя		Посещение аудиторных занятий	Контроль посещения	40	10	6
			Активность на лекционных занятиях	Опрос	30	10	6
			Практическое задание №1	Отчет	30	10	6
2	8 неделя		Посещение аудиторных занятий	Контроль посещения	30	10	6
			Активность на лекционных занятиях	Опрос	30	10	6
			Практическое задание №2	Отчет	40	10	6
3	12неделя		Посещение аудиторных занятий	Контроль посещения	20	10	6
			Активность на лекционных занятиях	Опрос	20	10	6
			Практическое задание №3	Отчет	60	10	6
4	16неделя		Посещение аудиторных занятий	Контроль посещения	10	10	6
			Активность на лекционных занятиях	Опрос	10	10	6
			Курсовая работа	Отчет Пояснит. записка	80	10	6
5	Сессия	Сессия	Экзамен	Экзамен	100	10	6

**Оценочные средства для промежуточной аттестации**

**Список вопросов для промежуточного и итогового контроля**

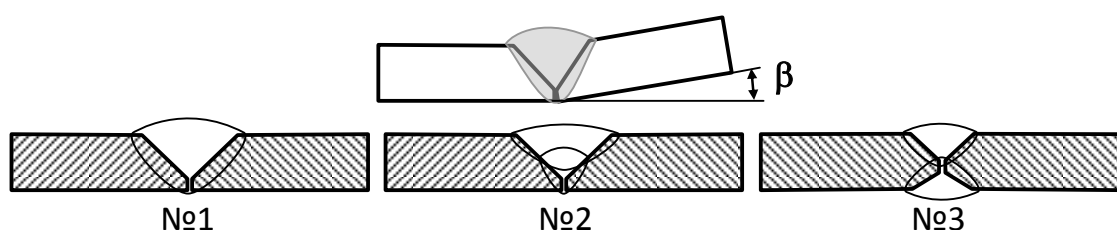
1. В чем причина теплового расширения металлов?
2. Каков механизм образования остаточных пластических деформаций?
3. Какие гипотезы лежат в основе инженерных методов расчета сварочных деформаций и напряжений?
4. Каковы виды остаточных сварочных деформаций?
5. Что такое временные деформации и напряжения?

6. Какие деформации образуются при сварке стыкового шва полотнища?
7. Какие деформации образуются при сварке трубы?
8. Как определяются поперечные деформации?
9. В чем принципиальное отличие формирования сварочных деформаций при нагреве края пластины и сварке пластины по центру?
10. Какое выражение имеет первый закон Ньютона при сварке?
11. Изобразите остаточные продольные напряжения поперек шва.
12. Изобразите остаточные продольные напряжения вдоль шва.
13. Изобразите остаточные поперечные напряжения вдоль шва.
14. Изобразите остаточные поперечные напряжения поперек шва.
15. Изобразите остаточные поперечные напряжения у края пластины.
16. В чем отличие методов Николаева и Окерблома?
17. Что такое удельный погонный объем укорочения?
18. Почему возникают угловые деформации пластин при сварке?
19. Как рассчитать деформации полотнища с перекрестным набором?
20. Изобразите эпюры остаточных напряжений после сварки короткого шва.
21. В чем суть оптических методов экспериментального определения напряжений в металлах?
22. Как определяются остаточные сварочные напряжения по методу тензометрирования?
23. Каковы достоинства метода конечных элементов при расчете сварочных напряжений?
24. Изобразите деформацию цилиндра при сварке кольцевого шва.
25. Как изменяются остаточные напряжения после циклического нагружения?
26. Как рассчитать предварительный изгиб сварной балки для предотвращения остаточного прогиба?

27. В чем физическая суть тепловой правки конструкций?
28. Можно ли снять остаточные напряжения локальным нагревом?
29. Как образуются угловые деформации при сварке листов?
30. Как образуются угловые деформации при сварке тавра?
31. Как остаточные сварочные напряжения взаимодействуют со статической нагрузкой?
32. Каков механизм образования остаточных напряжений?
33. Каковы методы предотвращения остаточных сварочных деформаций?
34. Каковы методы уменьшения остаточных сварочных напряжений?
35. Окончательную механическую обработку сварного изделия нужно производить до или после термообработки?
36. Какова максимальная величина остаточных сварочных деформаций?
37. Какова максимальная величина остаточных сварочных напряжений?
38. Как влияют остаточные сварочные напряжения на статическую прочность конструкции?
39. Как влияют остаточные сварочные напряжения на динамическую прочность конструкции?
40. Каков механизм возникновения поперечных деформаций?

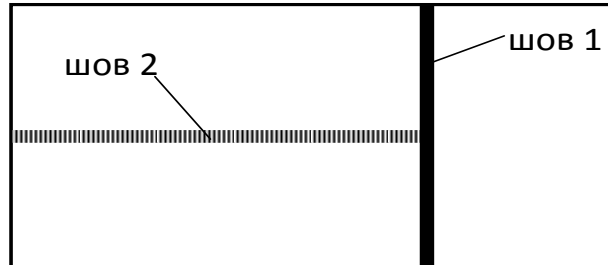
### Тестовые вопросы по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций»

1. После сварки листов в стык возможно появление угловой деформации  $\beta$ . Расположите сварные соединения в порядке уменьшения угловой деформации  $\beta$ . 1) №1; №2; №3; 2) №2; №3; №1; 3) №3; №2; №1; 4) №2; №1; №3



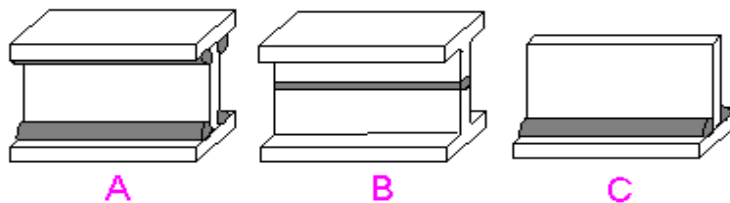
2. Требуется соединить листы тонкостенного полотна. В какой последовательности следует выполнять сварку?

- 1) Шов 1, затем шов 2; 2) Шов 2, затем шов 1; 3) Последовательность выполнения сварных швов значения не имеет.



3. Расположите конструкции в порядке увеличения остаточных деформаций изгиба продольной оси балки, если по варианту «А» вначале изготовили тавровую балку, затем приварили поясной лист.

- 1) (A⇒B⇒C); 2) (B⇒A⇒C); 3) (C⇒A⇒B);  
4) (A⇒C⇒B);



4. Как влияет величина объема металла, наплавленного в разделку за один проход, на величину деформации сварных соединений?

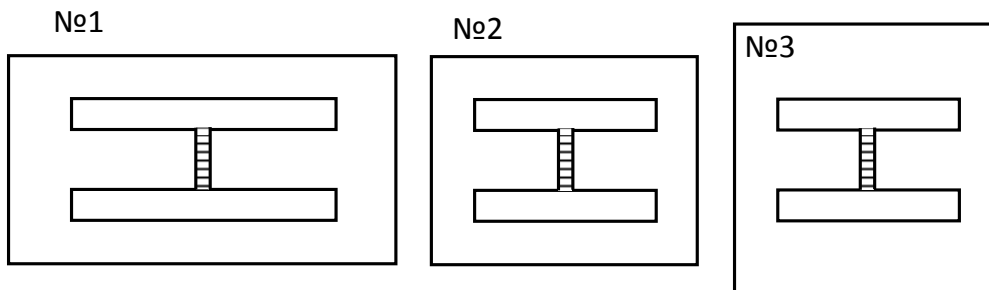
- 1) Увеличивает деформацию с увеличением объема; 2) Уменьшает деформацию с увеличением объема; 3) Не влияет.

5. Когда появляются временные сварочные деформации?

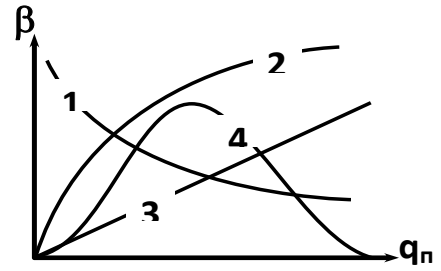
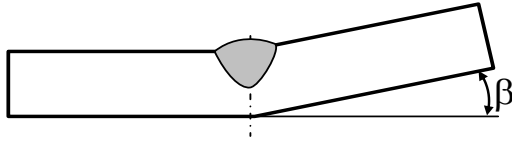
- 1) Образуются во время сварки; 2) Возникают после сварки; 3) Появляются после охлаждения свариваемого металла.

7. Расставьте сварные детали в порядке уменьшения остаточных напряжений в поперечном ко шву направлении.

- 1) №1; №2; №3. 2) №3; №2; №1;. 3) №2; №3; №1;. 4) Во всех случаях ОСН одинаковы.



8. Укажите, по какому закону будет изменяться угловая деформация при наплавке валика на поверхность пластины с увеличением погонной энергии.



9. Что является причиной возникновения остаточных сварочных напряжений и деформаций?

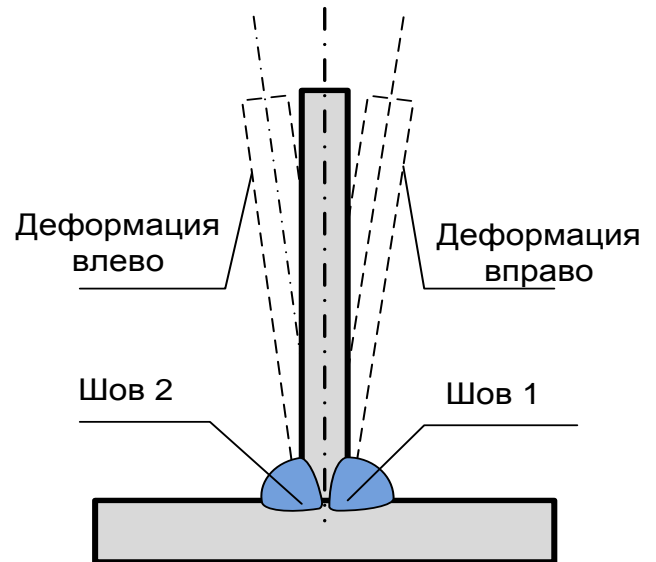
1) Особенности геометрии конструкции. 2) Пластические деформации укорочения при нагреве. 3) Не достаточная квалификация сварщика.

10. Погонный объем продольного укорочения - это:

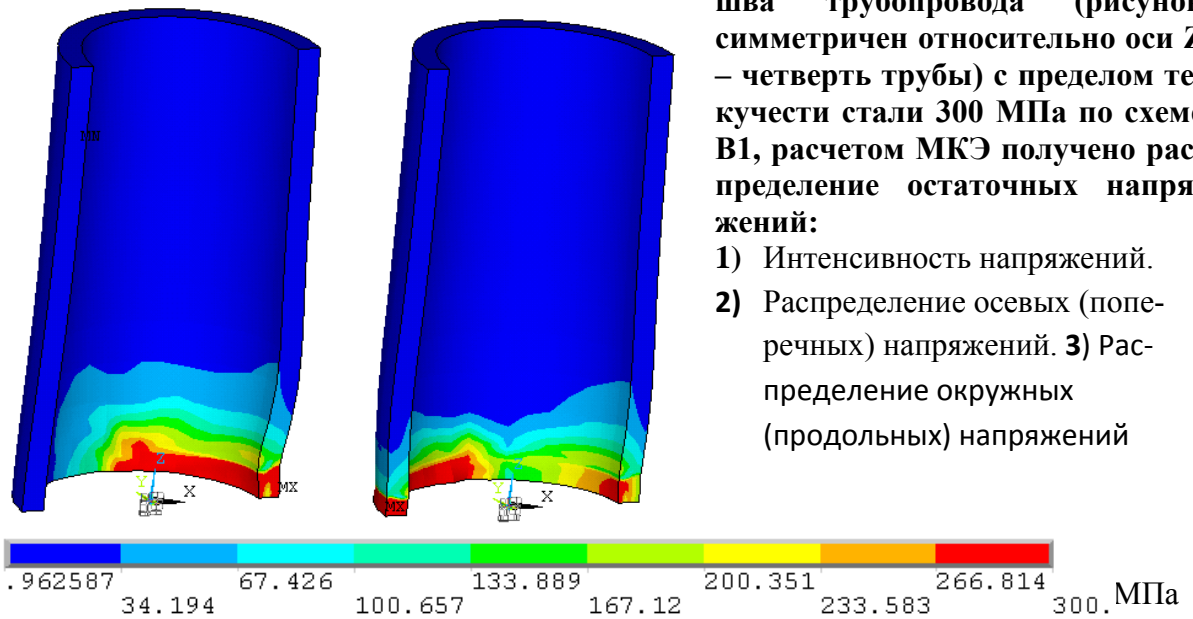
1) Сумма температурных деформаций по сечению сварного соединения. 2) Сумма остаточных продольных пластических деформаций по сечению сварного соединения. 3) Сумма упругих продольных деформаций по сечению сварного соединения. 4) Перемещения кромки листа на единицу его ширины.

11. При двусторонней сварке таврового соединения угловыми швами в последовательности швов 1-2, выполненных на одинаковом режиме, остаточная угловая деформация будет:

1) Вправо. 2) Влево. 3) Остаточная угловая деформация отсутствует.







13. Потеря устойчивости сварной пластины вдали от ее края вызывается:

1) Продольными остаточными напряжениями сжатия. 2) Продольными остаточными напряжениями растяжения. 3) Поперечными остаточными напряжениями.

14. Термообработка сварных изделий производится:

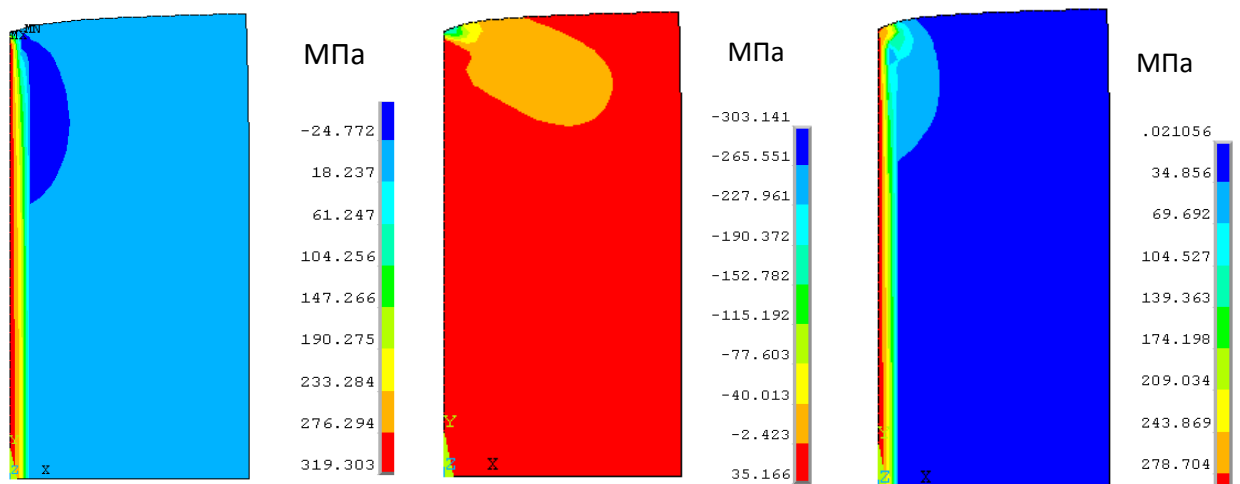
1) До окончательной механической обработки. 2) Последовательность не важна. 3) После окончательной механической обработки.

15. Величина остаточного изгиба сварной конструкции определяется расстоянием от центра объема укорочения до:

1) ближайшей границы конструкции. 2) центра тяжести сечения. 3) дальней границы конструкции.

16. В результате расчета МКЭ получено распределение напряжений при сварке двух одинаковых пластин. На рисунке приведена симметричная (относительно  $x=0$ ) четверть изделия. Распределение интенсивности напряжений это:

1) А. 2) Б. 3) В.



**19. Полное исчезновение остаточных напряжений (M01) можно достичь:**

1) отпуском всей конструкции, 2) растяжением шва до предела текучести. 3) локальным нагревом.

**20. Ширина зоны растягивающих продольных остаточных сварочных напряжений:**

1) больше ширины ЗТВ. 2) меньше ширины ЗТВ, 3) равна ширине ЗТВ.

**21. Меры по уменьшению остаточных сварочных напряжений вызывают:**

1) уменьшение остаточных деформаций, 2) не изменяют остаточные деформации, 3) увеличение остаточных деформаций.

**Критерии выставления оценки студенту на экзамене  
по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций»:**

<b>Баллы</b> (рейтинговой оценки)	<b>Оценка экза- мена</b> (стандартная)	<b>Требования к сформированным компетенциям</b> <i>Дописать оценку в соответствии с компетенциями. Привязать к дисциплине</i>
86-100	<i>«отлично»</i>	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач.
71-85	<i>«хорошо»</i>	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.
56-70	<i>«удовлетворительно»</i>	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ.
Менее 56	<i>«неудовлетворительно»</i>	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.





МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДВФУ)

---

---

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций»**  
**Направление подготовки 15.03.01. Машиностроение**  
**профиль «Оборудование и технология сварочного производства»**  
**Форма подготовки очная/заочная**

**Владивосток**  
**2015**

Одобрено научно-методическим советом университета.

УДК 389:62

Методические указания содержат материалы по выполнению практических заданий по дисциплине «Теория сварочных напряжений и деформаций» в объеме 32 часов. Приведены основные теоретические сведения, индивидуальные задания, формы представления результатов с использованием современных программных средств.

Составил профессор кафедры сварочного производства, доцент, кандидат технических наук Е.Н.Негода.

## РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ СТЕРЖНЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ

1. ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ – Изучение процесса термдеформирования с возникновением остаточных напряжений и деформаций.

### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В данной работе рассматривается нагрев и охлаждение изотропного равномерно нагретого стержня с единичными длиной и площадью сечения при одноосном напряженном состоянии.

При нагреве металлов происходит их расширение. В зависимости от граничных условий в изделии в общем случае возникают деформации

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^T,$$

где  $\varepsilon$  – полная деформация, определяемая по перемещениям,  $\varepsilon^e$  – упругая деформация,  $\varepsilon^p$  – пластическая деформация,  $\varepsilon^T$  – температурная деформация.

В пределах упругости деформация

$$\varepsilon^e = \sigma/E,$$

где  $\sigma$  – действующее напряжение (МПа),  $E$ -модуль упругости (МПа).

За пределами упругости (в области пластических деформаций) упругие деформации для идеального упруго-пластического тела постоянны и соответствуют пределу текучести материала.

$$\varepsilon^e = \sigma_s/E,$$

Температурная деформация

$$\varepsilon^T = \alpha T,$$

где  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения ( $K^{-1}$ ),  $T$ -температура (К).

На рис. 1.1 представлена диаграмма термдеформирования стержня с защемленными торцами в процессе нагрева и охлаждения. На диаграмме цифрами у стрелок дана последовательность деформирования стержня при нагреве (0-2) и охлаждении (2-5). При этом указаны следующие обозначения:

$\varepsilon^e$  – упругая деформация,

$\varepsilon^p_n$  - пластическая деформация при нагреве,

$\varepsilon^T$  - максимальная температурная деформация,

$\varepsilon_s$  – деформация предела текучести,

$\varepsilon^p_o$  – пластическая деформация при охлаждении,

$\varepsilon^{p_{ост}}$  - остаточная пластическая деформация,

$\sigma_s$  – предел текучести материала.

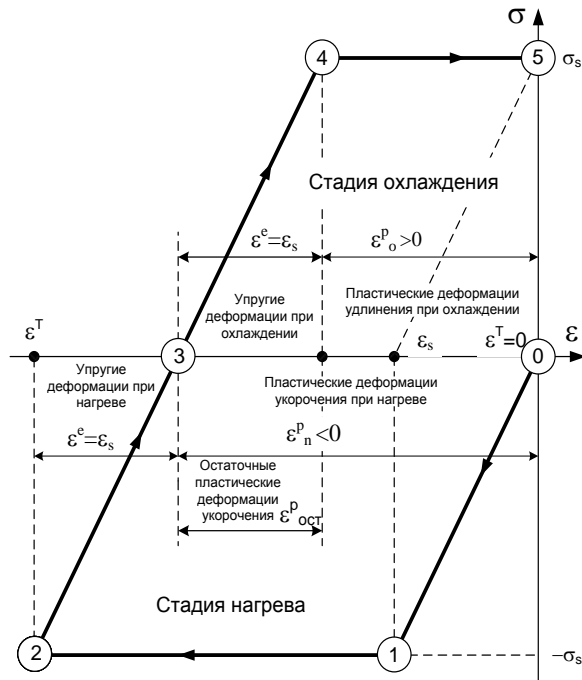


Рис.1.1. Диаграмма термдеформирования.

Последовательность изучения диаграммы:

При нагреве стержня с заземленными торцами (рис.1.2,в) по линии (0-1) возникает упругое напряженно-деформированное состояние, деформация

### 3. ЗАДАНИЕ

Для трех схем закрепления стержня (рис.2.) изобразить диаграммы термдеформирования и рассчитать все входящие величины.

При этом принять значения:

- предел текучести материала 200 МПа,
- модуль упругости 200000 МПа,
- коэффициент линейного расширения  $1.3 \cdot 10^{-5}$ ,

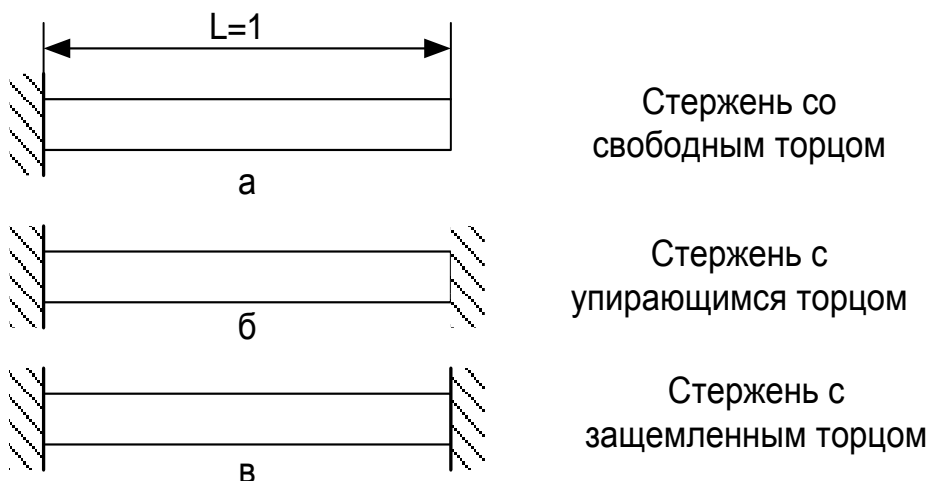


Рис.1.2. Расчетные схемы.

Варианты задания по заданному преподавателем коду, состоящему из двух цифр (**n1**, **n2**) выбрать по таблицам 1,2. Например, код 22 выделен в таблицах заливкой.

Таблица 1

Максимальная температура нагрева

<b>n1</b>	1	2	3	4	5	6	7
Температура нагрева	200	250	300	400	450	500	600

Таблица 2

Теплофизические свойства сталей

<b>n2</b>	Марка материала	$\lambda$ , Дж/(см <sup>2</sup> ·с·К)	$c_p$ Дж/(см <sup>3</sup> ·К)	$\alpha \cdot 10^5$ К <sup>-1</sup>	$\sigma_s$ МПа	E МПа
1	ВСт3сп		0.4	4.2	300	210000
2	09Г2С		0.39	4.1	350	210000
3	10ХСНД		0.35	3.8	400	210000

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

- 4.1. Изучить диаграмму деформирования, представленную на рис.1.
- 4.2. Изобразить диаграммы для схем а),б) рис.2.
- 4.3. Рассчитать все параметры, указанные на диаграмме рис. 1. для каждой из приведенных расчетных схем.
- 4.4. Оформить отчет.

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 5.1 Титульный лист.
- 5.2. Задание.
- 5.3. Диаграммы термдеформирования последовательно для схем рис. 2 с вычислением параметров по заданию.

#### 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. С точки зрения механики, каковы условия равновесия стержней в представленных расчетных схемах ?
- 6.2. Почему остаточные пластические деформации по схеме в) (рис. 1) равны деформации предела текучести ?
- 6.3 В чем причина образования остаточных напряжений и деформаций?



## МЕТОД НИКОЛАЕВА ПРИ РАСЧЕТЕ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

1. ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ – освоение инженерных методов анализа сварных конструкций.

### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Термомеханические процессы при сварке весьма сложны. Для получения аналитических зависимостей влияния сварочного термического цикла на напряженно-деформированное состояние сварного изделия необходимо принять ряд допущений, упрощающих расчетную схему. В методе Николаева рассматривается тепловая схема «пластина». При этом считается, что поле напряжений одномерно, т.е. действуют только продольные (направленные вдоль шва) напряжения. Поперечные напряжения не учитываются. Как постулат, принимается гипотеза плоских сечений. В этом случае полная деформация

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^T. \quad (2.1)$$

Как известно, полная деформация

$$\varepsilon = \varepsilon_{n0} + c_n y, \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon^e$  – упругая деформация,  $\varepsilon^p$  – пластическая деформация,  $\varepsilon^T$  – температурная деформация.

Условиями равновесия пластины при сварочном нагреве являются равенства нулю главного вектора и главного момента. Поскольку предполагается отсутствие внешних сил, то напряжения, возникающие при сварочном нагреве, должны быть самоуравновешены. Например, при нагреве края пластины (рис. 2.1)

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= \int_0^b \sigma_x dy = 0 \\ \bar{M} &= \int_0^b \sigma_x y dy = 0 \end{aligned} \right\} . \quad (2.3)$$

В частности, первое из уравнений 2.3 говорит о том, что площади эпюр  $\sigma_x^+$  и  $\sigma_x^-$  должны быть равны.

Если сварочный нагрев проходит по центру пластины (сварка двух листов, рис. 2.2), то в связи с симметрией схемы условие равенства нулю глав-

ного момента удовлетворяется автоматически, и равновесие определяется одним уравнением:

$$\bar{P} = \int_0^b \sigma_x dy = 0. \quad (2.4)$$

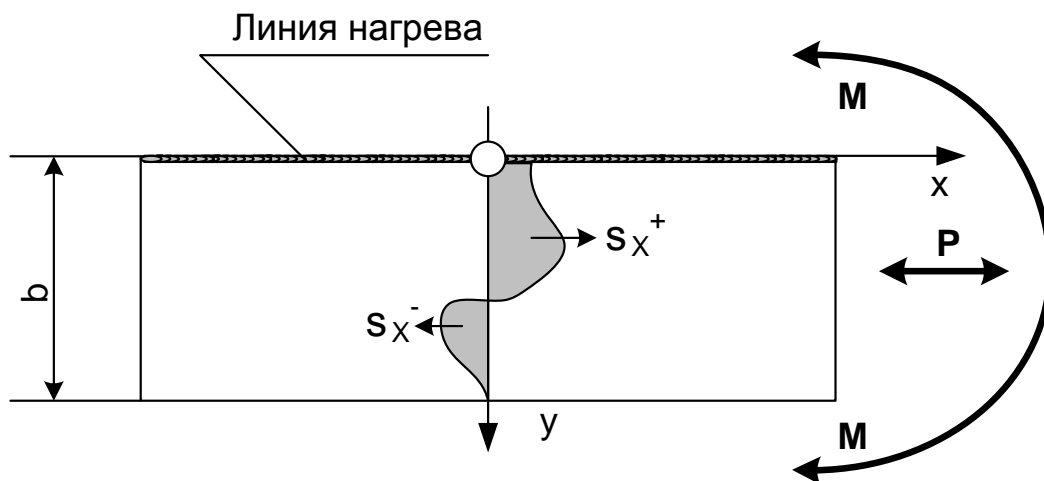


Рис. 2.1. Распределение усилий для случая нагрева края пластины.

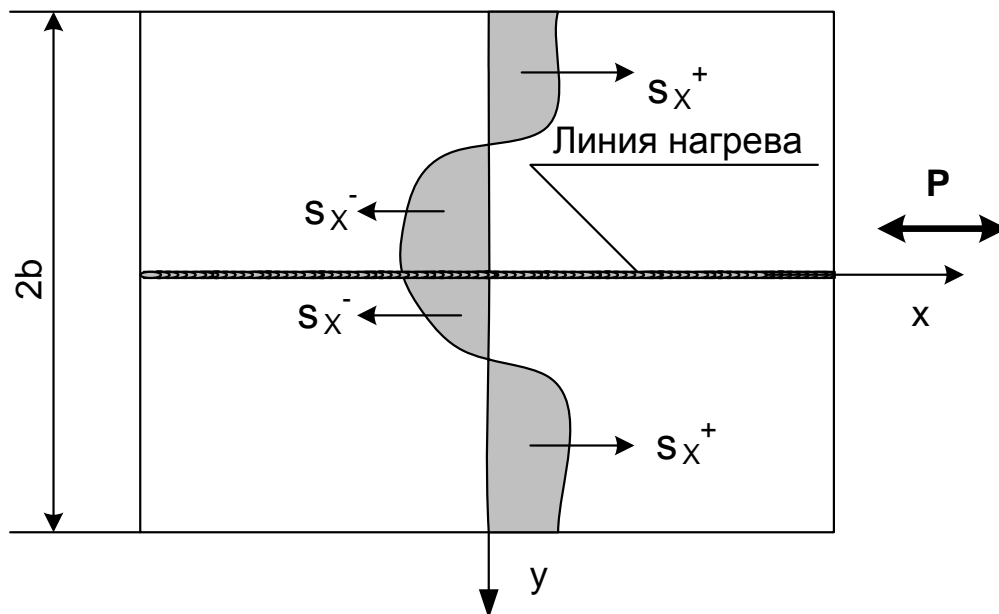


Рис. 2.2. Распределение усилий для случая нагрева пластины по центру.

Сварочный нагрев можно представить двумя стадиями. На первой изделие нагрето до максимальных температур (стадия нагрева); на второй – изделие полностью охлаждено (стадия охлаждения).

Из выражений (2.1), (2.2) следует, что на стадии нагрева

$$\sigma_x = E\varepsilon^e = E(\varepsilon_{n0} + c_n y - \varepsilon_n^p - \varepsilon^T), \quad (2.5)$$

где  $\varepsilon_n^p$  - пластическая деформация, возникающая при нагреве.

Подстановка (2.5) в (2.3) приводит к системе двух уравнений с двумя неизвестными  $\varepsilon_{n0}$  и  $c_n$ , расчет которых полностью определяет напряженно-деформированное состояние на стадии нагрева.

После полного охлаждения температурные деформации отсутствуют, однако существуют пластические деформации укорочения, возникшие при нагреве. В этом случае

$$\sigma_x = E\varepsilon^e = E(\varepsilon_{o0} + c_o y - \varepsilon_o^p - \varepsilon_n^p),$$

где  $\varepsilon_o^p$  - пластическая деформация, возникающая на стадии охлаждения.

### 3. ЗАДАНИЕ

3.3.1. Рассчитать напряженно-деформированное состояние пластины в двух случаях – при нагреве края пластины и при выполнении центрального шва для стадий нагрева и охлаждения.

При расчете деформированного состояния пластины принять следующие значения исходных данных:

$$\text{погонная энергия } q_n = \theta F_n,$$

где  $\theta$  – коэффициент, который для большинства видов дуговой сварки плавящимся электродом можно принять равным 20000 Дж/см<sup>3</sup>;

$$F_n - \text{площадь наплавленного металла, см}^2.$$

$$F_n = s^2,$$

где  $s$  – толщина пластины, см;

температура начала падения предела текучести  $T_1=400$  К, температура потери упругих свойств  $T_2=800$  К.

Конкретные геометрические размеры пластины выбираются из таблицы 1 по задаваемому преподавателем коду, состоящему из двух цифр. Первая цифра указывает номер значения толщины пластины, второй – номер значения ширины пластины. Например, код 57 выделен в таблице заливкой (толщина  $s=0.6$ см, ширина  $b=40$ см).

#### Варианты задания

Таблица 2.1

Номера варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Толщина пластины	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.	1.2	1.4	1.6	1.8	2.

s, см												
Ширина пластины b, см	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120

3.3.2. При выполнении задания воспользоваться программой Nikol\_stu('Петров',s,b,qp,T1,T2), созданной в пакете Matlab. В программе первый формальный параметр, являющийся текстовой переменной ('Петров') заменить на Вашу фамилию. Например: Nikol\_stu('Федоров А.С. К-6251',s,b,qp,T1,T2).

3.3.3. На выводимых программой графиках (рис.1, 2) нанести рассчитанные параметры напряженно-деформированного состояния с оформлением графической информации в соответствии с ЕСКД. В результатах расчета приняты следующие обозначения:

- en0, cn – параметры полной деформации (2.2) при нагреве,
- eo0, co - параметры полной деформации (2.2) при охлаждении,
- урп, уро – координата зоны пластических деформаций при нагреве и охлаждении соответственно,
- упо – координата зоны растягивающих остаточных напряжений.

3.3.4. Построить эпюру остаточных сварочных напряжений для обоих случаев.

3.3.4. Произвести анализ поведения пластины по полученным результатам.

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

- 4.1. Определить погонную энергию сварочного процесса;
- 4.2. Сформировать исходную информацию для расчета по программе Nikol\_stu.
- 4.3. Рассчитать деформированное состояние пластины для указанных в задании двух случаев с выводом в Word соответствующих схем.
- 4.4. Нанести на полученные графические результаты расчета обозначения параметров, представленных в Вашем файле.
- 4.5. Проанализировать полученные результаты.
- 4.5. Оформить работу в соответствии с ЕСКД.

#### 5 ПРИМЕР РЕЗУЛЬТАТА РАСЧЕТА

Определение фактических параметров программы в командном окне:

```
>> s=1;
>> T1=400;
>> T2=800;
>> qp=10000;
>> b=50;
```

```
>> Nikol_stu('Федоров А.С. К-6251',s,b,qp,T1,T2); % Запуск расчета
```

Результаты расчета теперь находится в Вашем файле (Matlab 6.2\work\Student\' Федоров А.С. К-6251'.txt).

Распечатка файла:

---

## РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ПО МЕТОДУ НИКОЛАЕВА Г.А.

---

Студент Федоров А.С. К-6251.      Дата расчета 2008.12.15 время 12:46:22

---

Марка стали Вст3сп.

Теплофизические свойства:  $\alpha_l = 0.000013$  ;  $\sigma_0 = 4.2$  ;  $ss = 300$  ;  $E = 200000$

Температура начала падения предела текучести  $T1 = 400$ ;

Температура потери упругих свойств  $T2 = 800$

Размер пластины: толщина  $s = 1.0$  ; ширина  $b = 50$

---

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

---

### 1. Нагрев края пластины

---

Стадия нагрева

$\epsilon_{n0} = 2.22e-003$   
 $\sigma_n = -4.95e-005$   
 $u_{pn} = 4.33e+000$

Стадия охлаждения

$\epsilon_{o0} = -5.36e-004$   
 $\sigma_o = 1.59e-005$   
 $u_{po} = 2.73e+000$   
 $u_{no} = 3.79e+000$

---

### 2. Центральный шов

---

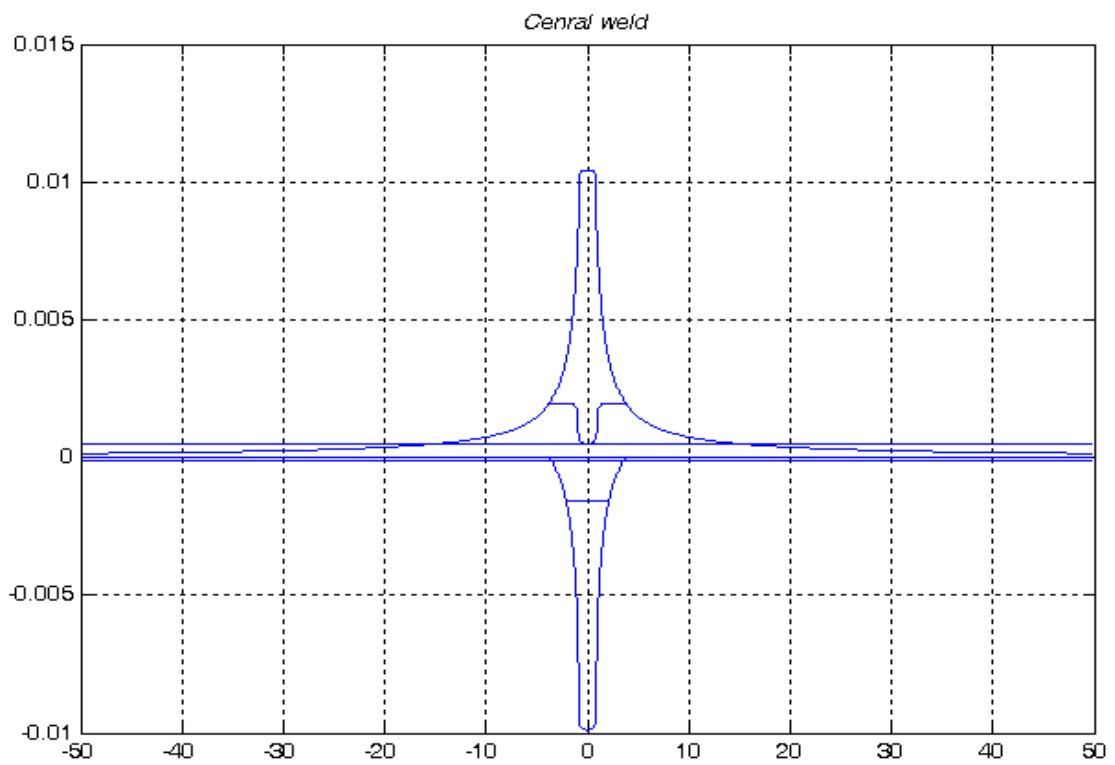
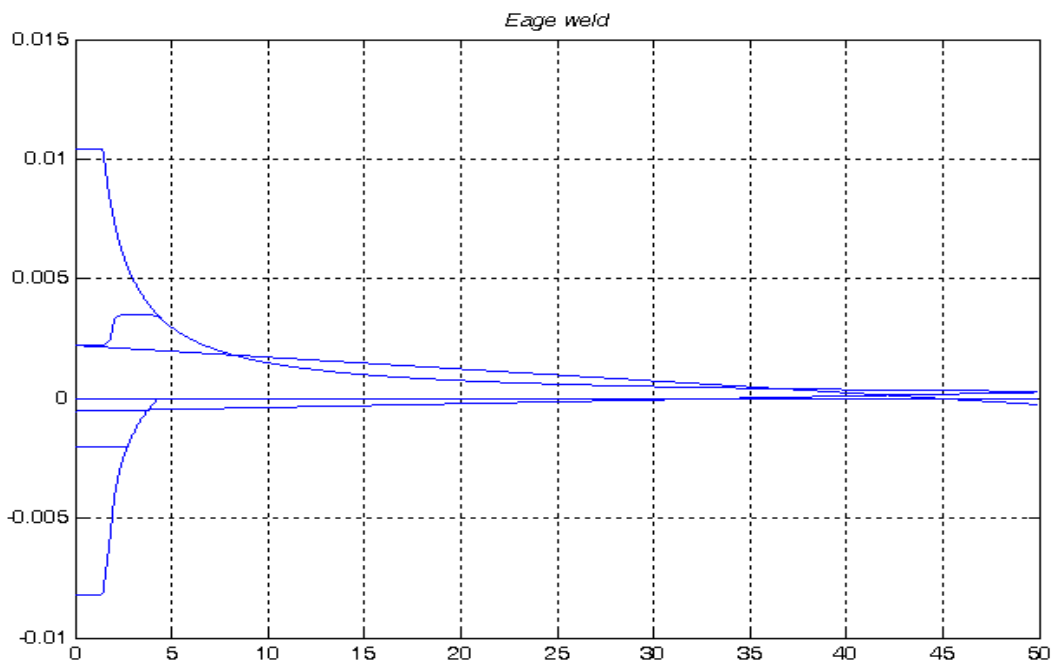
Стадия нагрева

$\epsilon_{n0} = 5.07e-004$   
 $\sigma_n = 0.00e+000$   
 $u_{pn} = 3.80e+000$

Стадия охлаждения

$\epsilon_{o0} = -9.30e-005$   
 $\sigma_o = 0.00e+000$   
 $u_{po} = 2.11e+000$   
 $u_{no} = 3.63e+000$

---



---

---

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. Титульный лист.

6.2. Реферат.

6.3. Теоретические основы расчета деформаций сварных конструкций по методу Николаева А.Г..

6.4. Вариант задания с представлением геометрических схем *случаев* расчета.

6.5. Результаты расчета деформированного состояния пластины с указанием определенных в задании параметров.

6.6. Выводы.

6.7. Список литературы.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Каковы основные гипотезы и допущения в методе Николаева?

7.2. Зона термического влияния сварного соединения (ЗТВ) больше или меньше зоны остаточных сварочных растягивающих напряжений (доказать)?

7.3. В чем особенности теплоустойчивых сталей (группа М02) с точки зрения представленной схемы расчета.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

### РАСЧЕТ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПО МЕТОДУ КУЗЬМИНОВА

1. ЦЕЛЬ ЗАДАНИЯ – приобретения навыков расчета общих деформаций сварных конструкций на примере тавровой балки.

#### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Продольное укорочение сварного соединения пояска со стенкой вызывает укорочение балки по ее продольной центральной оси и изгиб в плоскости, проходящей через ось шва и центральную ось конструкции, параллельную шву (рис. 1).

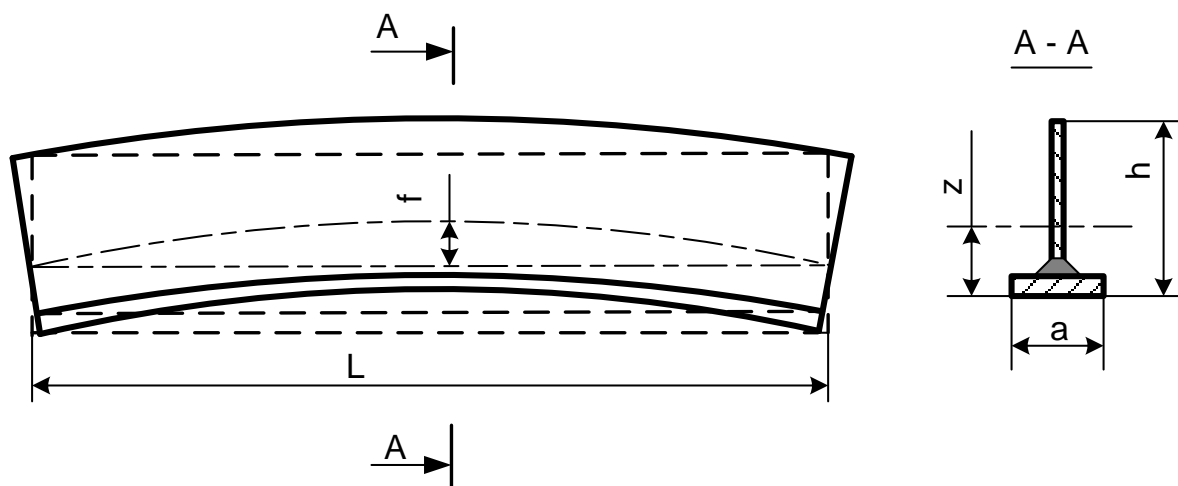


Рис.3.1. Деформация сварной тавровой балки.

Параметры деформации балки определяются по формулам:

$$\varepsilon_{\text{цт}} = v/F;$$

$$C = vz/J,$$

где  $\varepsilon_{\text{цт}}$  - деформация волокна, совпадающего с продольной центральной осью балки;

$C$  – кривизна,  $\text{см}^{-1}$ ;

$v$  – погонный объем продольного укорочения,  $\text{см}^2$ ;

$F$  – площадь сечения балки,  $\text{см}^2$ ;

$J$  – центральный момент инерции площади поперечного сечения балки,  $\text{см}^4$ ;

$L$  – длина балки,  $\text{см}$ ;

$z$  – расстояние от центра тяжести объема  $v$  до главной центральной оси поперечного сечения, перпендикулярной плоскости изгиба  $\text{см}$ .

Параметры деформации всей балки определяются по формулам:

$$\Delta L = \varepsilon_{\text{св}} L = \frac{vL}{F};$$

$$\varphi = CL = \frac{vLz}{J};$$

$$f = \frac{\varphi L}{8} = C \frac{L^2}{8} = \frac{vL^2 z}{8J},$$

где  $\Delta L$  – укорочение балки по оси, проходящей через центр тяжести поперечного сечения,  $\text{см}$ ;

$\varphi$  – угол поворота концевых сечений балки относительно друг друга,  $\text{рад}$ ;

$f$  – максимальная стрелка прогиба балки, вызванная сваркой продольного шва,  $\text{см}$ .

Погонный объем продольного укорочения

$$v = 0.335 \frac{\alpha}{c_p} q_{\text{п}};$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала балки,  $\text{K}^{-1}$ ;

$c_p$  - удельная объемная теплоемкость,  $\text{Дж}/\text{см}^3\text{K}$ ;

$q_{\text{п}}$  – погонная энергия сварочного процесса,  $\text{Дж}/\text{см}$ .

Погонная энергия может быть определена по приближенной формуле

$$q_{\text{п}} = \theta F_{\text{н}},$$



где  $\theta$  – коэффициент, который для большинства видов дуговой сварки плавящимся электродом можно принять равным  $20000 \text{ Дж/см}^3$ ;

$F_n$  – площадь наплавленного металла,  $\text{см}^2$ .

$$F_n = s^2,$$

где  $s$  – толщина стенки балки, см.

### 3. ЗАДАНИЕ

Рассчитать параметры деформации сварной балки.

Задание выполняется по индивидуальным вариантам. По заданному преподавателем коду, состоящему из двух цифр **n1 n2** (таблица 1) выбираются геометрические размеры балки и ее материал. Например, код 42 выделен в таблице заливкой.

Таблица 1.

#### Варианты задания

<b>n1</b>	Толщина пояска, ММ	Толщина стенки, ММ	a мм	h мм	L мм	n	<b>n2</b>	Материал
1	3	2	22	50	200	4	<b>1</b>	09Г2С
2	4	3	33	75	500	4		
3	5	4	43	100	500	5		
4	6	5	54	125	800	4		
5	8	6	65	150	800	5	<b>2</b>	10ХСНД
6	10	8	87	200	1000	5		
7	12	10	109	250	1000	5		
8	14	12	130	300	1500	4		
9	16	14	150	350	2000	4		
10	18	16	170	400	2500	6	<b>3</b>	ВстЗсп
11	20	18	180	450	2500	5		
12	22	20	220	500	3000	6		
13	26	22	250	550	3000	4		
14	28	24	300	600	3500	5		

### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

4.1. Определить погонную энергию сварочного процесса.

4.2. Рассчитать погонный объем продольного укорочения. Теплофизические свойства материала выбрать из таблицы 2 соответственно варианту задания.

Таблица 2.

## Теплофизические свойства сталей

Марка материала	$\lambda$ , Дж/(см с К)	$c_p$ Дж/(см <sup>3</sup> К)	$\alpha \cdot 10^5$ К <sup>-1</sup>	$\sigma_s$ МПа	Е МПа
ВСтЗсп	0.4	4.2	1.27	300	210000
09Г2С	0.39	4.1	1.3	350	210000
10ХСНД	0.35	3.8	1.4	400	210000
0Х18Н10Т	0.19	4.27	1.75	220	205000

4.3. Рассчитать геометрические характеристики сечения балки в форме, представленной на примере в таблице 3. При этом момент инерции сечения

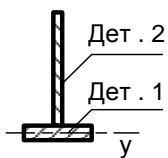
$$J_y = \sum_{m=1}^n J_{cm} + \sum_{m=1}^n Fa^2_m,$$

где  $n$  – количество деталей,  $J_{cm}$  – собственный момент инерции детали  $m$ ,  $Fa^2_m$  – переносной момент инерции детали  $m$ ,  $a$  – расстояние между ц.т. всего сечения и ц.т. детали  $m$ .

Центром тяжести объема  $v$  считать точку по линии соединения деталей.

Таблица 3

## Параметры сечения балки

Эскиз сечения	№ Дет.	Размер детали, см	F, см <sup>2</sup>	z, см	a, см	Fa <sup>2</sup> , см <sup>4</sup>	Jc, см <sup>4</sup>
	1	1.6*15	24	0	12.3	3630	5.12
	2	1.4*35	49	18.3	6	1764	5002
	$\Sigma$		73	$z_c=12.3$		5394	5007.12
$J_y=10400 \text{ см}^4$ ; центр тяжести объема $v$ , $z = 11.5 \text{ см}$							

4.4. Рассчитать параметры деформации балки.

4.5. Изобразить деформированное состояние балки в соответствии с рис. 1 с указанием рассчитанных параметров.

4.6. Оформить отчет.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

5.1. Титульный лист.

5.2. Реферат.

5.3. Теоретические основы расчета деформаций сварных конструкций.

5.4. Вариант задания с представлением чертежа балки и значений теплофизических свойств.

5.5. Расчет параметров сечения балки (таблица 3).

5.6. Результаты расчета общих деформаций балки представленных, в том числе, на чертеже.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Почему изгиб балки происходит так, как показано на рис. 1, а не наоборот ?

6.2. Каков физический смысл погонного объема продольного укорочения ?

6.3. Предложите меры, уменьшающие полученные в расчете деформации конструкции.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

1.ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ – приобретение навыков расчета сварочных напряжений и деформаций методом конечных элементов (МКЭ).

### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Развитие техники ставит новые задачи в области исследования работоспособности машин и их элементов. Повышение их надежности и долговечности, являясь важнейшим фактором, определяющим рост конкурентоспособности изделий, связано с достоверным определением "опасных" мест конструкции.

Наиболее эффективным широко используемым современным средством достижения поставленной цели является использование **метода конечных элементов (МКЭ)**.

Сущность метода конечных элементов состоит в аппроксимации исследуемого поля некоторой моделью, которая представляет собой совокупность элементов с конечным числом степеней свободы. Эти элементы взаимосвязаны только в узловых точках, куда прикладываются фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряженным, распределенным по границам элементов.

Хотя основные принципы метода конечных элементов сформулированы давно, данный метод получил широкое применения только во второй половине двадцатого столетия. В основном это связано с тем, что его использование требует больших объемов рутинных вычислений. Ситуация в корне изменилась с развитием вычислительной техники, когда выяснилось, что ЭВМ вполне подходят для решения подобных задач.

Широкое применение программные продукты, использующие данный метод (МКЭ), получили в машиностроении для расчета на прочность самых разных узлов и конструкций современных машин и сооружений. Решаемые задачи включают возможность определять результат термомеханического состояния. Некоторые пакеты, основанные на методе конечных элементов, "научились" решать даже такие трудно моделируемые задачи, как задачи разрушения, задачи с большими пластическими деформациями (например расчеты процессов прессования) и т.д.

Один из наиболее мощных коммерческих программных продуктов - это ANSYS. ANSYS известен на рынке уже более двадцати лет и является наиболее распространенным средством для научных и инженерных расчетов.

Метод конечных элементов основан на аппроксимации анализируемого поля (например, поля деформаций, поля напряжений и т.п) **заранее выбранной зависимостью** в пределах конечного элемента. Тогда задача с бесконечным количеством степеней свободы сводится к решению в узлах КЭ и приводит к решаемой численно системе линейных уравнений. Этот подход знаком из курса математики при численном определении интеграла по методу Симпсона.

Если представить анализируемое поле в виде набора треугольников, то в пределах каждого из них искомое поле представляет собой плоскость (три точки в пространстве определяют только плоскость). При разбиении на четырехугольные КЭ, в пределах каждого из них аппроксимация квадратична, т.е. поле функции описывается более сложной зависимостью и ближе к реальности. Выбор типа конечного элемента – одна из основных задач при анализе конструкций МКЭ. Чем больше количество КЭ, тем подробнее описание исследуемой функции. Например, температурное поле мгновенного точечного источника на поверхности полубесконечного тела при различных разбиениях (количество КЭ), представлено на рис.4.2.

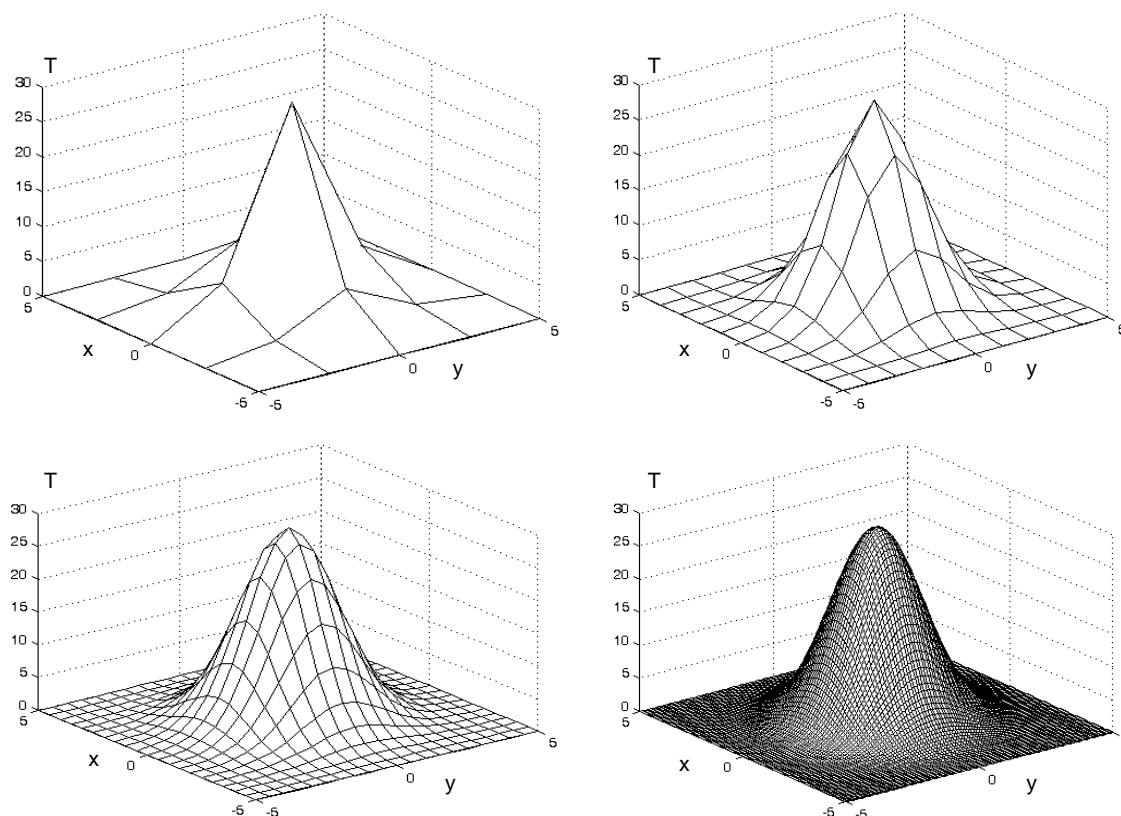


Рис. 4.2. Температурные поля мгновенного точечного источника на поверхности полубесконечного тела при различной дискретизации области.

При решении задач МКЭ необходимо очень корректно сформулировать расчетную схему, основными составляющими которой являются геометрия исследуемого объекта, его физико-механические свойства и заданная нагрузка.

Программа ANSYS работает в последовательности создания расчетной схемы и ее решения, а именно:

- **Preprocessor** – предоставляет инструменты создания исходной расчетной схемы;
- **Processor** – организует процедуру решения задачи МКЭ;
- **Postprocessor** - предоставляет инструменты вывода и изображения результатов расчета.

### 3. ЗАДАНИЕ

3.1. Для пластины размерами, соответствующими заданию №2, рассчитать методом конечных элементов (МКЭ, ANSYS) напряженно-деформированное состояние пластины при сосредоточенной нагрузке  $F$ . Схема представлена на рисунке 4.1. Обратите внимание на то, что приложенная сила ( $F$ ) действует вдоль кромки листа. При этом необходимо ограничить перемещения пластины путем закрепления точек ( $x=0, y=0$ ) в обоих координатных направлениях и точки ( $x=0, y=L$ ) в направлении  $x$ .

3.2. Представить анализ напряженно-деформированного состояния при нагрузке, соответствующей заданию.

3.3. Произвести анализ остаточных сварочных напряжений и деформаций, рассчитанных МКЭ. Результаты расчета находятся в файле, указанном преподавателем.

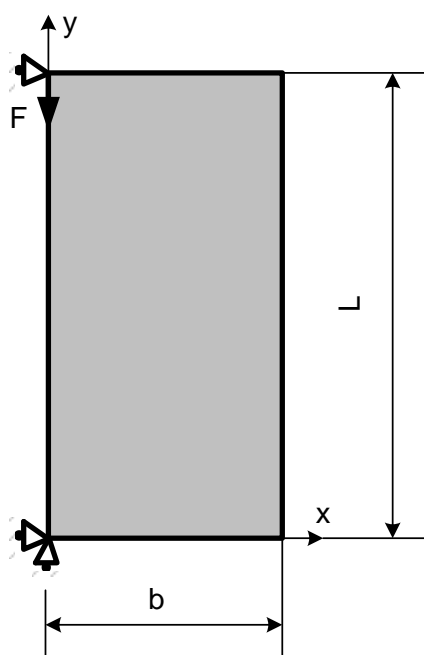


Рис. 4.1. Геометрическая схема задачи.

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

4.1. Запустить программу ANSYS (при этом сразу определить каталог и Ваш именной файл задачи).

4.2. Создать геометрическую схему прямоугольной области для определения плоского напряженно-деформированного состояния пластины заданных размеров в соответствии с вариантом задания. Расчетная плоскость может быть создана различными способами [1]. В задании предлагается создать расчетную поверхность по двум диагональным точкам:  $x(0)$ ,  $y(0)$  и  $x(b)$ ,  $y(L)$ . Для этого в ГЛАВНОМ МЕНЮ (слева на экране) нужно последовательно выбрать:

**Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By Dimensions...**

В появляющейся таблице внесите координаты угловых точек согласно Вашему заданию. Подтвердите правильность набранных цифр нажатием кнопки **O'key**. В графическом окне сразу отображается заданная поверхность

4.3. Определить физическую модель материала. ANSYS предлагает широкий диапазон моделирования сопротивления материалов. В задании предлагается использовать схему упругого изотропного материала. Для этого выполните следующую последовательность команд: **Preprocessor>Material Props>Material Models...** В появляющемся окне выберите последовательно (двойным нажатием): **Structural>Linear>Isotropic...** Далее в таблицу необходимо ввести значения модуля упругости  $E_x$  (например, для низкоуглеродистой стали группы M01 – 200000 МПа) и коэффициента Пуассона  $\nu$  (0.24). Подтвердите правильность набранных цифр нажатием кнопки **O'key**.

4.4. Назначить тип конечных элементов: **Preprocessor>Elements Type>Add/Edit/Delete> Add...** В окне **Library of Elements Type** последовательно выберите **Structural Mass>Solid>Quad 4 nnode 42**. Таким образом выбрано разбиение заданной области на четырехугольные конечные элементы с квадратичной аппроксимацией поля перемещений. Подтвердите правильность выбора КЭ нажатием кнопки **O'key**.

4.5. Осуществить разбиение области на КЭ заданного типа: **Preprocessor>Meshing>Mesh Tools...** В открывающемся окне (справа на экране) выбрать **Mesh>Area>Free**. Вы выбрали разбиение расчетной области КЭ по «умолчанию». В графическом окне сразу представлено это разбиение. Если Вы хотите уточнить результаты расчета, то необходимо увеличить количество КЭ. Тогда в этом же меню выполнить **Smrsize** и поставить «движок» ближе к «1» (например, 3). Далее - **O'key**.

4.6. Задать ограничения перемещений конструкции в пространстве. Для того, чтобы рассматриваемая пластина была фиксирована в пространстве необходимо исключить возможность ее линейного перемещения и вращения (см. практическое занятие 2). Соответствующие закрепления пластины приведены на рис. 4.1 : перемещение точки  $x(0)$ ,  $y(0)$  в направлении  $x$  –  $U_x=0$ ; перемещение точки  $x(0)$ ,  $y(0)$  в направлении  $y$  –  $U_y=0$ ; ; перемещение точки  $x(0)$ ,  $y(L)$  в направлении  $x$  –  $U_x=0$ . Для задания указанных ограничений степеней свободы выполнить: **Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacements>On Nodes**. Переместив курсор в графическое по-

ле, последовательно отметить узлы с заданными перемещениями, вводя их значения и подтверждая ввод нажатием **Apply**. По окончании процедуры нажать **O'key**.

4.7. Задать нагрузку в виде сосредоточенной силы, проложенной, как показано на рис. 4.1: **Preprocessor>Loads>Difine Loads>Apply> Structural>Forse\Moments> On Nodes**. В графическом экране стрелкой обозначить узел, в котором прикладывается нагрузка. В открывающейся таблице задать направление и значение сосредоточенной силы. Нажать **O'key**.

4.8. Запустить решение поставленной задачи: **Solution>Solve>Current LS**. Признаком завершения решения является появление сообщения **Solution is done**.

4.9. Вывести на экран и распечатать распределение напряжений в направлениях x и y, а также эквивалентных напряжений по Мизесу: **Postprocessor>Plot Result>Contour Plot>Nodel Solution...**

4.10. Произвести анализ остаточных сварочных напряжений и деформаций, рассчитанных МКЭ. Результаты расчета находятся в файле, указанном преподавателем.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

### РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МКЭ В ПРОГРАММЕ КОМПАС

1.ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ – приобретение навыков расчета деформаций и напряжений в конструкции методом конечных элементов.

В настоящее время существует множество графических пакетов программ, предоставляющих широкий спектр средств графического моделирования. Хотелось бы обратить внимание на один из них, а именно КОМПАС. Программа характеризуется тем, что изначально позволяет построить трехмерный объект, который потом можно автоматически разложить на проекции чертежа. Кроме того, программа позволяет произвести прочностной расчет созданной конструкции. Пакет КОМПАС обладает некоторыми свойствами, общими для всех графических программ и, тем не менее, достаточно прост в начальном освоении.

Итак, ставится задача проектирования и расчета напряженно-деформированного состояния детали, представленной на рисунки 1.

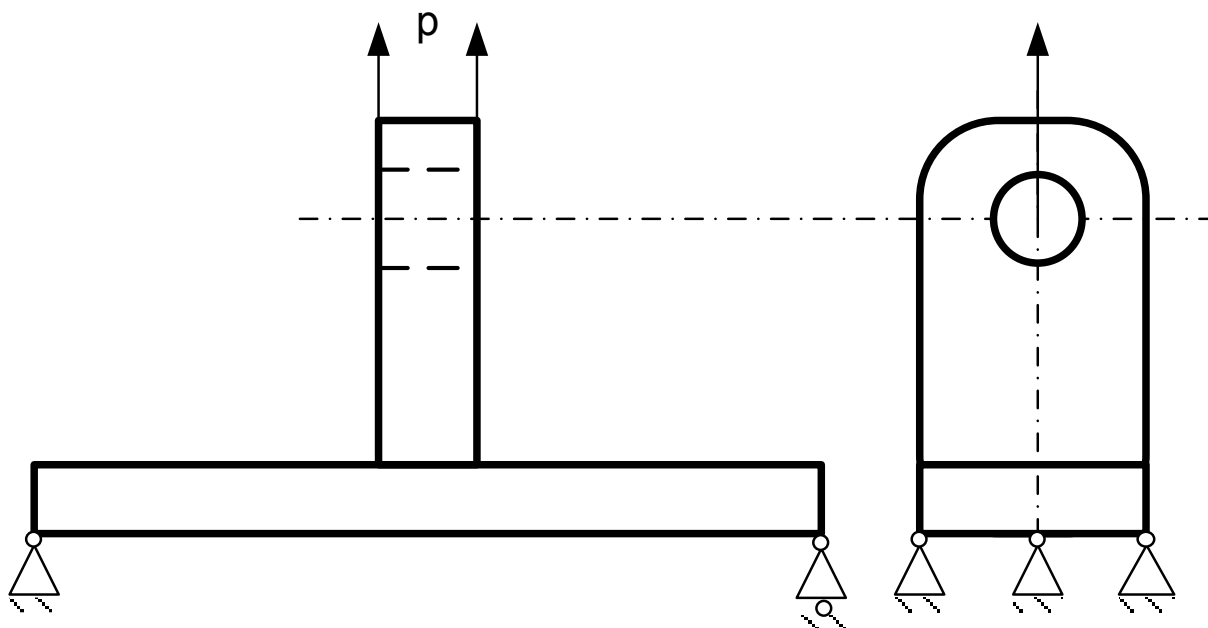


Рис. 1. Геометрическая схема задачи

При решении задачи несколько упростим процедуру. Во-первых, геометрические размеры произвольны. При необходимости их достаточно просто задать в разделе **Размеры**. Во-вторых, будем считать, что левая нижняя грань закреплена во всех трех направлениях – X, Y, Z, а правая нижняя грань – только в направлении Z. Нагрузка в виде распределенной силы приложена к внутренней поверхности отверстия.

## Расчет прочности в программе КОМПАС

Запускаем программу КОМПАС.

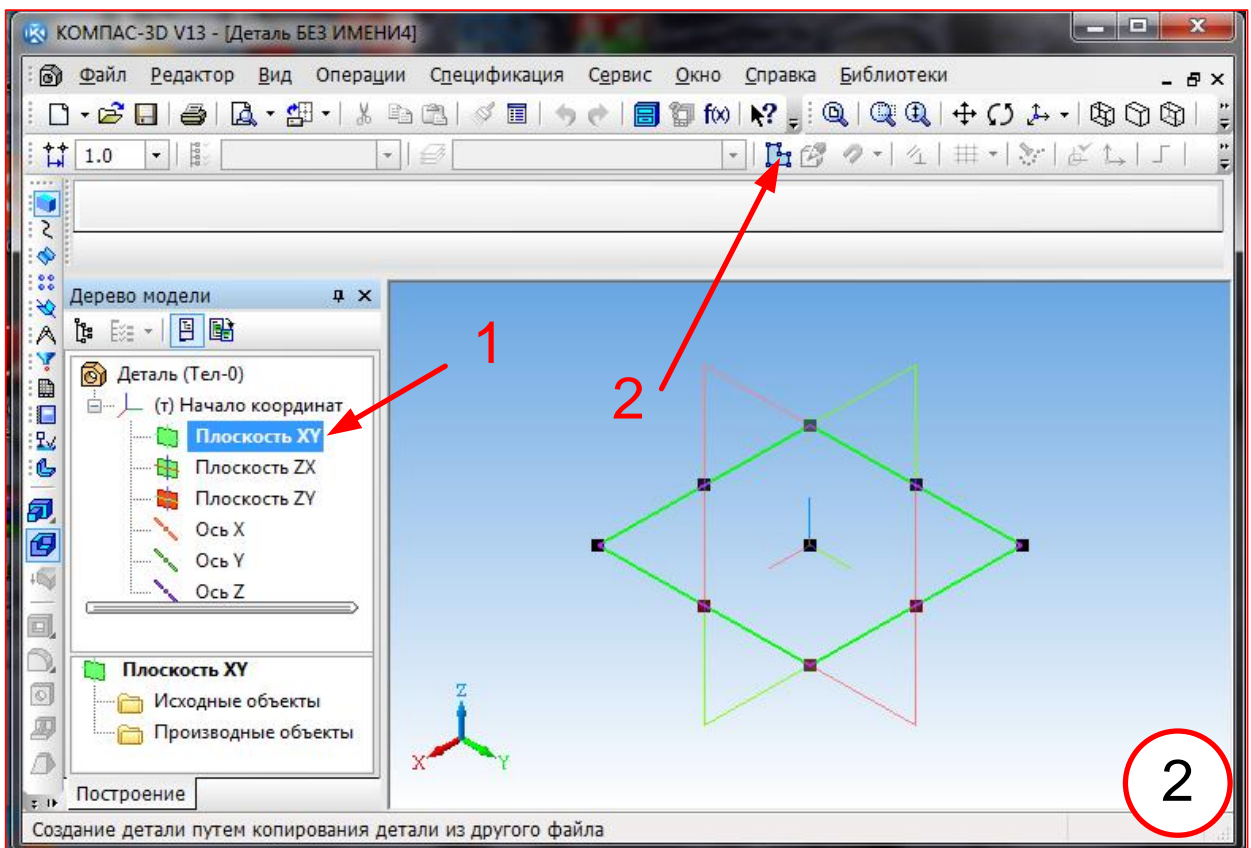
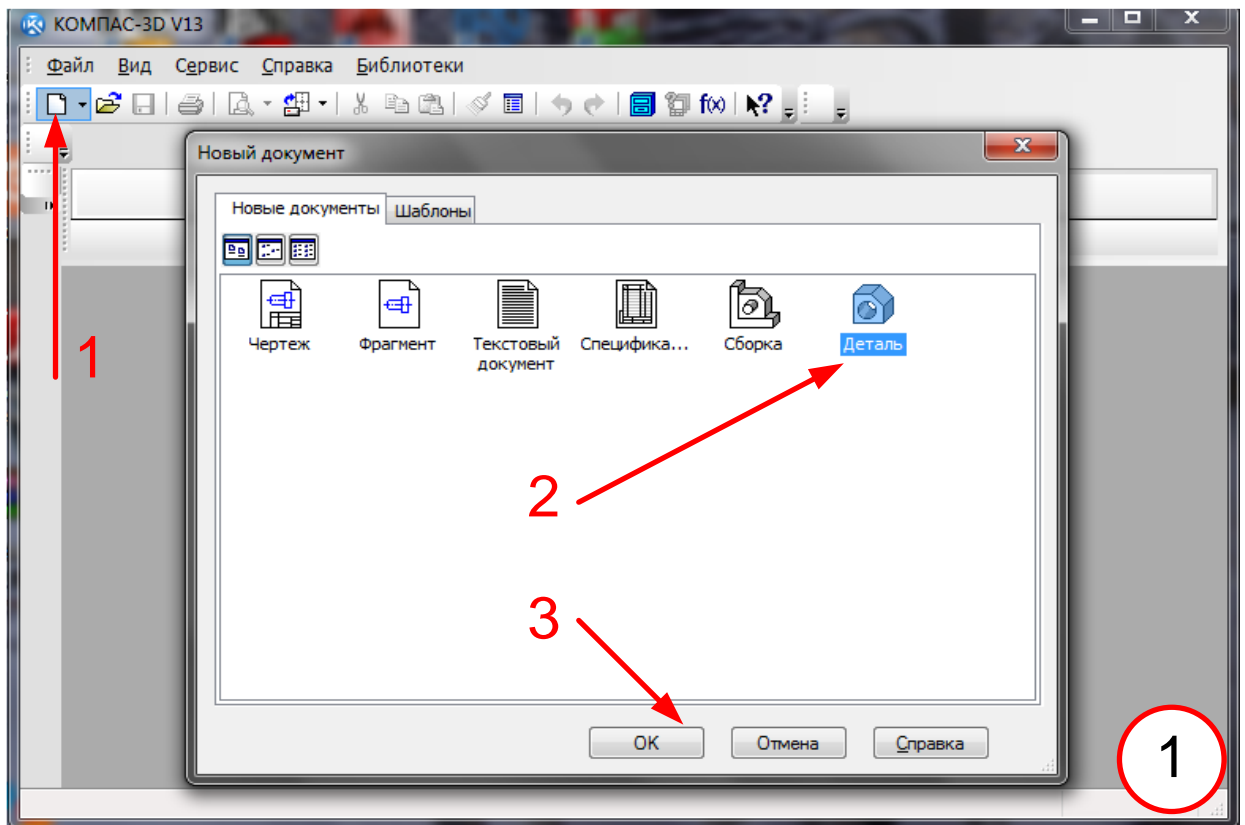
На вкладке **Новый документ** выбираем **Деталь** (1 – это номер рисунка, представленный в правом нижнем углу изображения экрана) – **1, 2, 3**. (Здесь и далее красными цифрами обозначена последовательность действий, указанная на рисунке.). Разворачивается окно программы КОМПАС. Выбираем плоскость XY **1** (2). Эта плоскость в изометрической проекции плоскостей помечается черными квадратиками. Далее, переходим в режим черчения эскиза, нажав **2**. (Если не оговорено особо, то под термином «нажатие» понимается нажатие на левую кнопку мыши – ЛКМ). При этом система координат «переворачивается» и плоскость XY готова для черчения (3). Чертим прямоугольник, воспользовавшись соответствующей иконкой – **1** (4). Законченный прямоугольник приобретает синий цвет. Нажимаем **1** (5) и переходим в режим моделирования, когда оси координат находятся в изометрической проекции. Для создания объемной фигуры воспользуемся операцией выдавливания. Нажимаем соответствующую иконку **2** и указываем расстояние, на которое

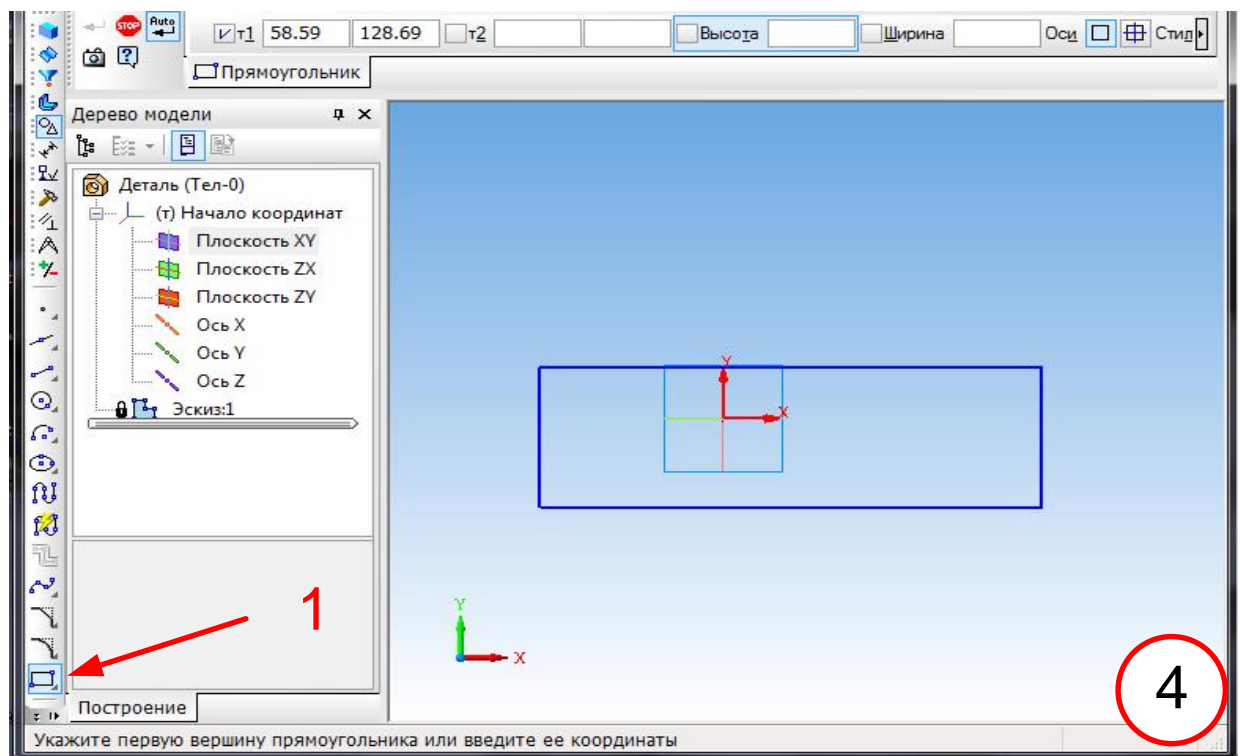
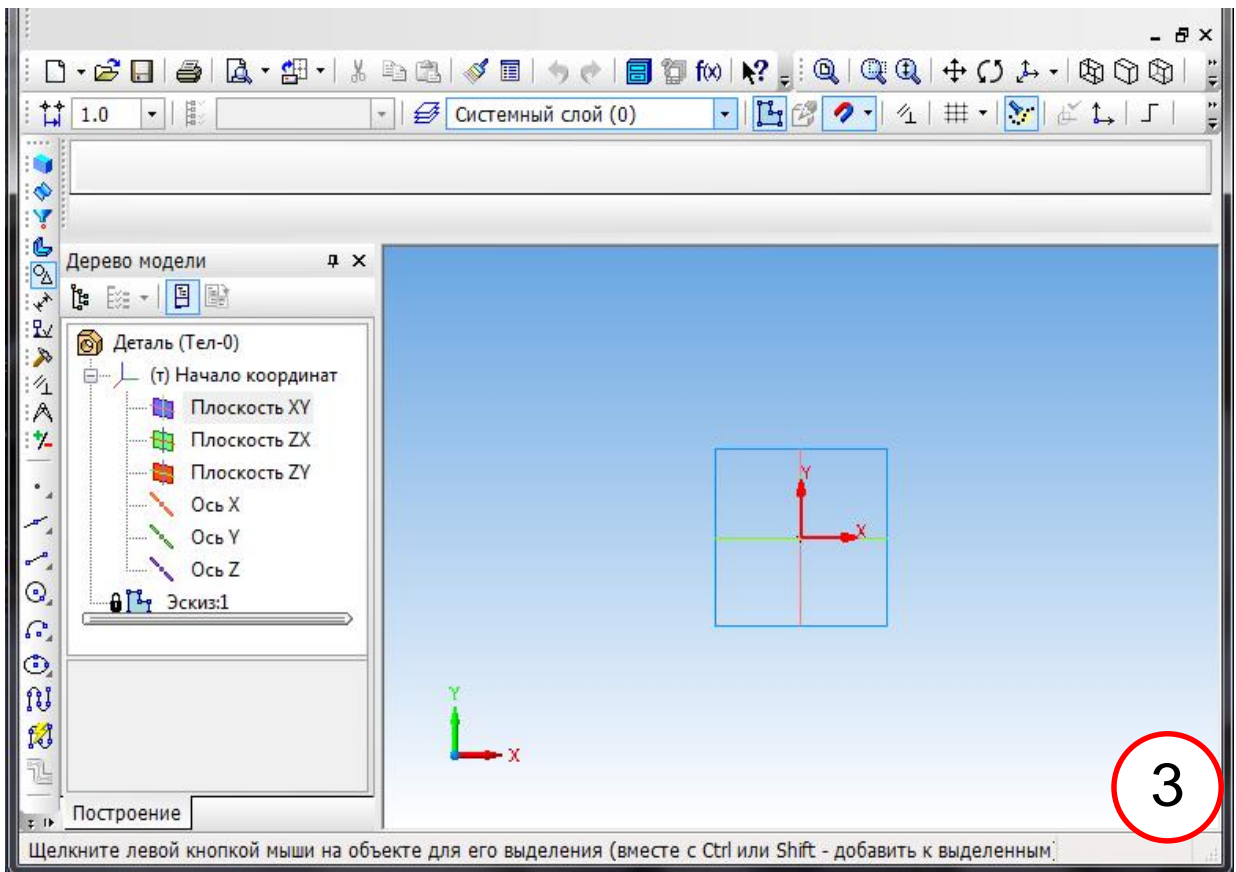


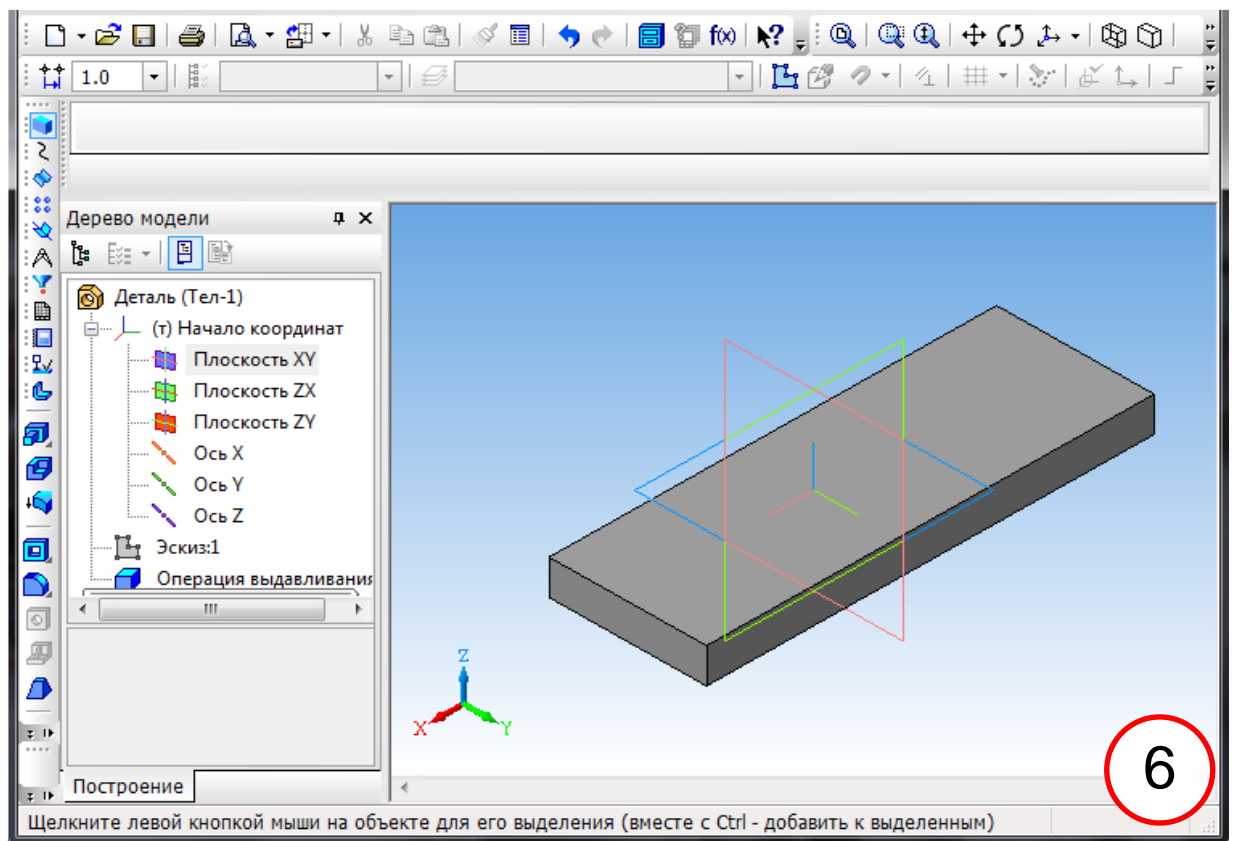
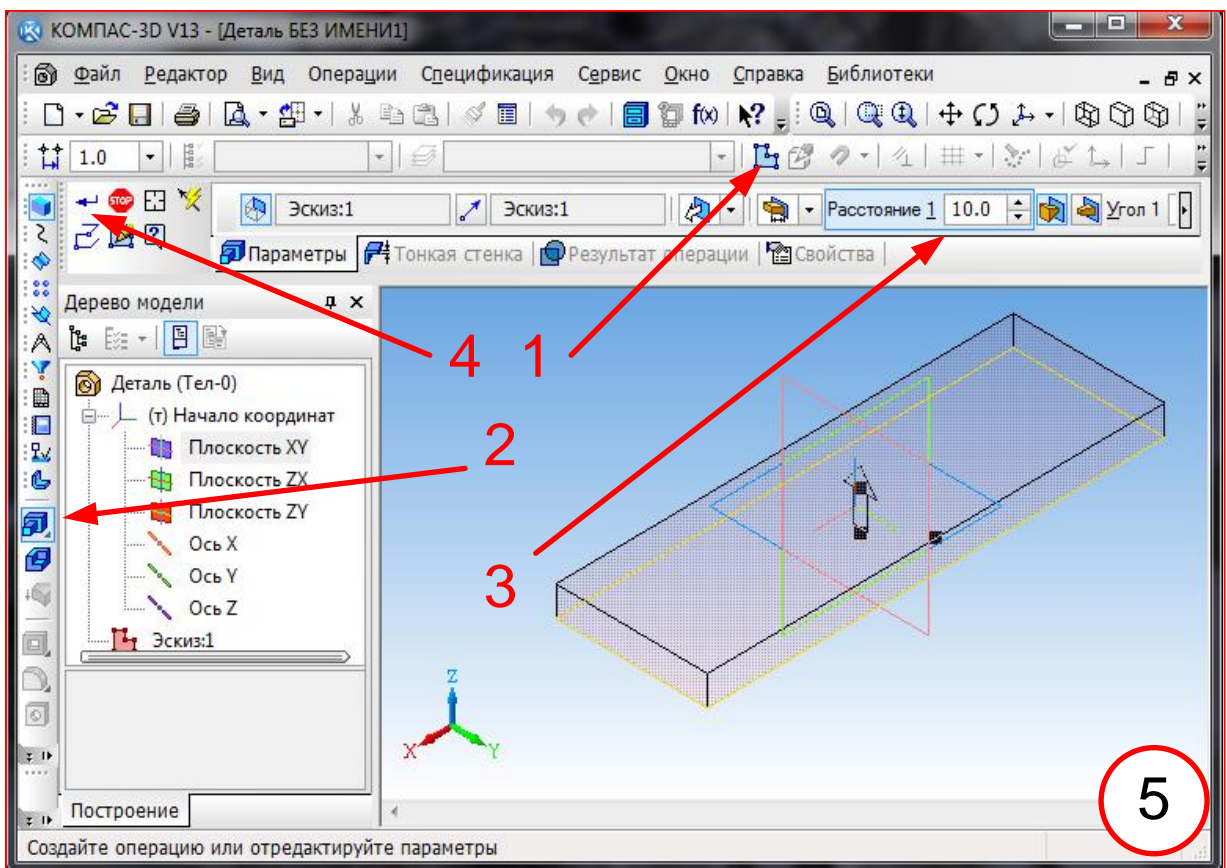
необходимо выдать эскиз **3**. Нажатие кнопки Enter **4** заканчивает операцию. Получаем твердотельную модель (6). Далее переходим опять в режим создания эскиза, нажав **1** (7). Рисуем уже известным способом прямоугольник, отмеченный синим цветом. Нажатием **1** (8) переходим в режим моделирования и повторяем процедуру выдавливания **2, 3, 4**. На образовавшейся модели отмечаем грань **1** (9). При этом курсор имеет соответствующий символ поверхности. Эта грань становится зеленой. Переходим в режим эскиза, нажав **2**. На глобальной проекции YZ чертим окружность с помощью иконки операции **1** (10). Возвращаемся в модель **2**. На модели (11) создаем отверстие выдавливанием окружности **1,2,3**. Скругление стойки осуществляем, выполнив последовательно **1, 2, 3** (12). При этом на шаге **2** курсор имеет символ ребра. Отмечаем второе ребро **1** (13) и заканчиваем операцию **2**. Результат – (14).

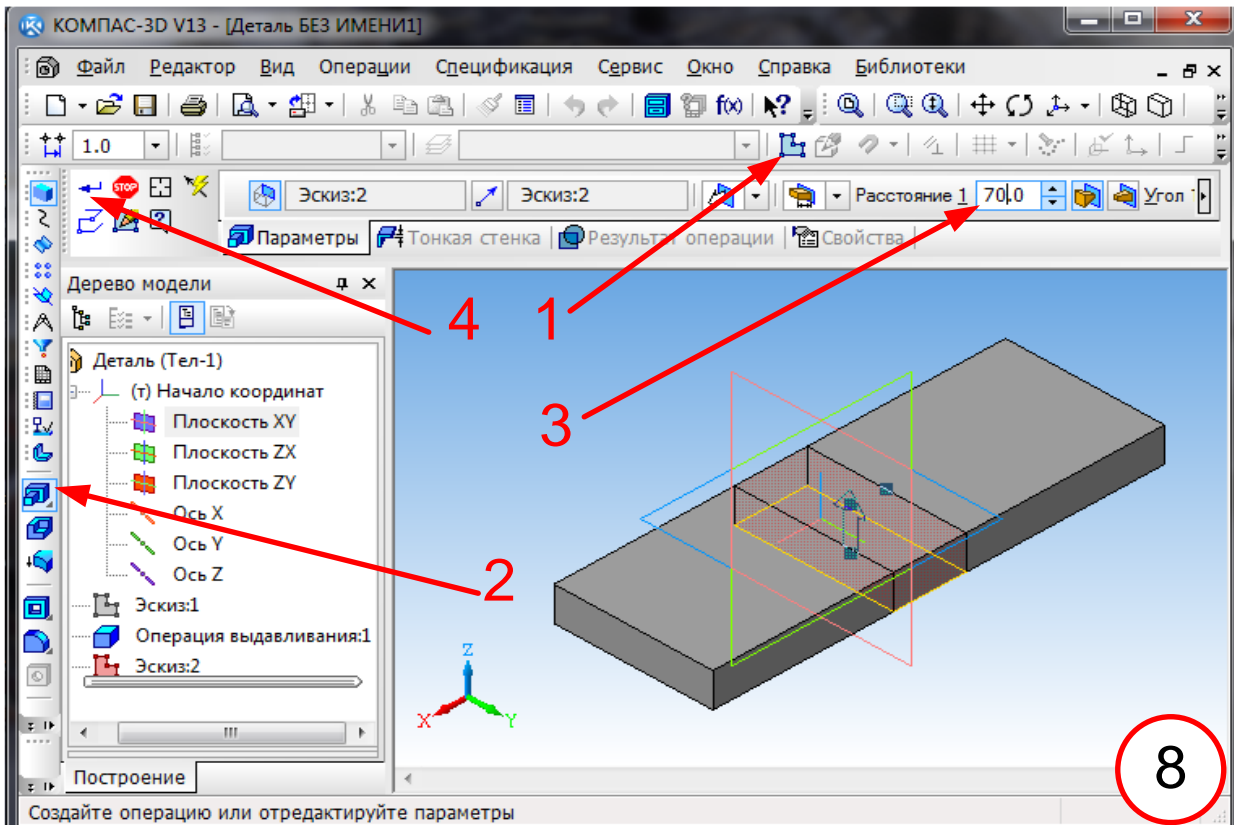
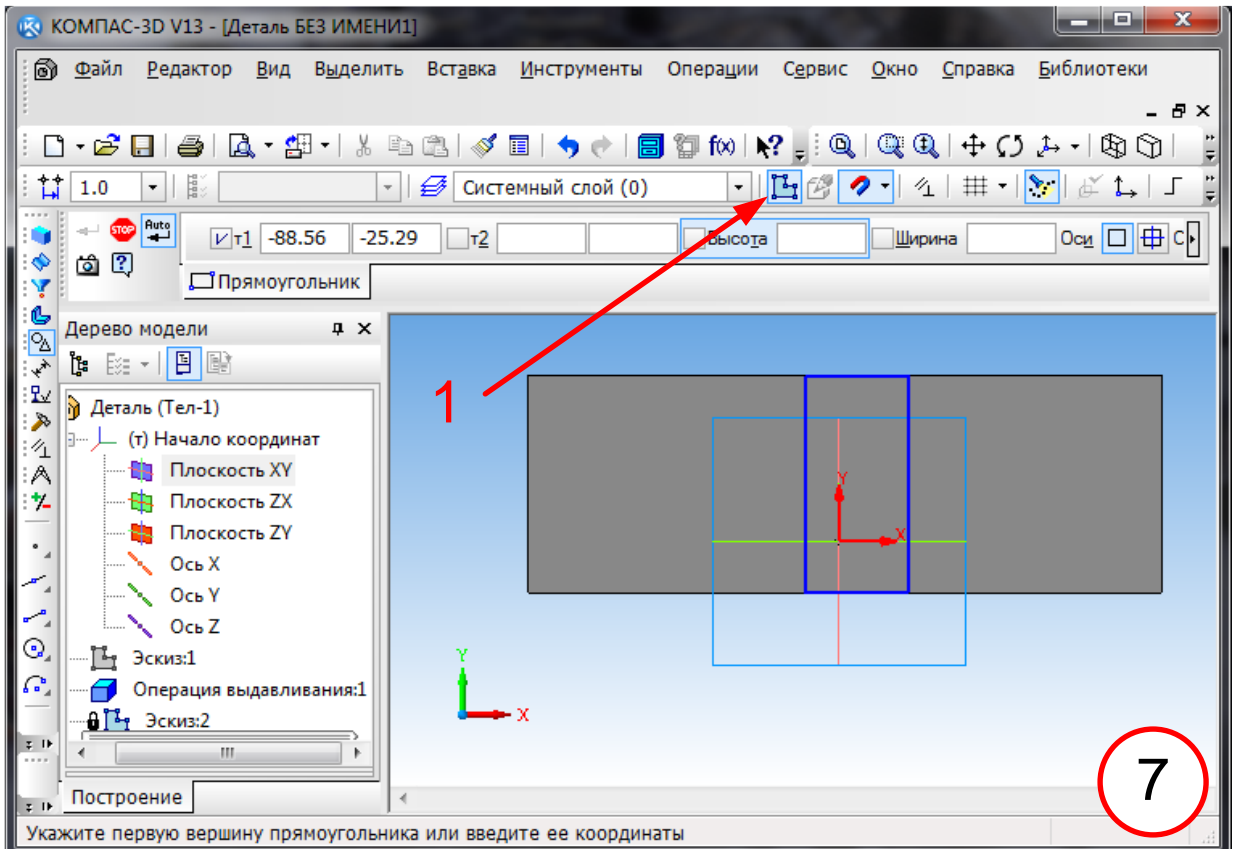
### **Моделирование закончено.**

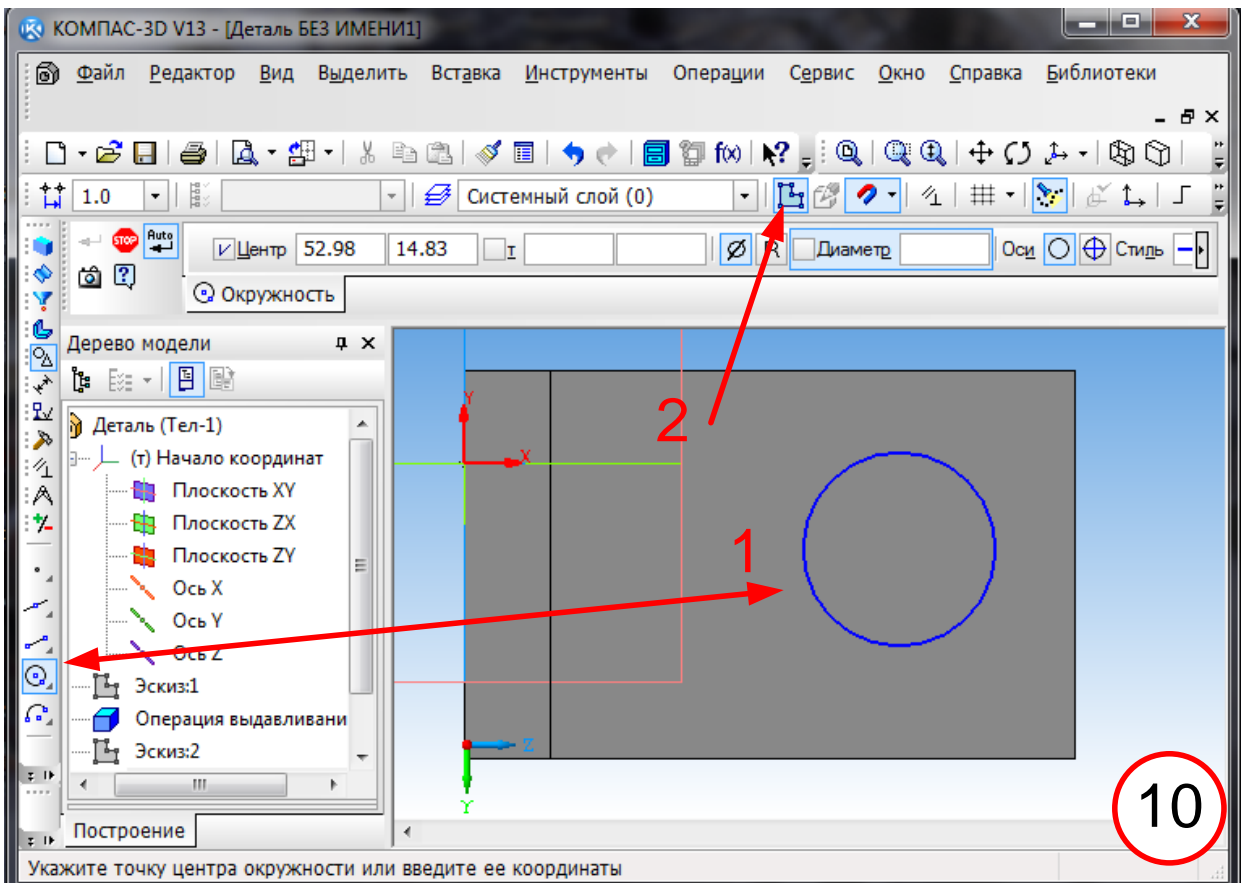
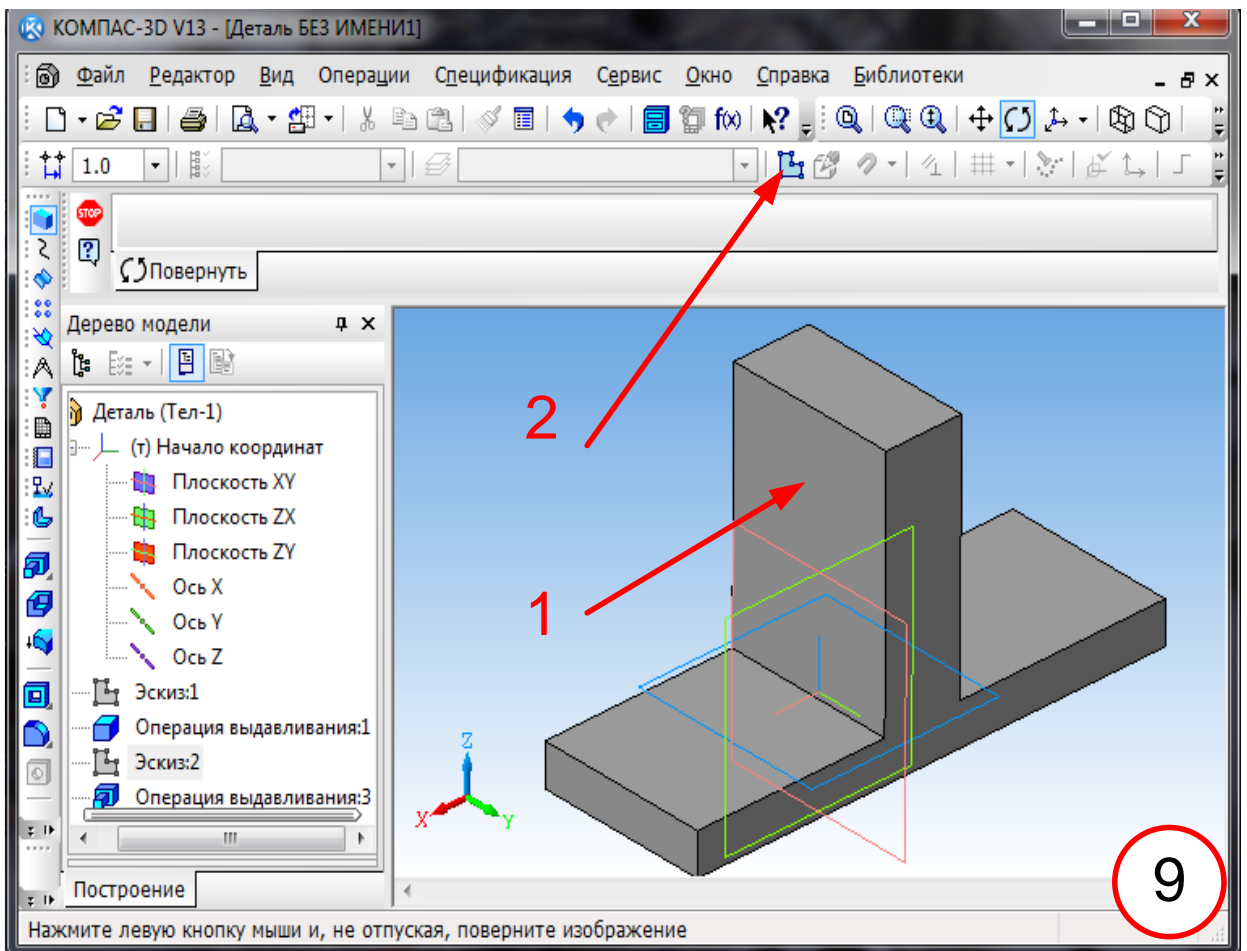
**Приступаем к прочностному анализу.** Для этого нажимаем иконку **Библиотека** **1** (15) и в появляющемся внизу экрана меню выбираем **Расчет и построение**, затем **2** (15). Выбираем **Установить закрепление** – **1, 2** (16). Далее обозначаем ребро **3**. При этом курсор имеет символ ребра. Проставив галочки в перемещениях по X, Y, Z, задаем нулевые перемещения по этим осям – **4**. Назначаем граничные условия на противоположном ребре **5**. Здесь мы убираем галочки у перемещений по X и Y, оставив только по Z. Приложение нагрузки осуществляется выбором опции **Приложить распределенную нагрузку** **1** (17). Выделив внутреннюю поверхность отверстия **2**, назначим величину прикладываемых усилий – **3**. Завершим операцию нажатием **4**. Следующий этап – генерация конечно-элементной сетки – **1, 2** (18). После нажатия Enter начинается генерация. После создания сетки, как показано на рисунке, запускаем программу на расчет **3**. Всплывает окно (19), в котором нужно подтвердить **Статический расчет**. После окончания расчета нажимаем **1, 2** (20) и в появляющемся окне назначаем компоненты напряжений, которые нужно вывести **3**. В данном случае выбрано SVM – интенсивность напряжений. Нажимаем **4** и получаем распределение интенсивности напряжений в исследуемой конструкции «сверху» (21) и «снизу» (22).

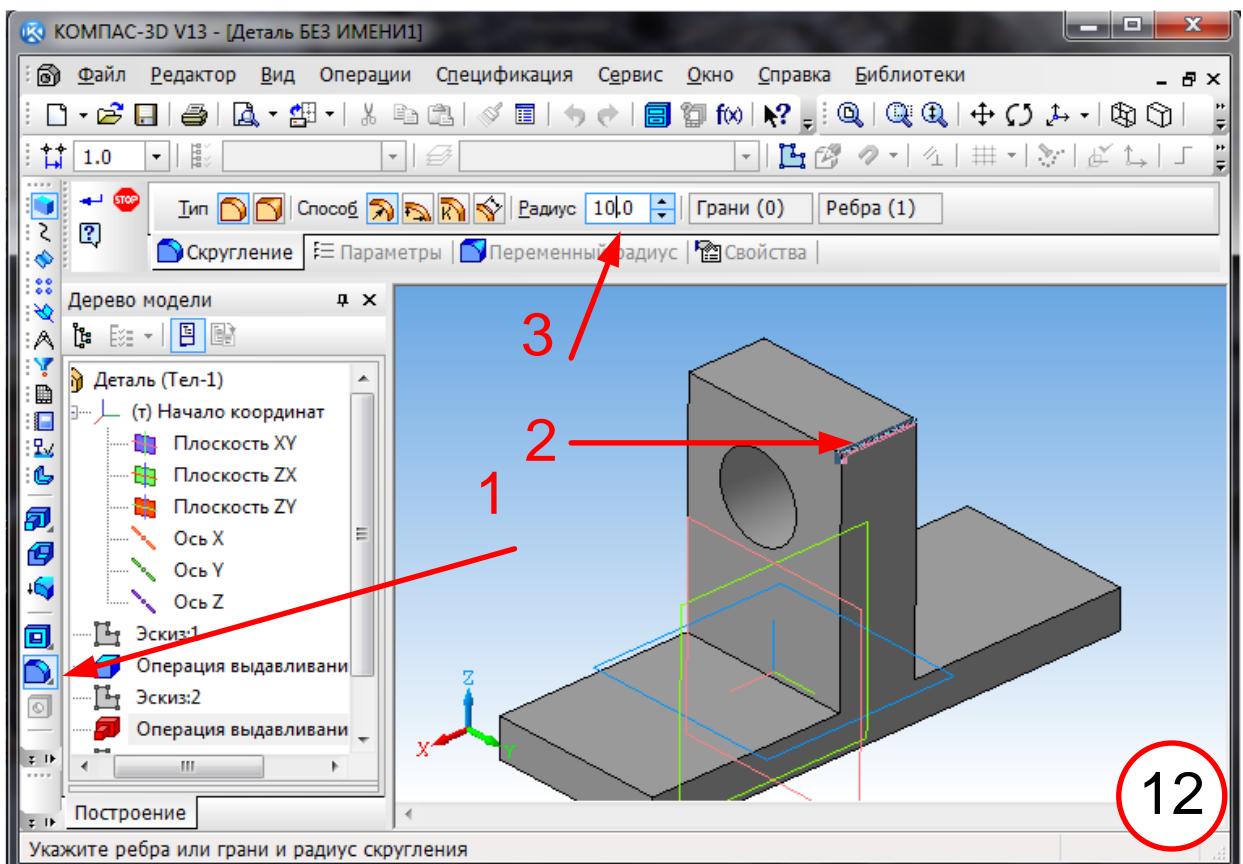
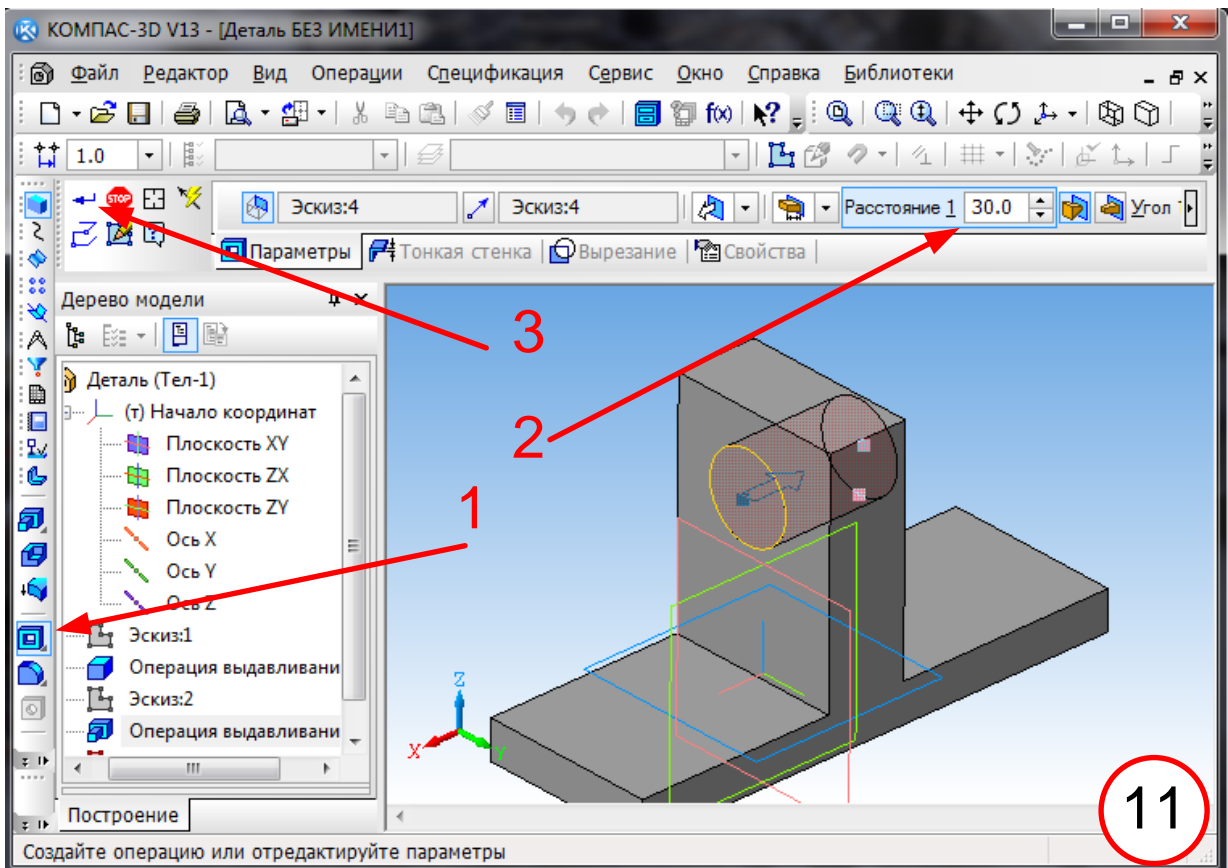


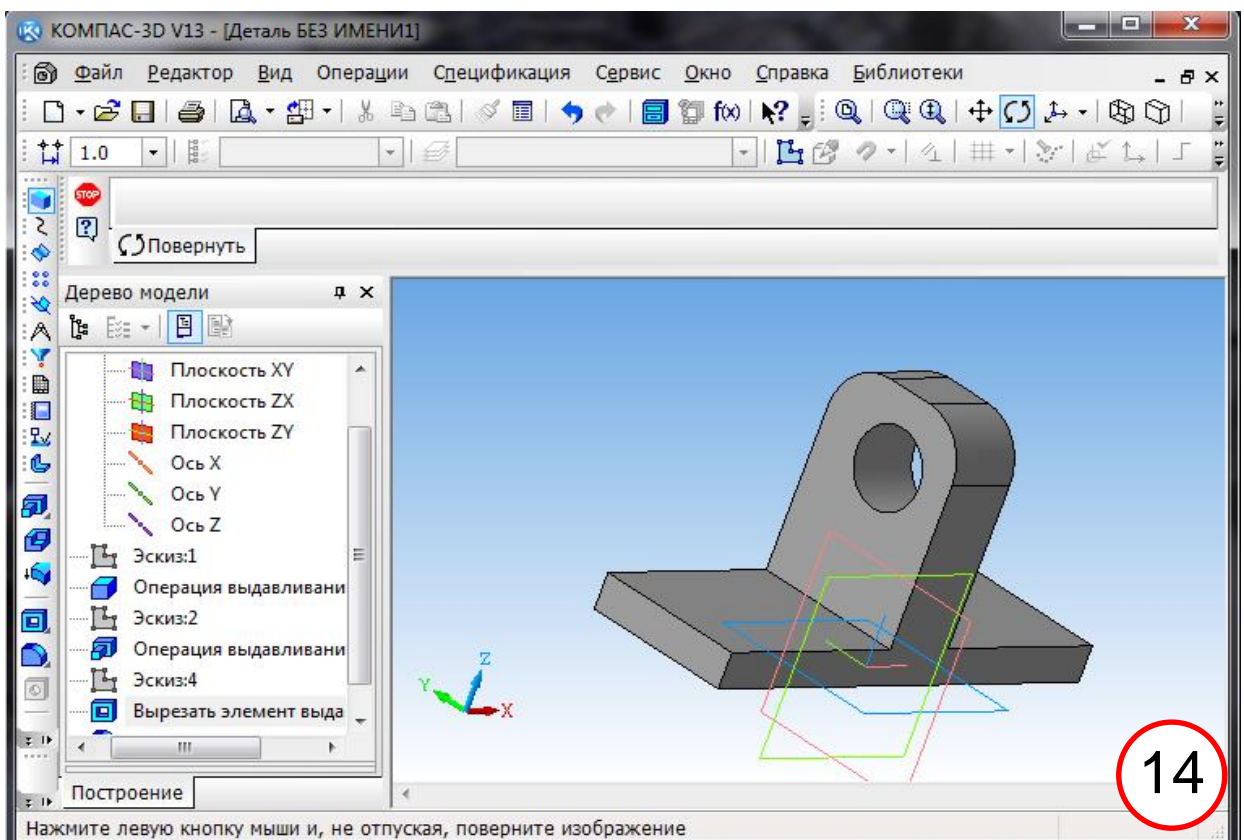
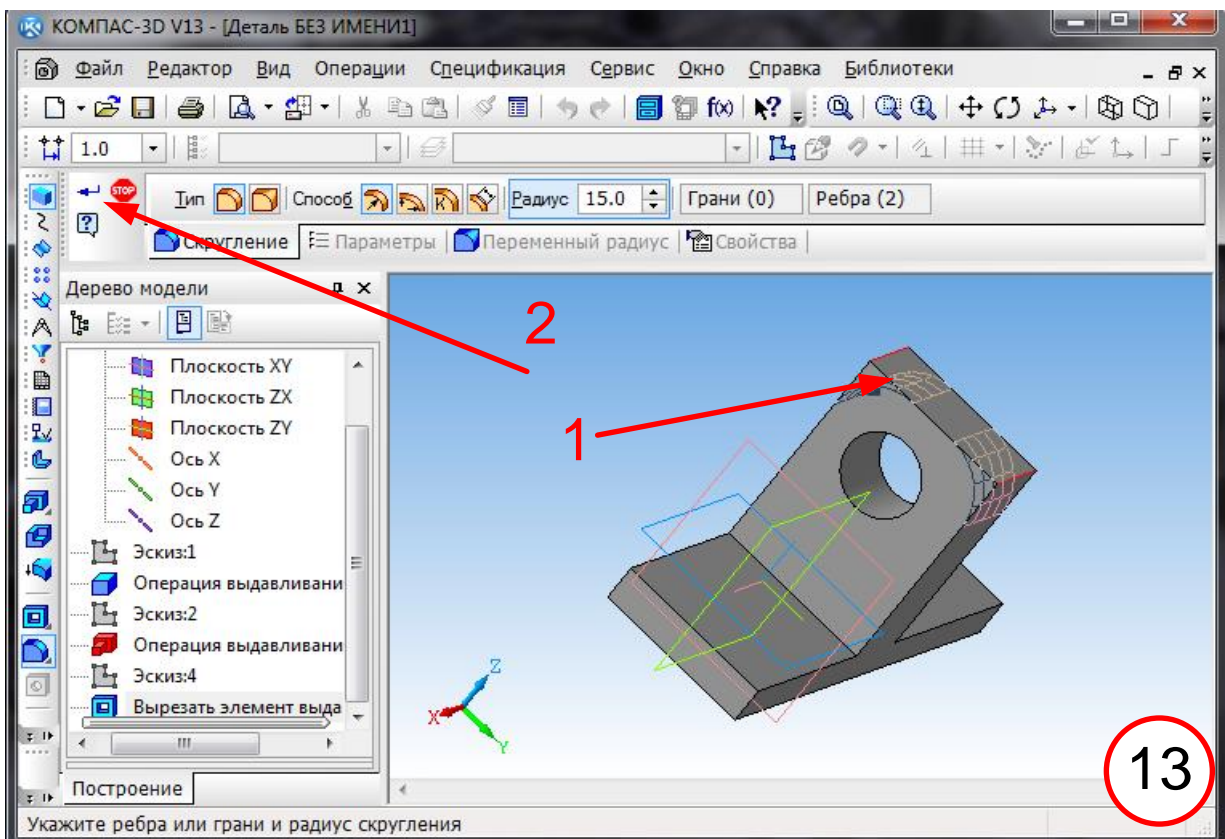




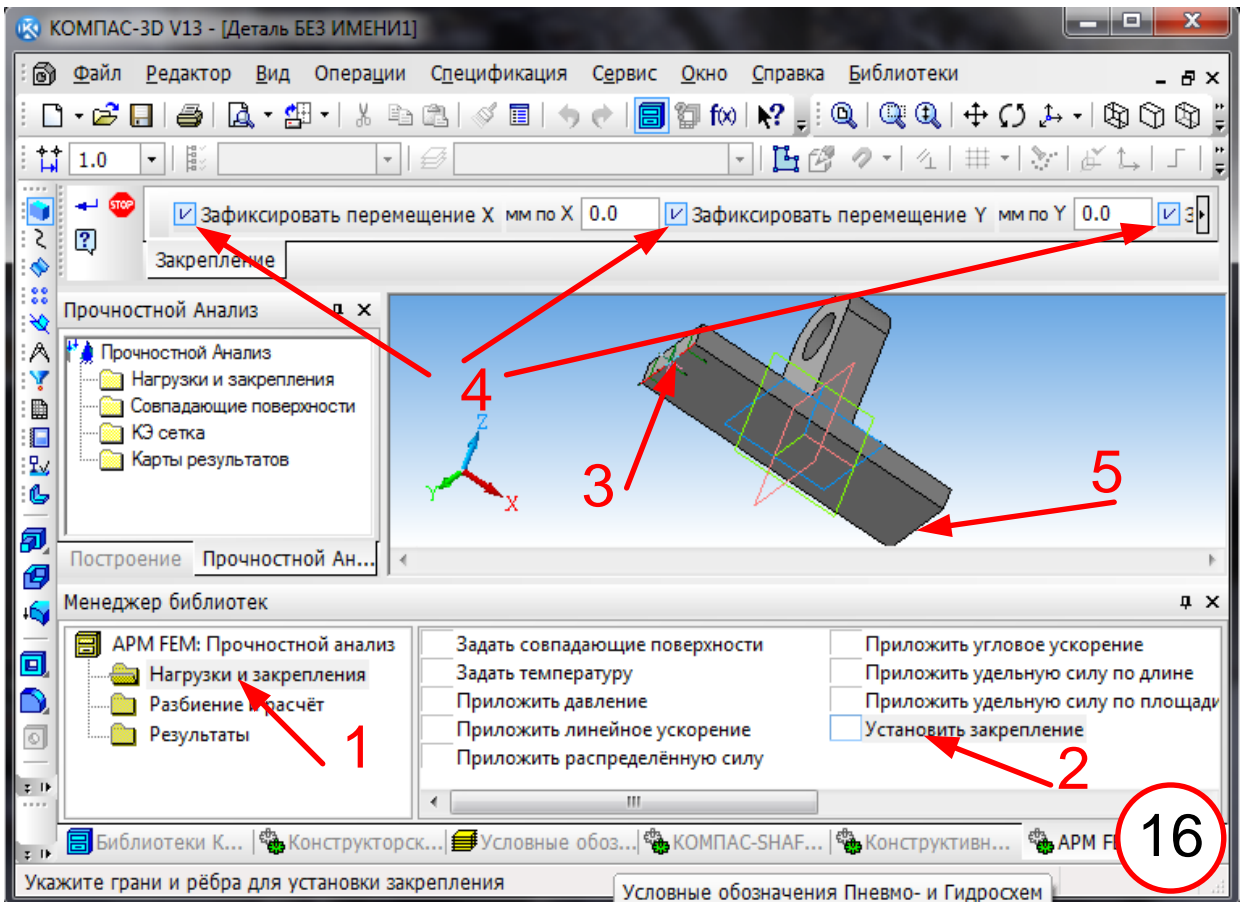
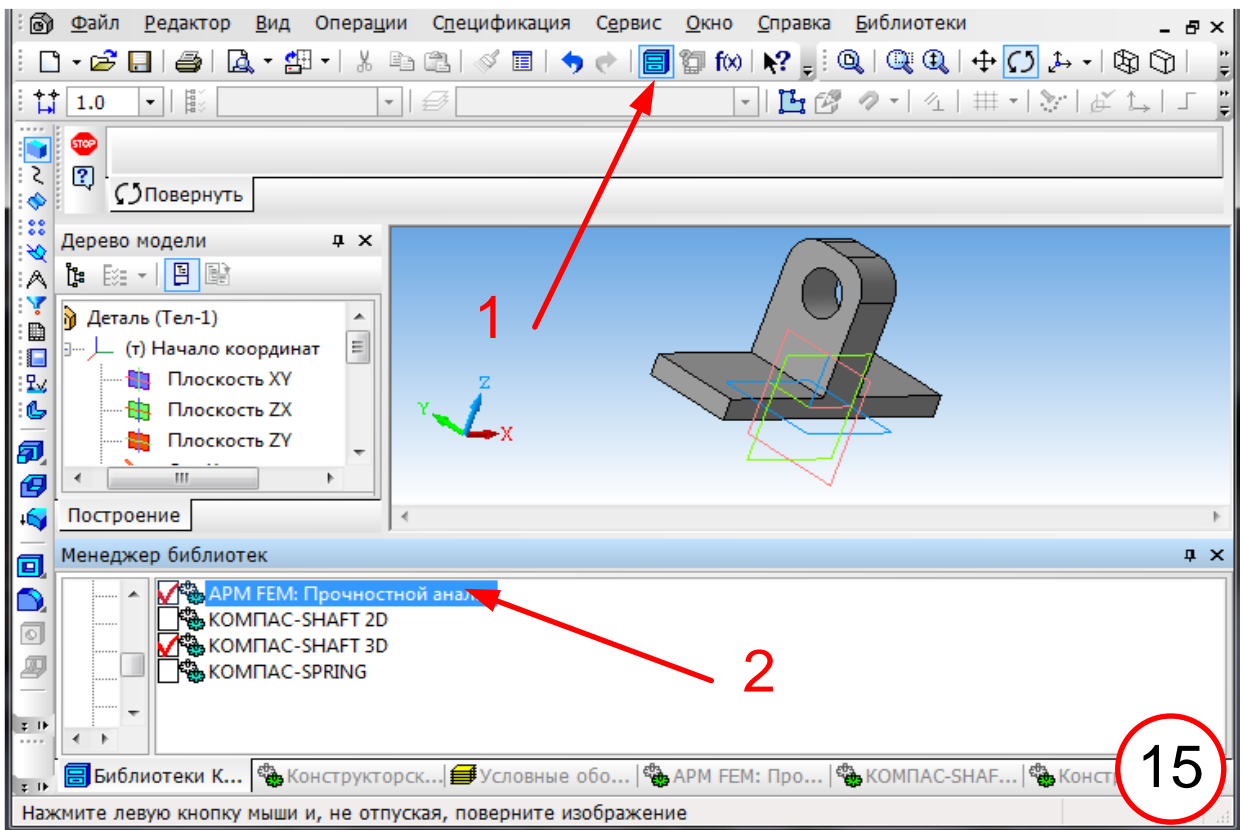


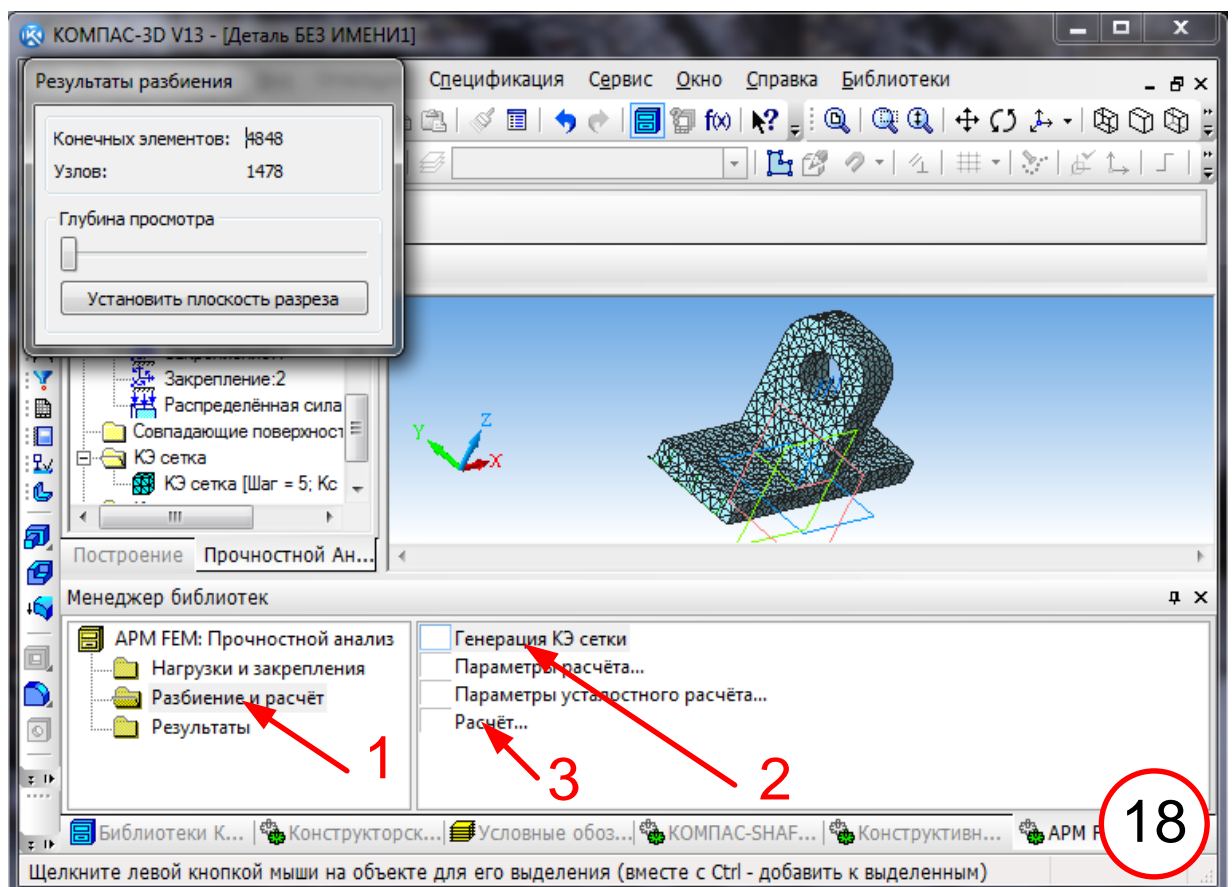
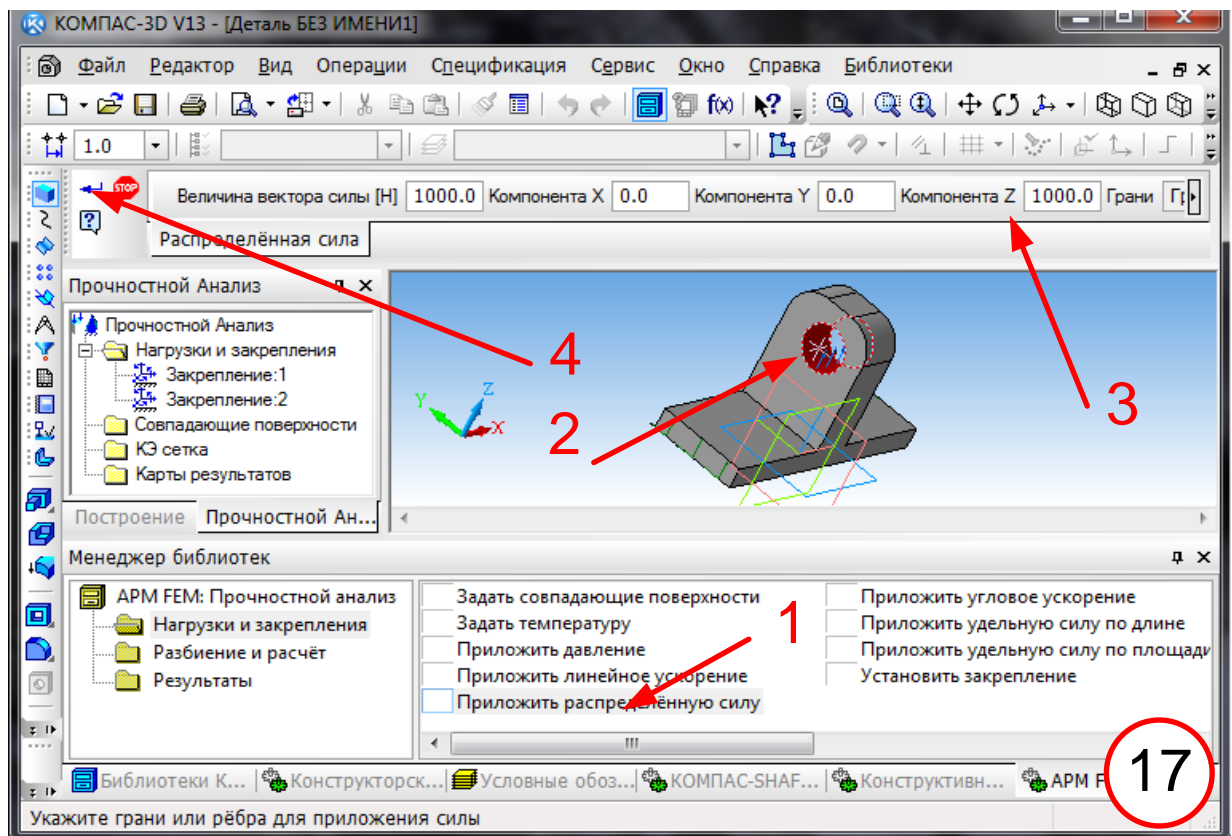


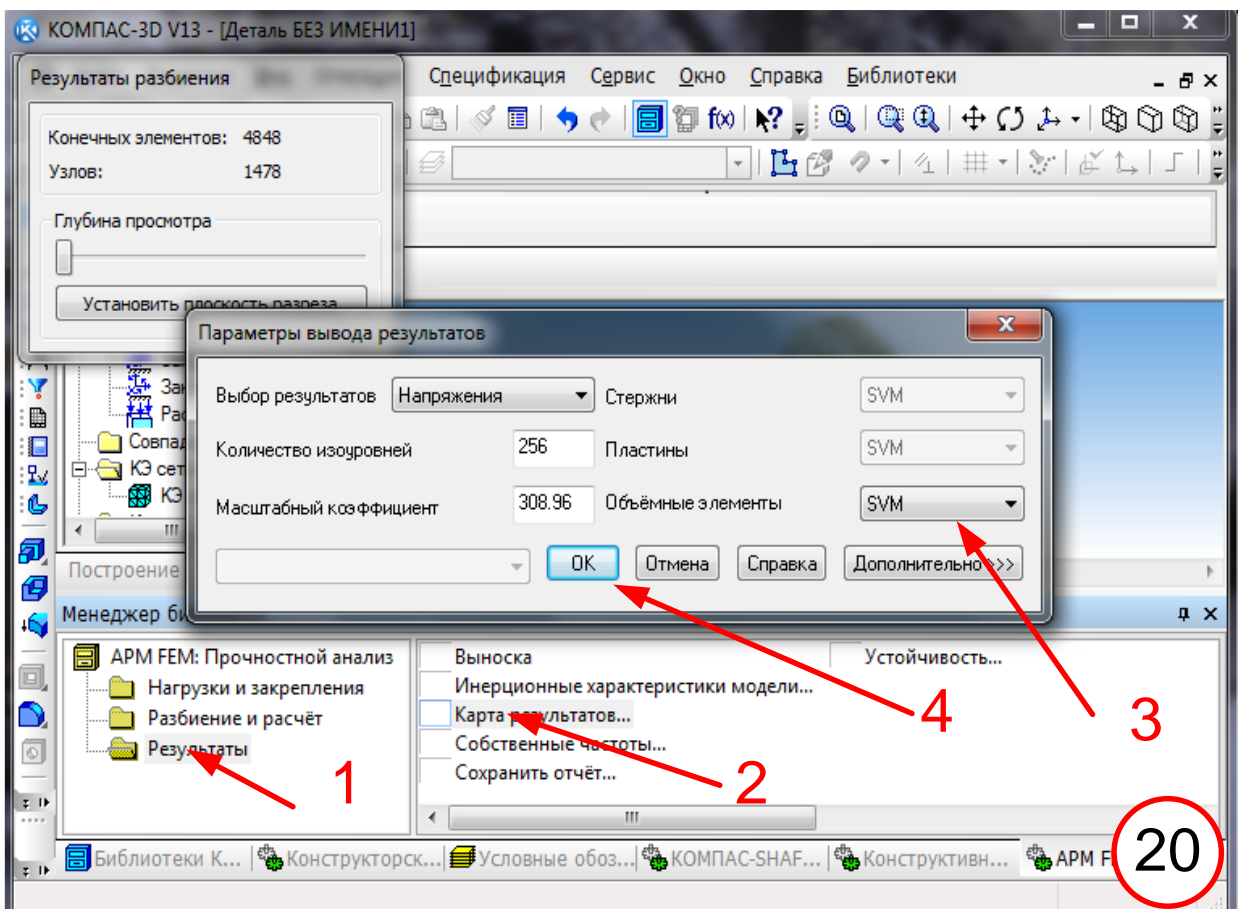
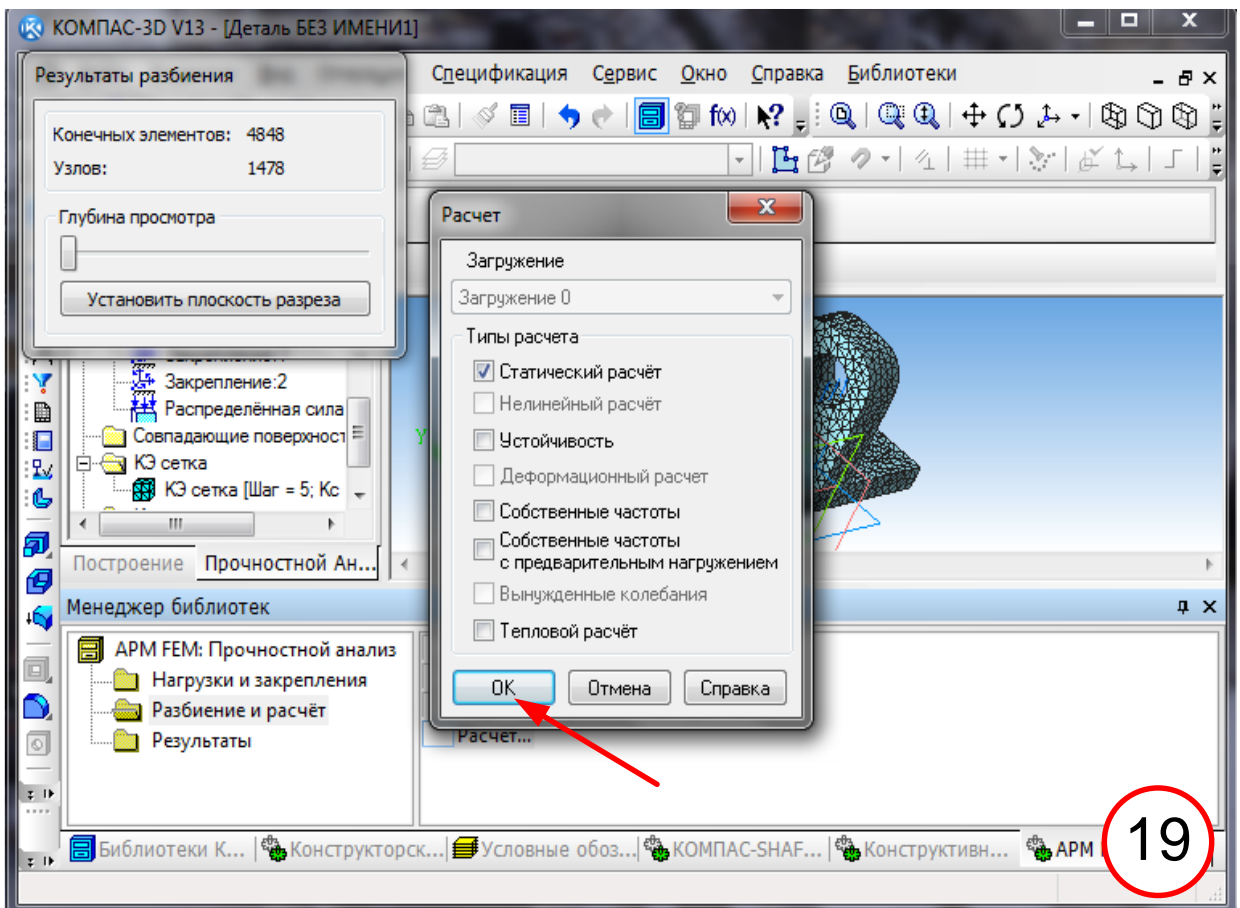


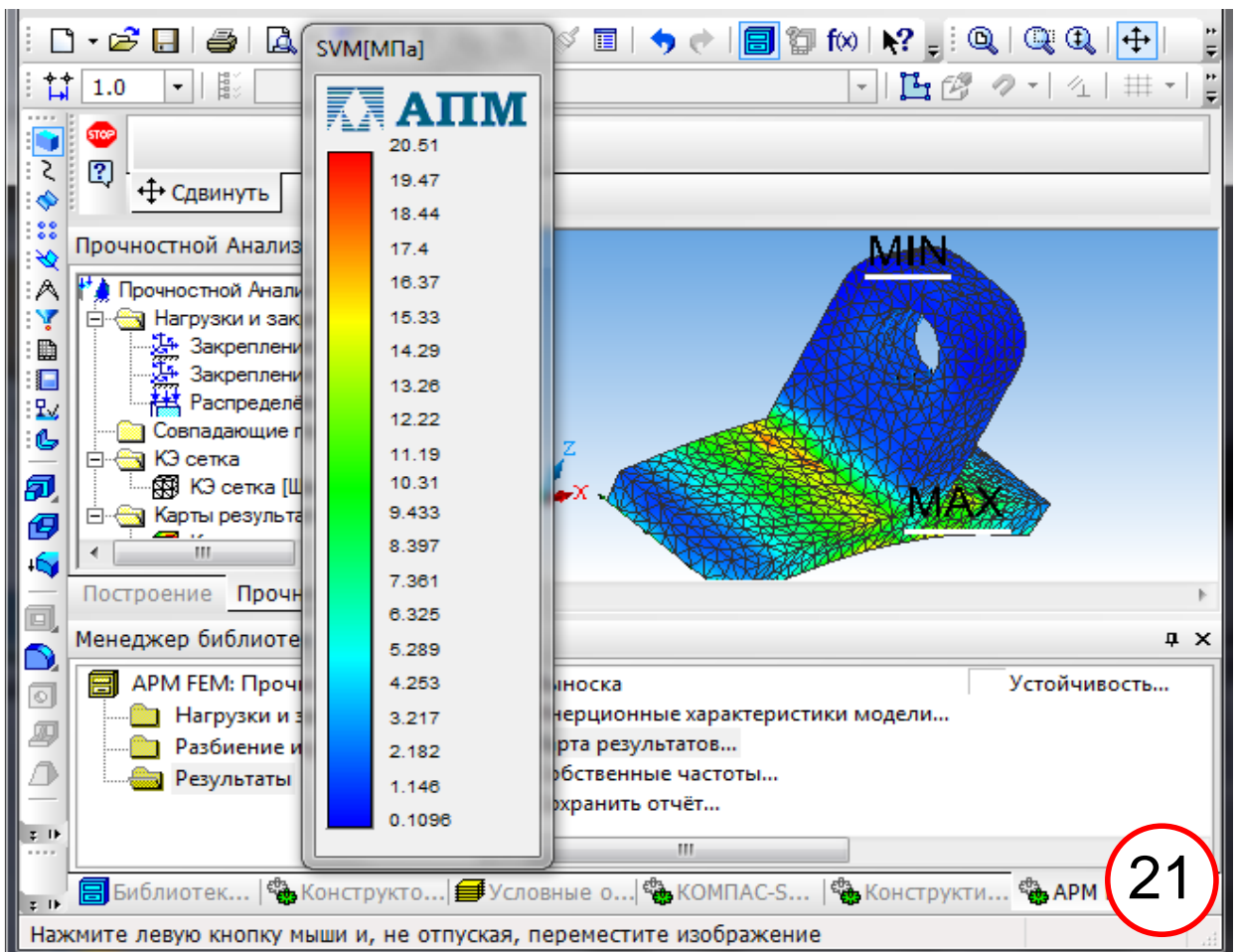




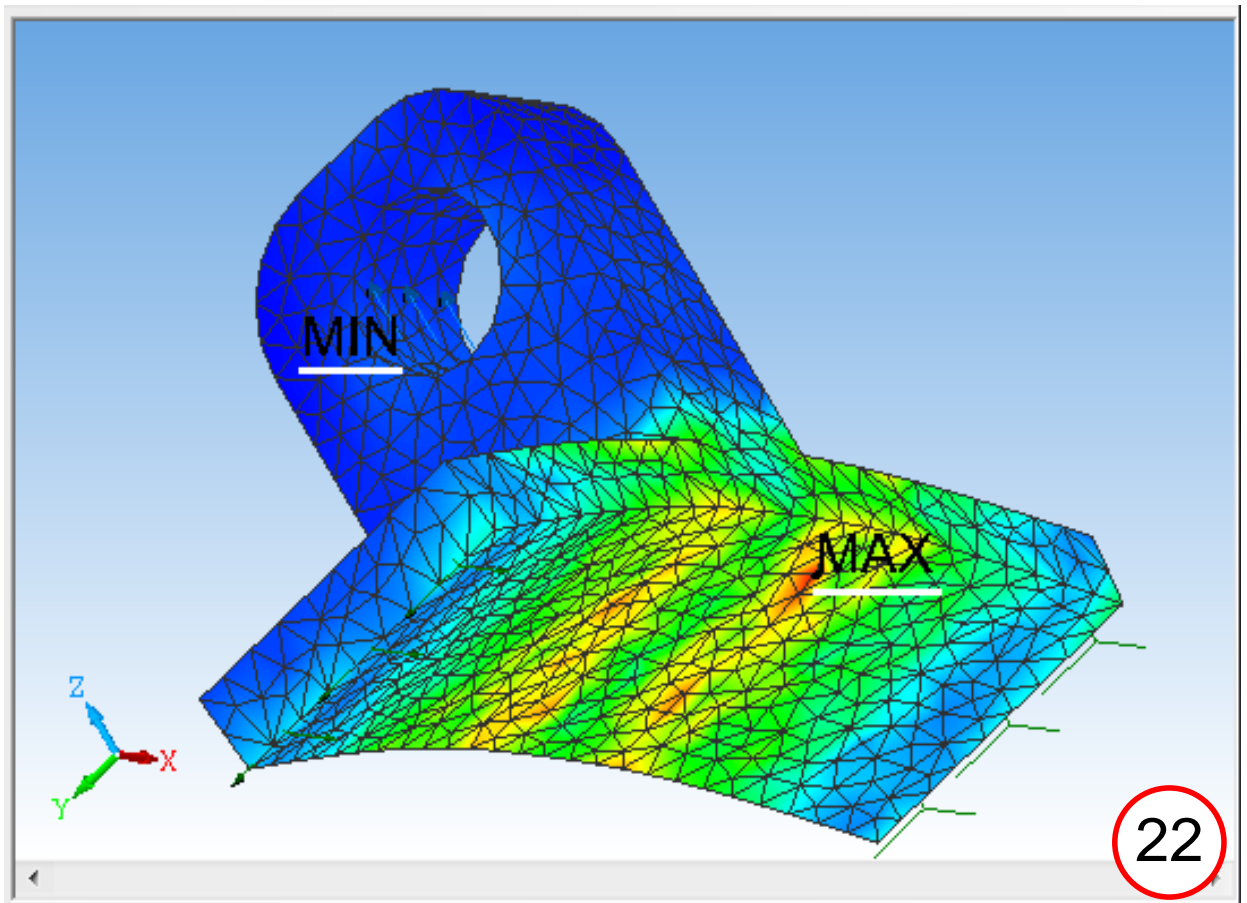






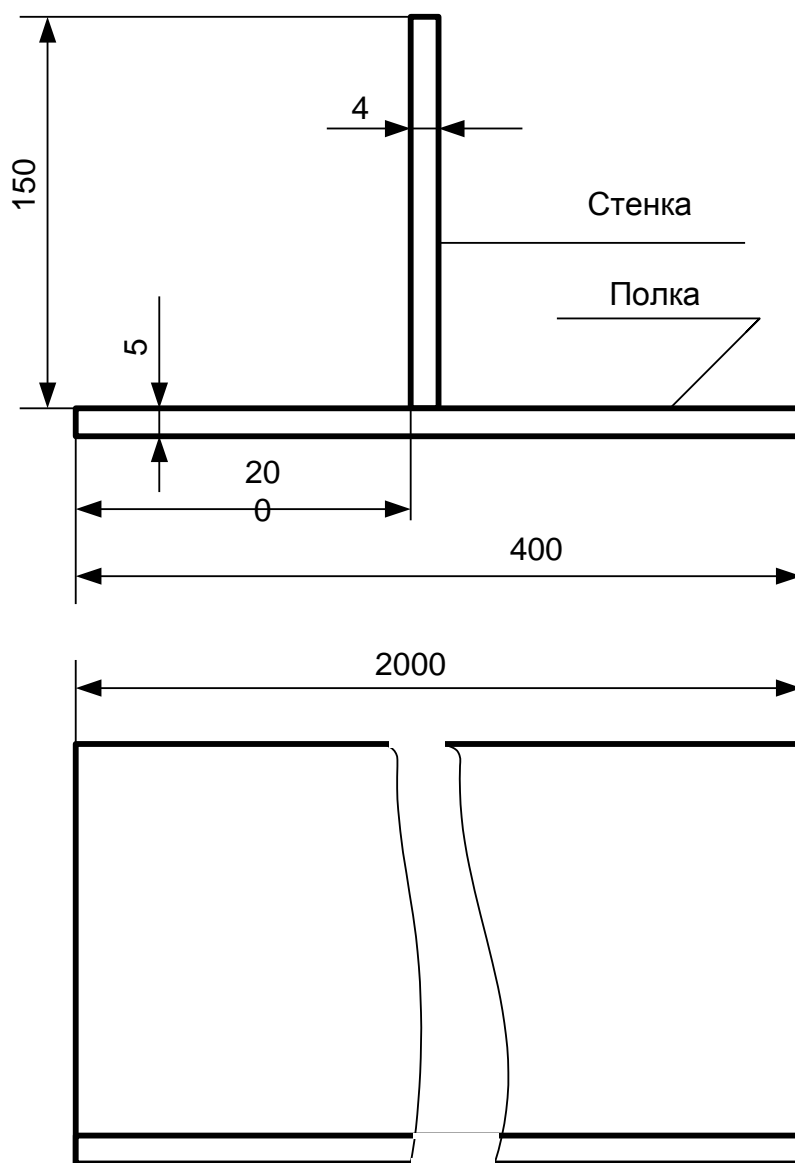


21



22

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МКЭ В  
ПРОГРАММЕ Inventor



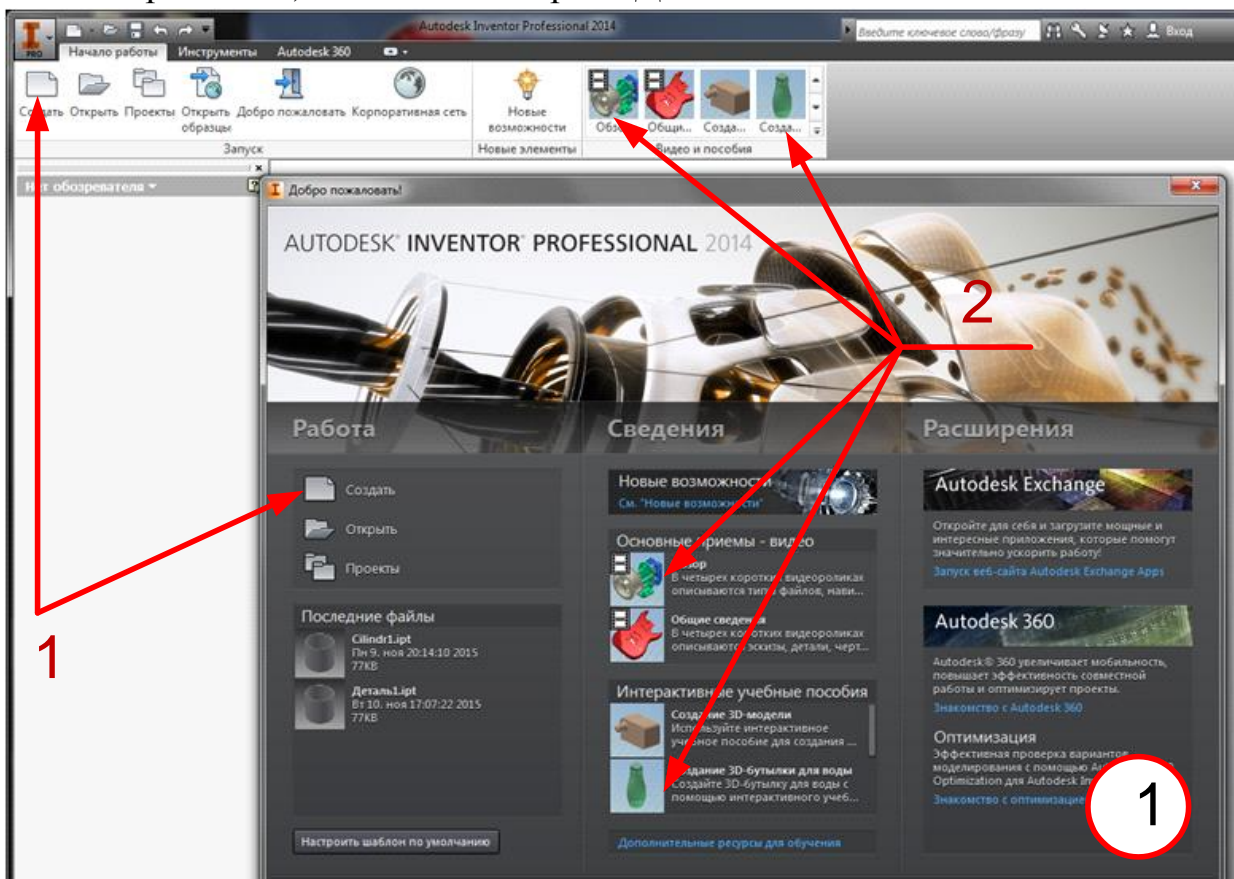
Чертеж балки

## Расчет сварных конструкций в программе Inventor.

Итак, начинаем работу в **Inventor**. Некоторые условности: в кружке справа внизу рисунка указан его номер; красными цифрами в поле рисунка приведены номера в последовательности выполнения; ЛМ, ПМ – левая и правая кнопка мыши. Последовательность пунктов меню выделена **жирным шрифтом**.

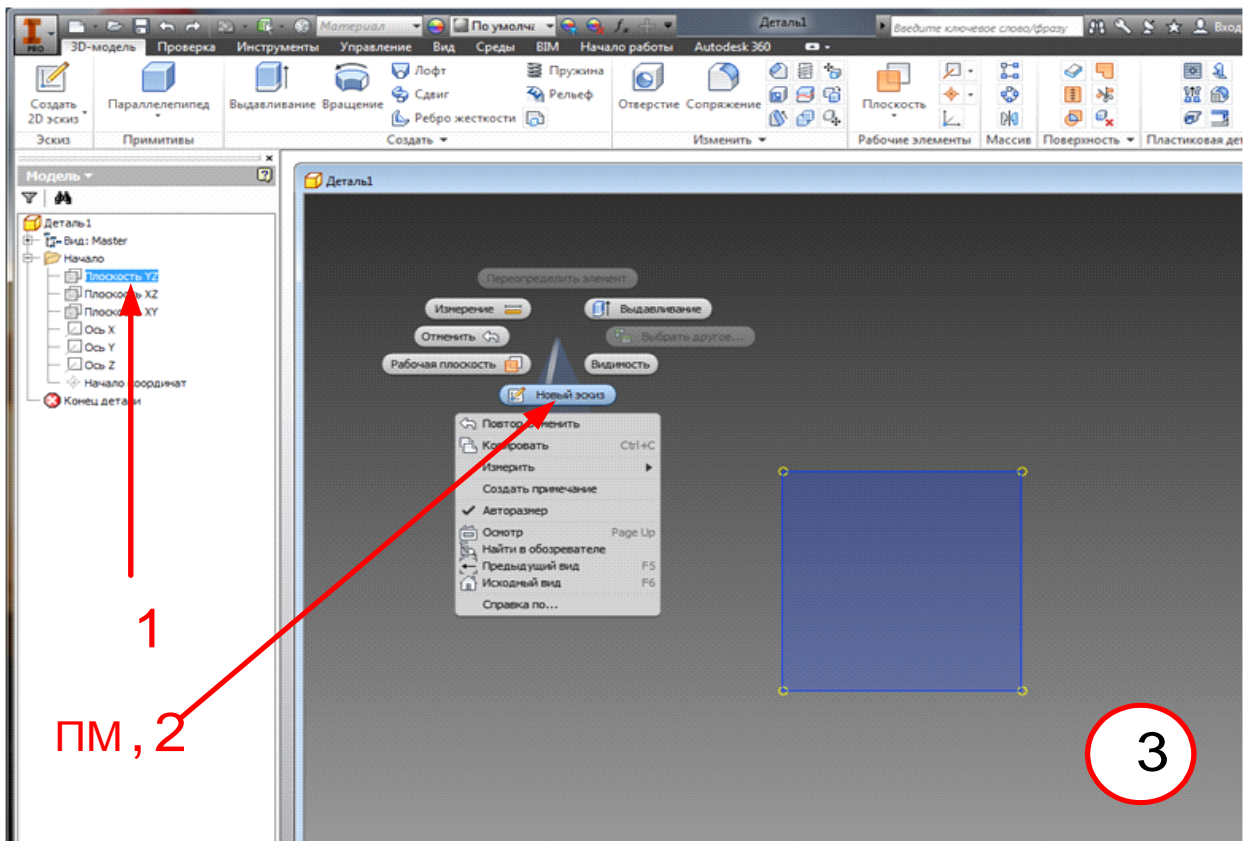
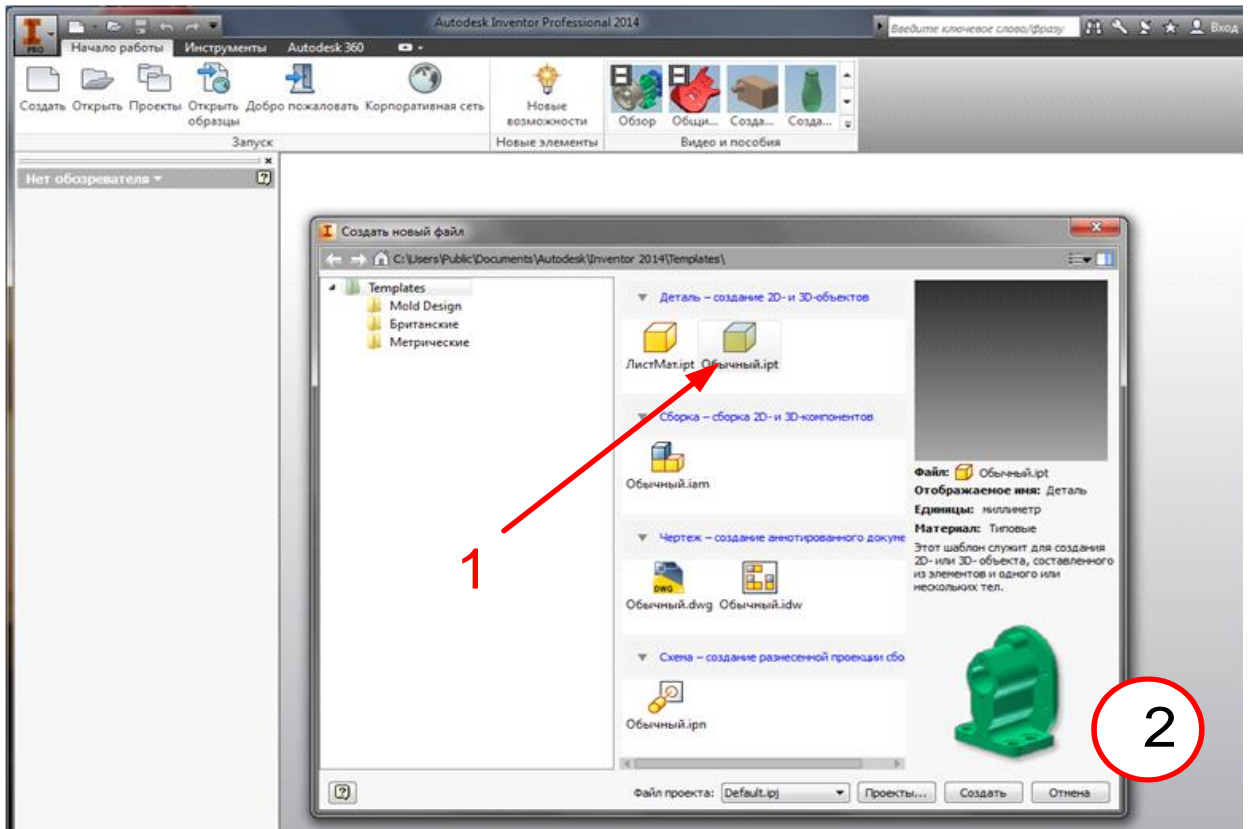
### 1. Построение геометрии.

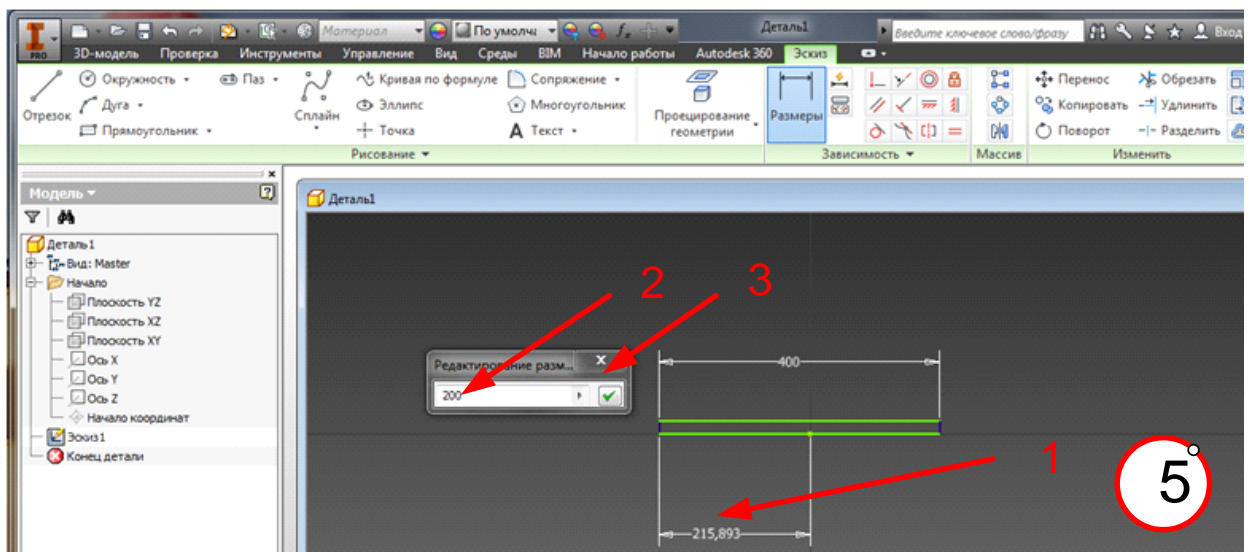
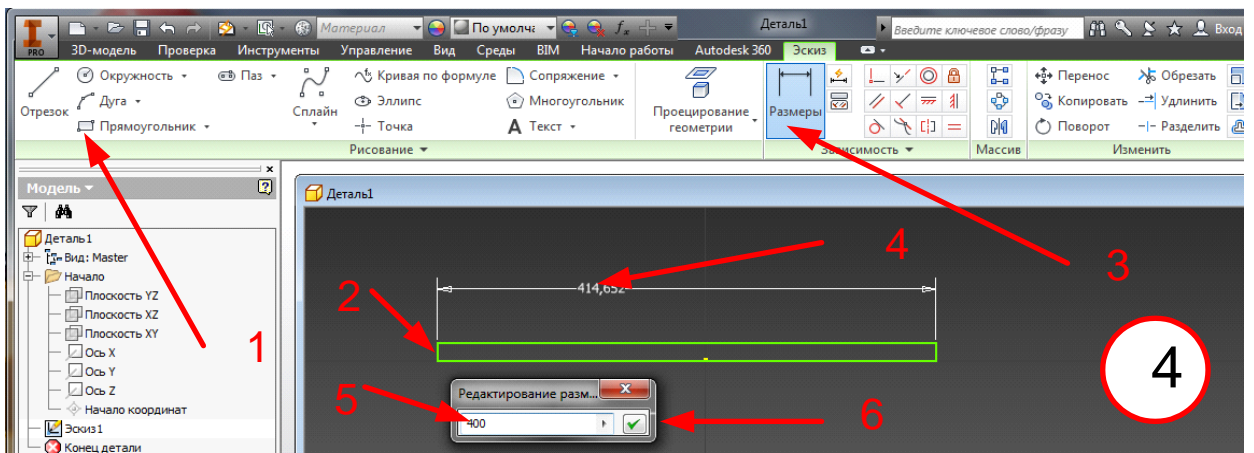
При запуске программы открывается окно 1. Нажимаем **Создать 1**. (Кстати, с основами работы в программе можно ознакомиться в прилагаемых справочных материалах 2.). В окне 2 выбираем **Деталь – Обычный**.



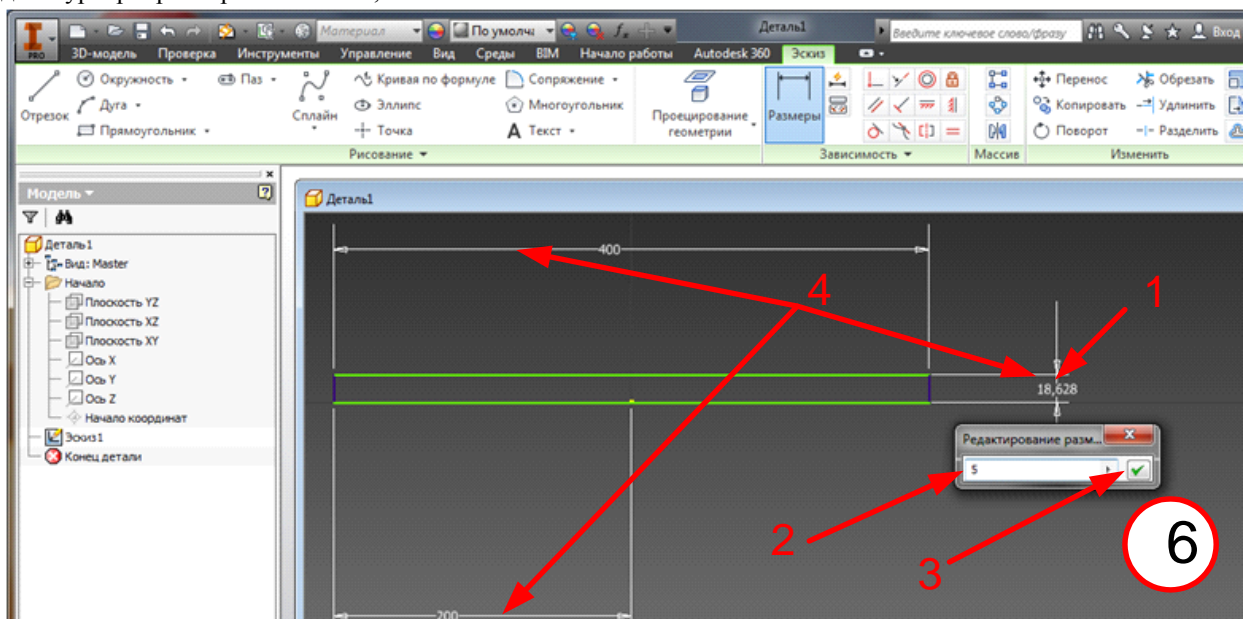
Далее в окне 3 выбираем систему координат YZ, 1. Нажимаем **ПМ** и в появляющемся меню нажимаем (**ЛМ**) **Новый эскиз 2**. Вверху экрана появляется лента графических средств создания эскиза 4. Выбираем **Прямоугольник 1** и, поставив курсор в начальную точку на горизонтальной оси, нажав и отпустив **ЛМ**, рисуем прямоугольник 2. Далее выбираем **Размеры 3**. Подводим курсор к верхней линии прямоугольника, нажимаем **ЛМ** и, не отпуская, протягиваем вверх. Появляется размерная линия. Отпускаем и снова нажимаем **ЛМ**. Возникает меню редактора размера 5. Устанавливаем размер 400 мм и нажимаем галочку завершения операции 6. Теперь устанавливаем размер между вертикальной осью и краем прямоугольника 5. Для этого на нижней линии прямоугольника, на вертикальной оси отмечаем (**ЛМ**) точку. Затем отмечаем левую грань прямоугольника и не отпуская **ЛМ**, потягиваем курсор

вниз. Появляется размерная линия половины прямоугольника. Отпускаем и снова нажимаем ЛМ. В возникающем меню редактирования размера вписываем 200 мм. Закрываем это меню.



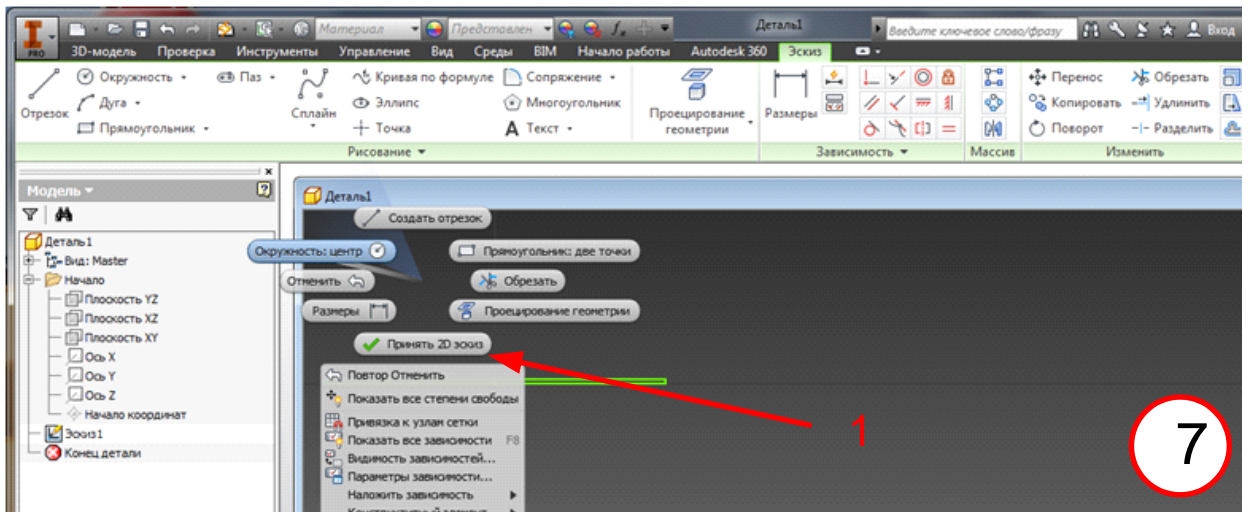


Точно также устанавливаем толщину полки – 5 мм, как указано на рис 6 – 1, 2, 3. Эскиз 1-й детали закончен. Теперь необходимо убрать все размерные линии. Для этого выходим из всех меню, нажав **Esc**. Затем подводим курсор к размерной линии 4, нажимаем **ЛМ** и **Delete**.

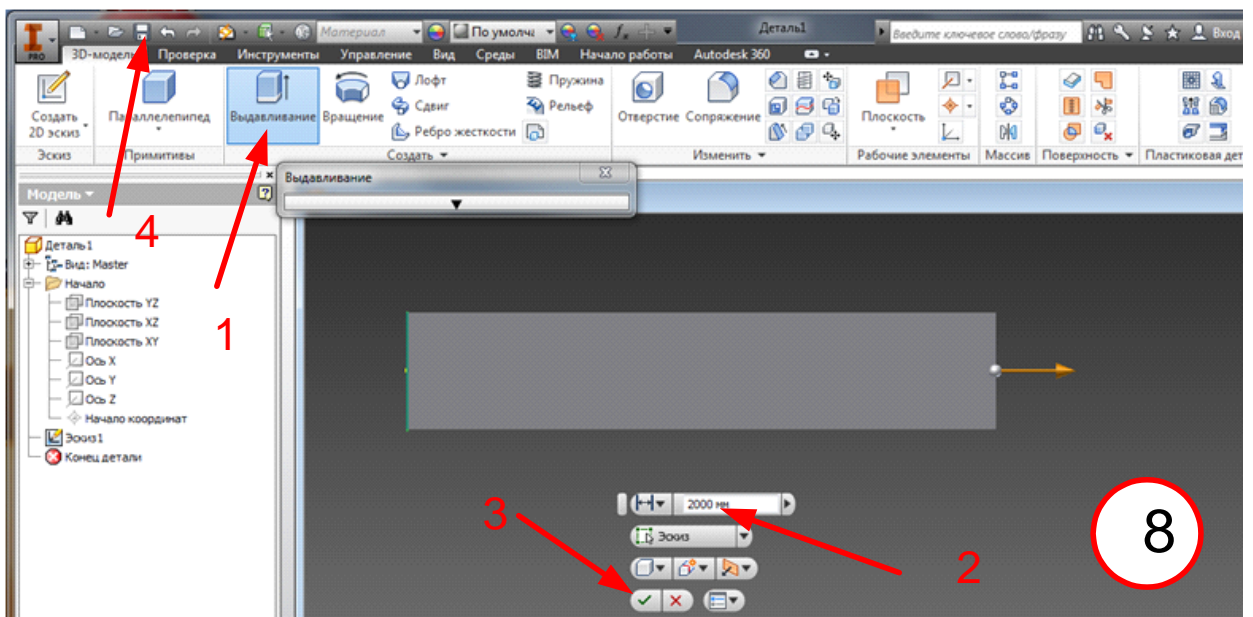


Завершаем работу с эскизом, нажав **ПМ** и в всплывающем меню нажимаем **Принять 2D эскиз** (рис. 7, 1).



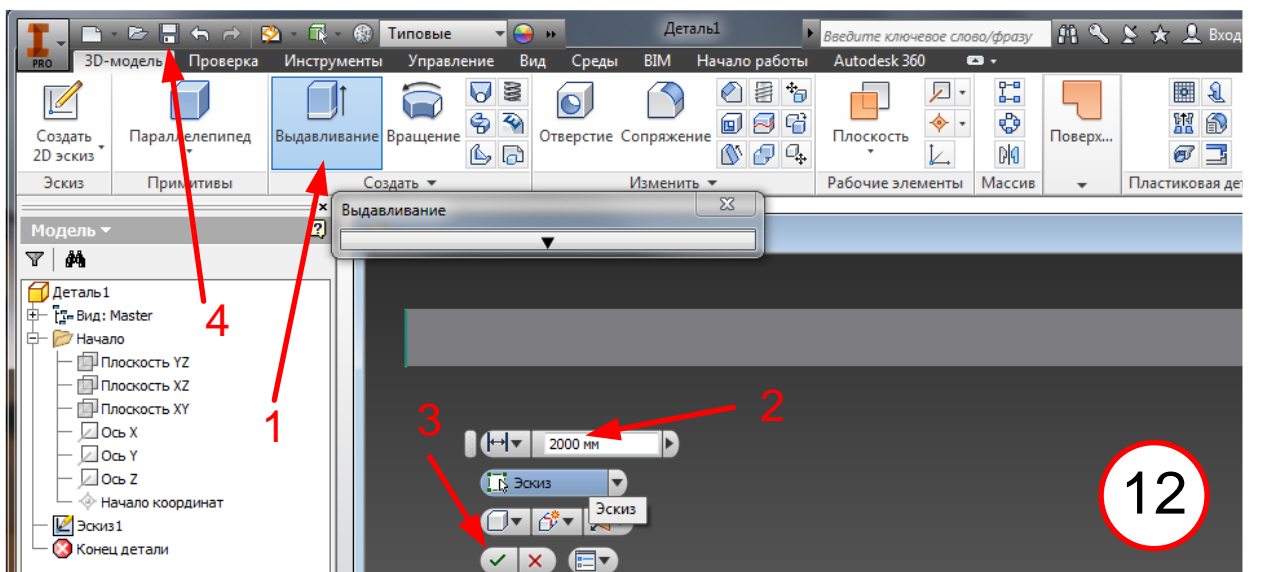
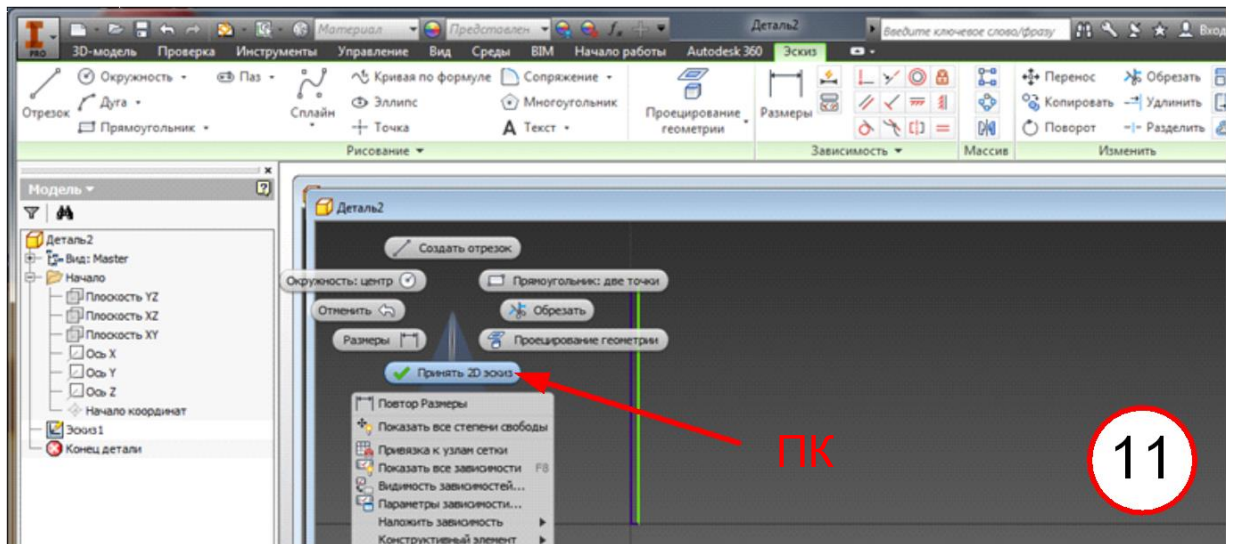
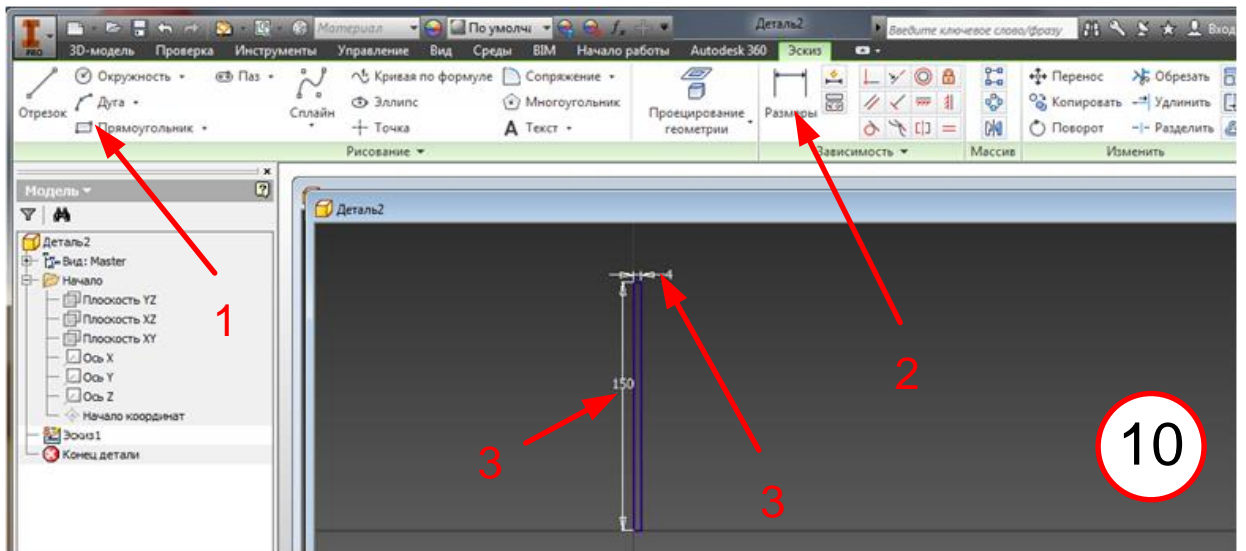


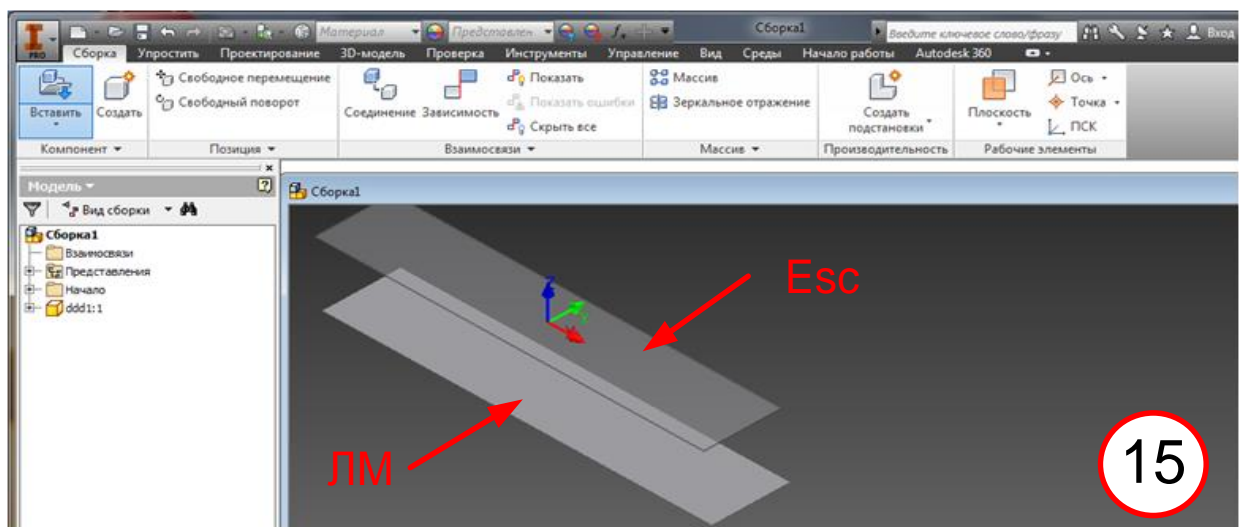
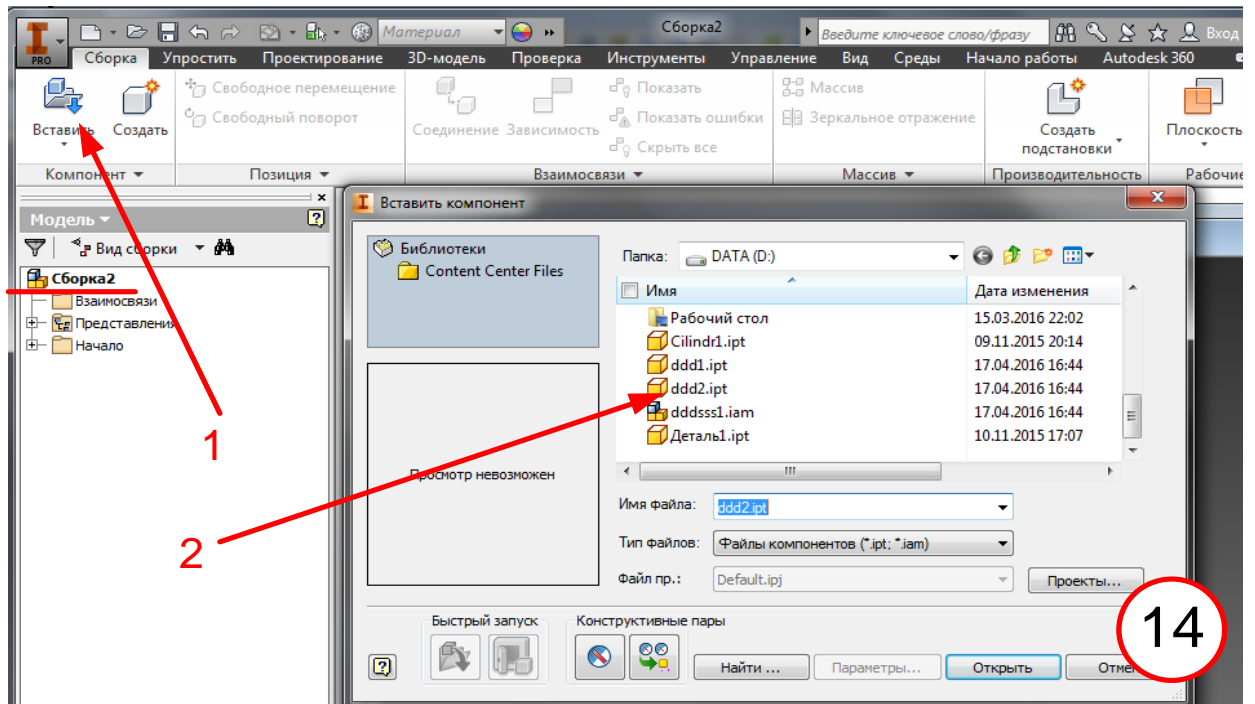
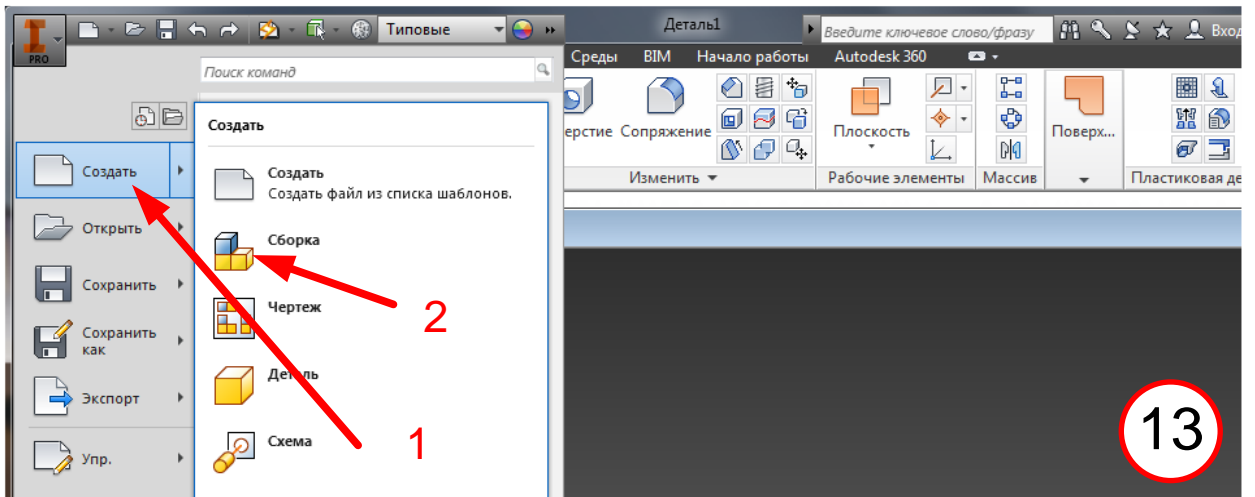
Появляется лента меню работы с объектами **8**. Выбираем **Выдавливание** **1** и, установив длину полки **2000 мм** **2**, подтверждаем нажатием **3**. Формирование геометрии детали **1** закончено. Запоминаем результат под каким-либо именем **4**.

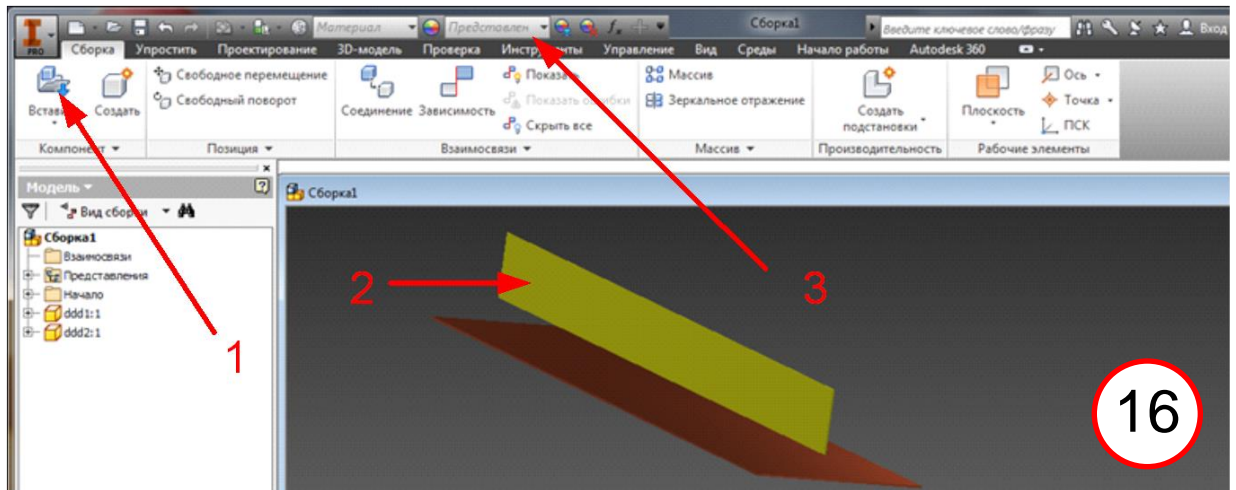


Теперь формируем геометрию 2-й детали. Повторяем пункты рисунков **2**, **3**, **4**. Только теперь рисуем вертикальную стенку высотой **150**, толщиной **4 мм** (рис. **10**, **1**, **2**). Затем убираем размерные линии (**3**). Завершаем работу с эскизом (рис. **11**) и выдавливаем объект на **2000 мм** (рис. **12**, **1**, **2**, **3**). Запоминаем эту деталь под каким-либо именем **4**.

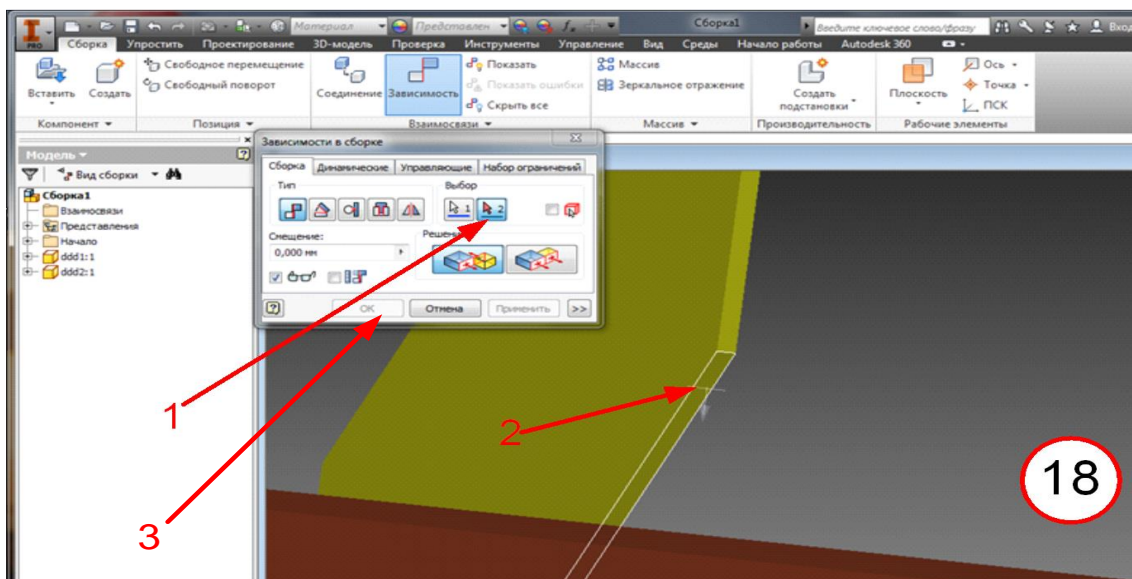
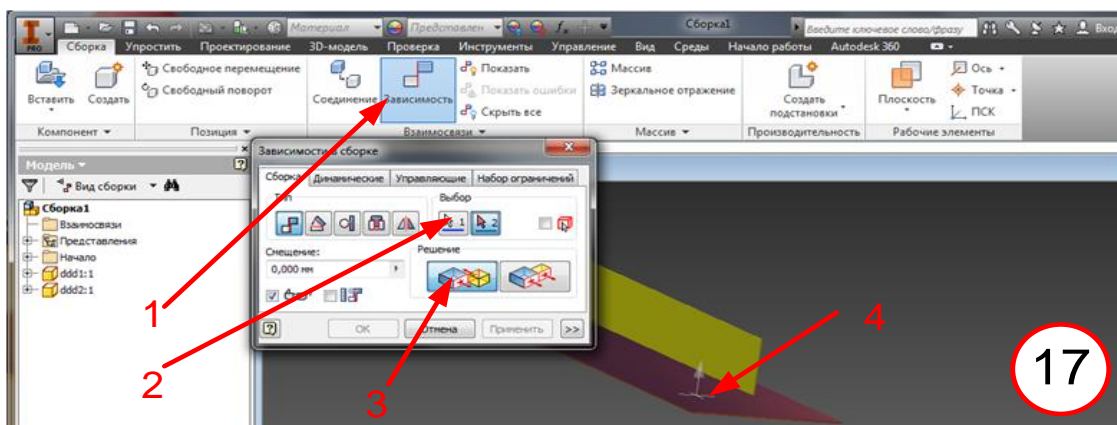
Теперь нужно осуществить сборку двух деталей. Действуем согласно рис. **13** **1**, **2**. В рабочую область загружаем файл первой детали (полка) – **14** **1**, **2**. На экране появляется сама деталь **15**. При сдвиге мышки возникает реплика детали. Ее нужно устранить, нажав **Esc**. Повторим **14** для второй детали – **16** **1**, **2**. Можно выбрать цвета деталей – **3**.



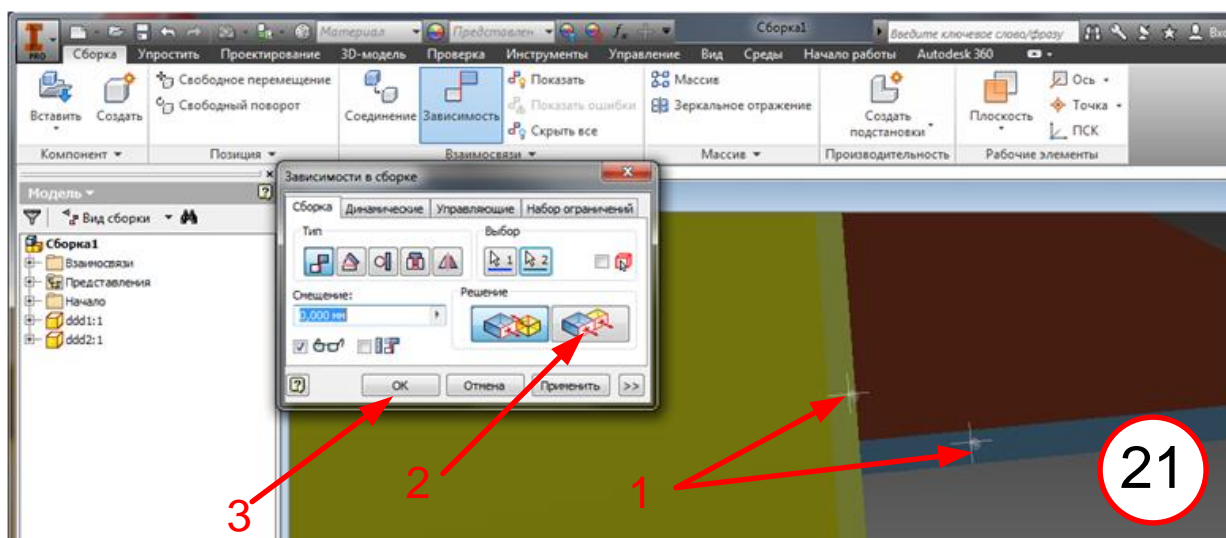
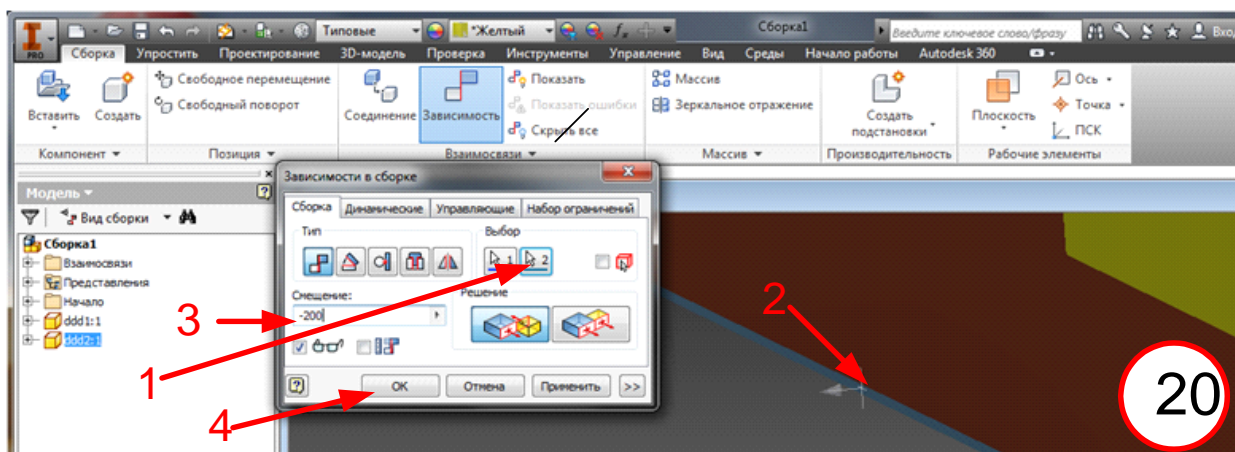
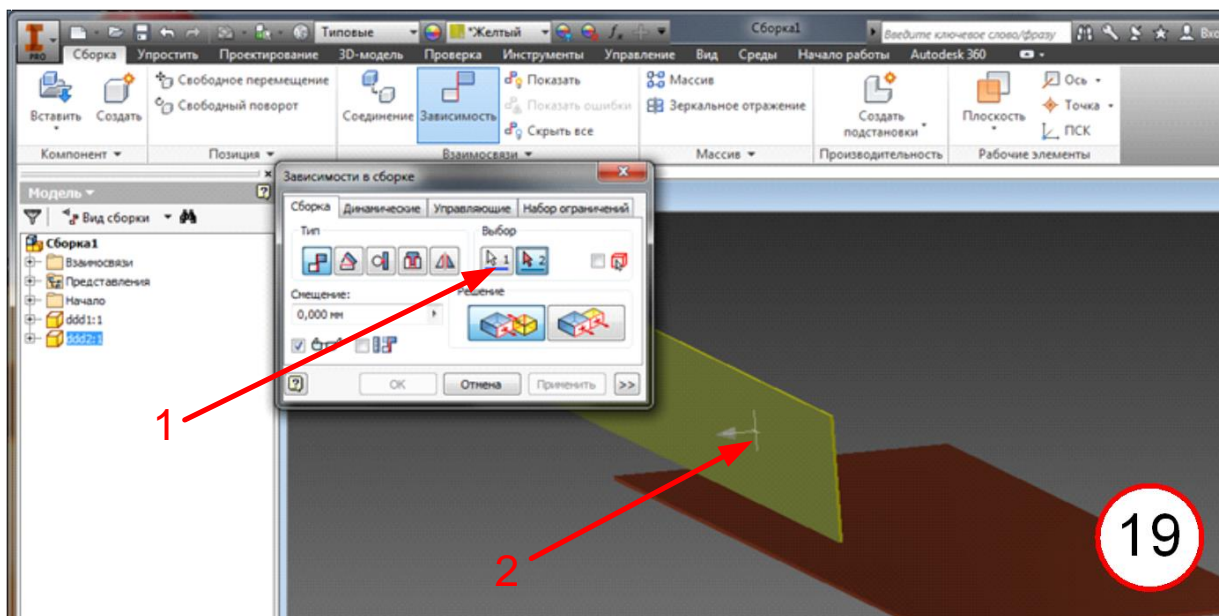




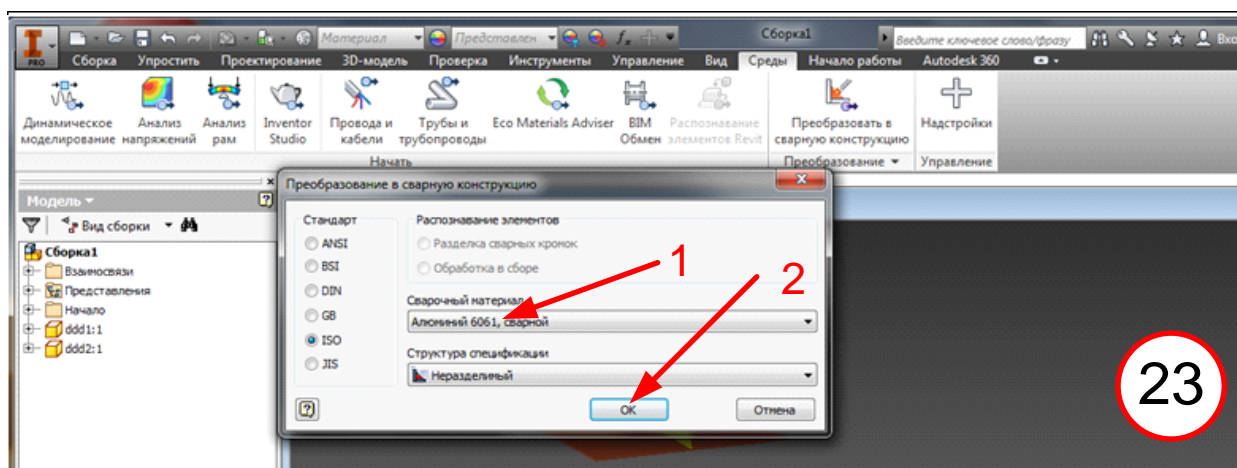
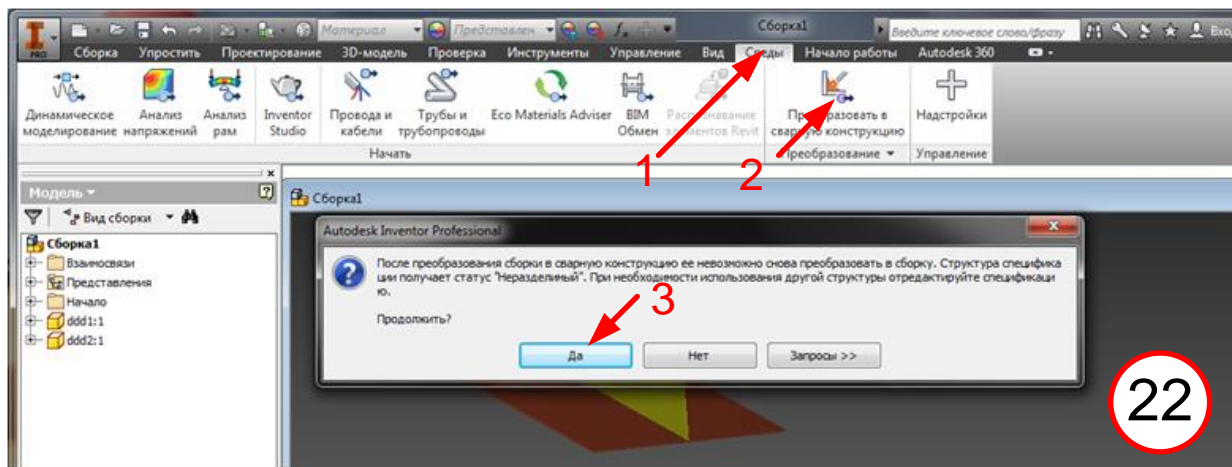
Итак мы вывели обе детали на экран. Теперь необходимо их состыковать. Нажимаем **Зависимость 17 - 1** и во всплывающем меню выбираем первую деталь **2** и курсором устанавливаем значок зависимости на детали **1 4**. Далее отмечаем деталь **2 (18 - 1)** и перемещением курсора устанавливаем его на торце детали **2 (2)**. Деталь **2** автоматически ляжет на деталь **1** своей кромкой. Теперь необходимо сориентировать детали в двух других плоскостях.



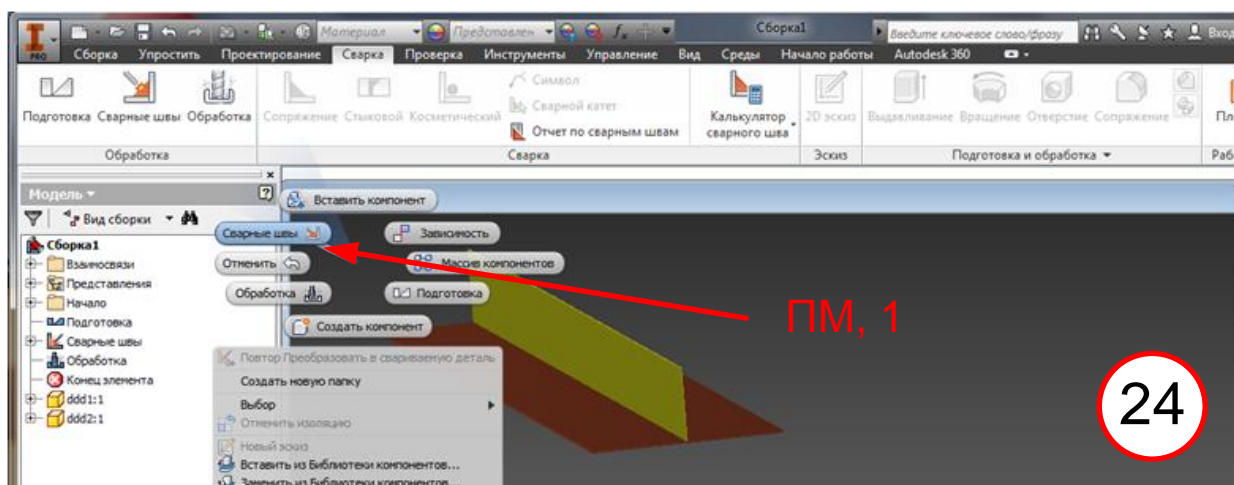
Стенку отмечаем стрелкой сбоку (19, 1,2) и отмечаем кромку полки (20, 1,2). При этом в меню устанавливаем дистанцию, равную -200 мм 3 (центр полки). Затем отмечаем торцы деталей. Только здесь для того, чтобы торцы лежали в одной плоскости необходимо воспользоваться опцией 2 (21, 1, 2, 3).



Итак, детали установлены и состыкованы. Начинаем операцию сварки. В верхнем меню выбираем **(22) Среда 1** и операцию **Преобразовать...** 2, 3. В появившемся меню назначаем в качестве основного металла алюминий (23, 1, 2).

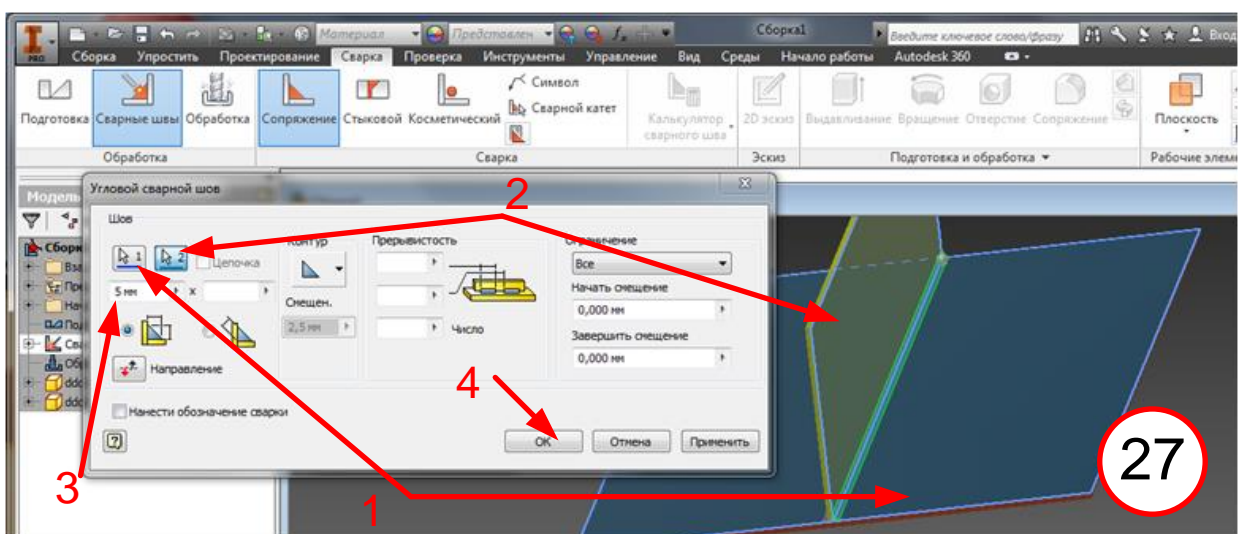
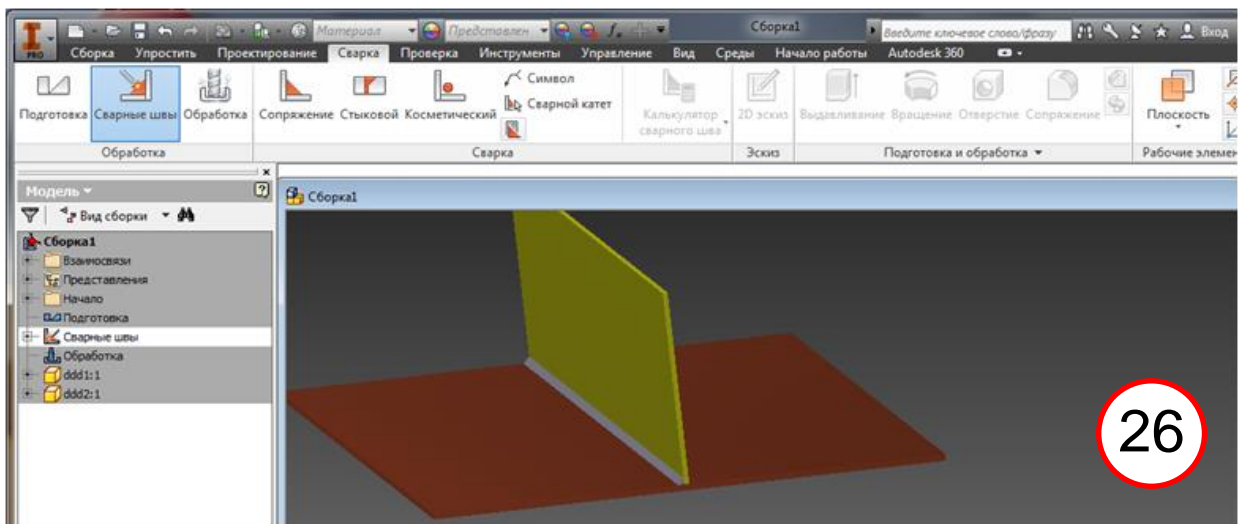
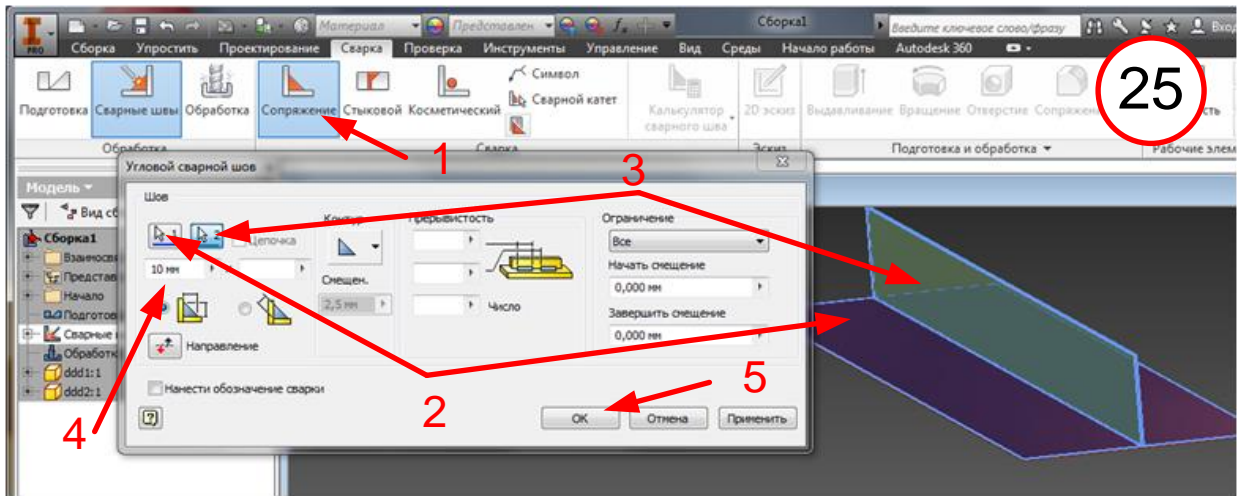


Во всплывающем меню после **ПМ** выбираем **Сварные швы** (24, 1).

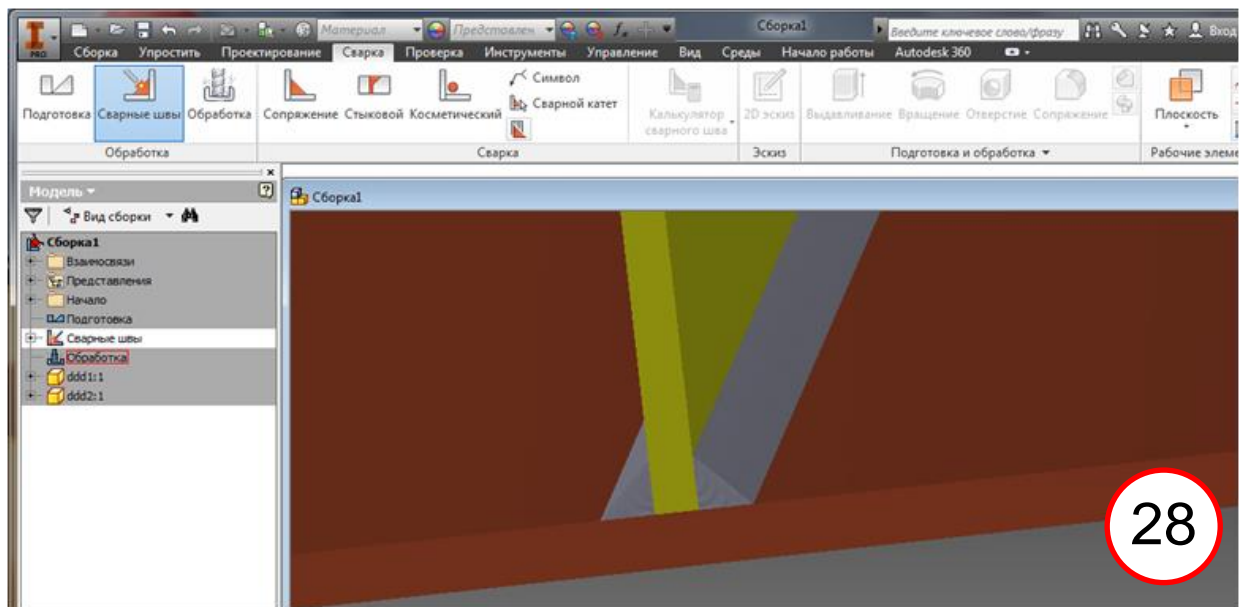


Возникает верхняя лента меню, где выбираем угловые швы (25,1). Во всплывающем меню отмечаем свариваемые детали 1 (2) и 2 (3). Далее устанавлива-

ем катет шва 5 мм (4) и завершаем операцию (5). Создается сварочный шов (26). Повторяем операцию для другой стороны соединения (27).

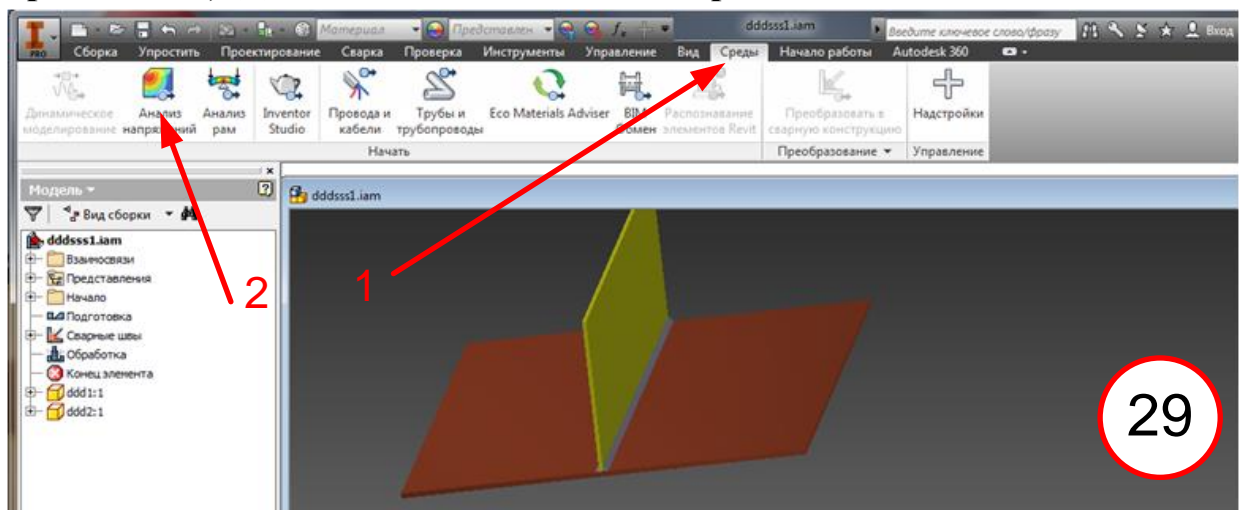


В результате получаем двусторонний угловой шов (28).



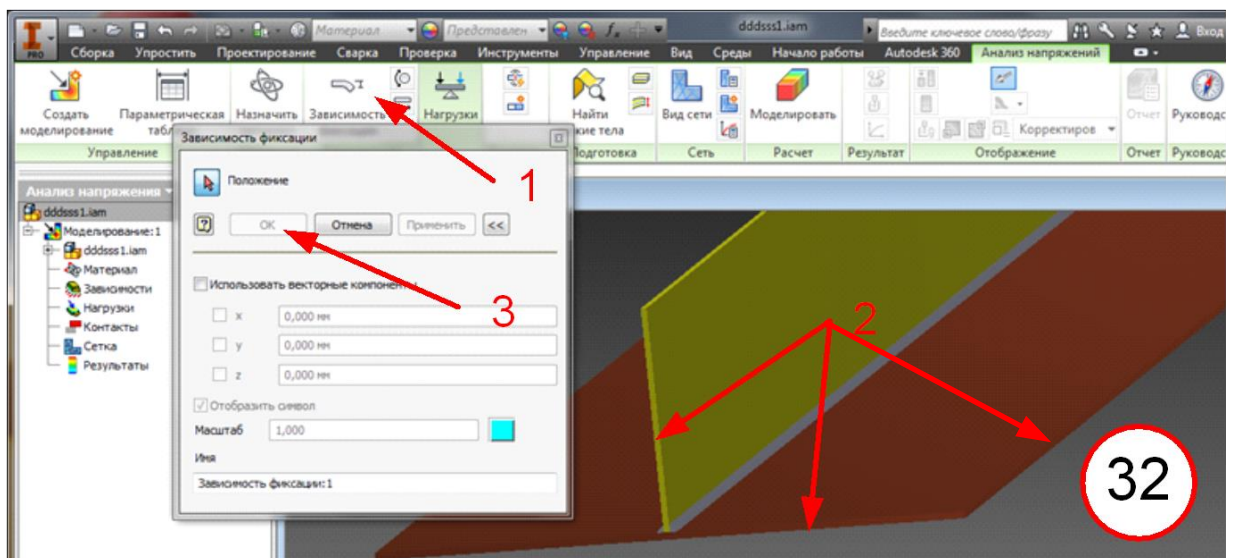
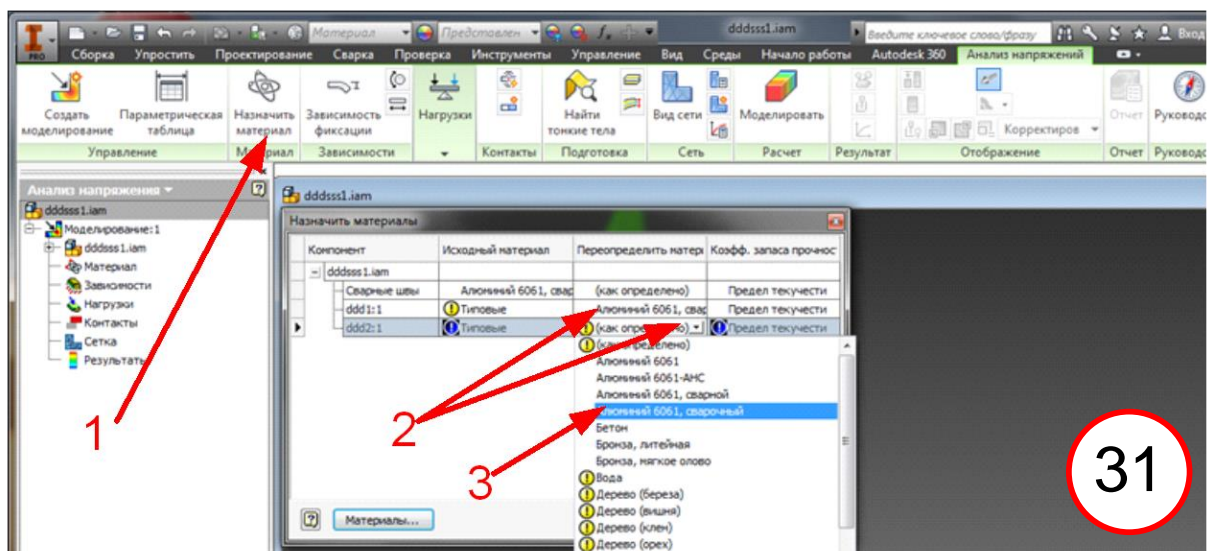
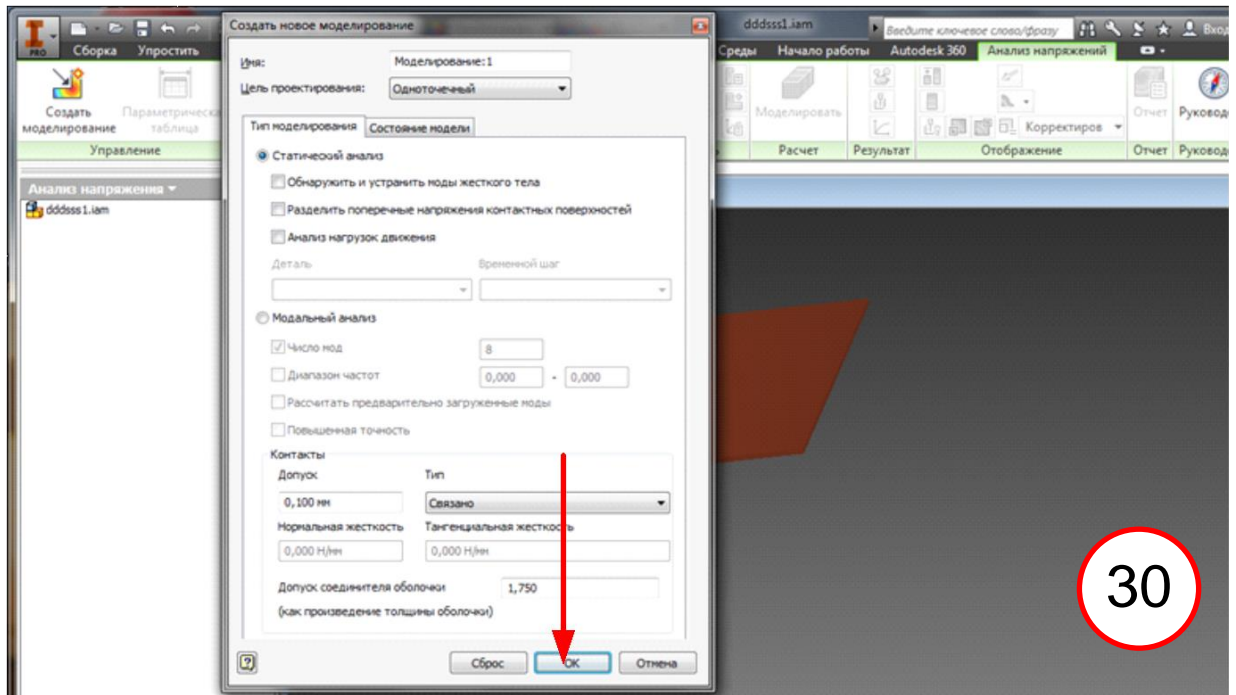
Мы выполнили сварное соединение.

Приступаем к расчету прочности. Опять в верхнем меню выбираем **Среды** (29, 1). Далее нажимаем **Анализ напряжений** (2).

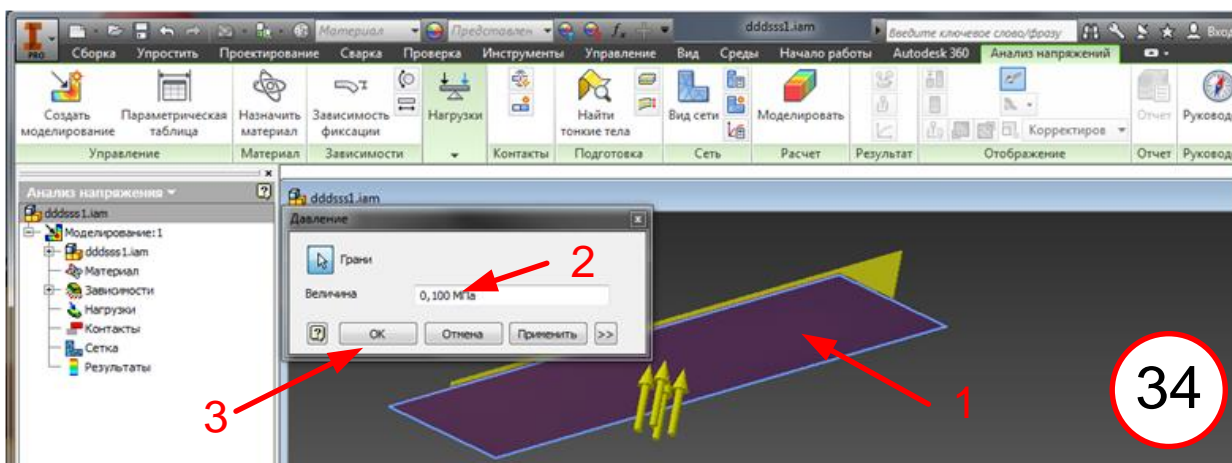
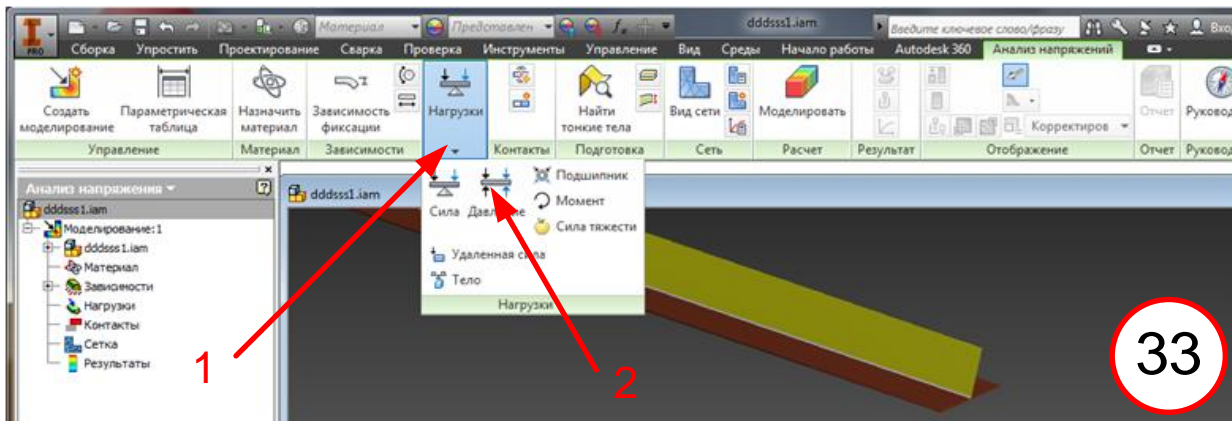


Появляется верхняя лента меню анализа напряжений и всплывает меню с параметрами анализа. Здесь, не вдаваясь в нюансы расчета, нажимаем **ОК** (30). Выбираем **Назначить Материал** (31, 1). Во всплывающем меню Материал шва уже назначен (см. 23). Теперь необходимо определить основной материал для обеих деталей. В данном случае последовательно для первой и второй деталей выбираем **Алюминий сварочный** (2, 3). Теперь необходимо определить граничные условия. В данном примере мы задаем жесткое закрепление по контуру. Это приблизительно соответствует такому случаю, когда рассматриваемая конструкция находится в окружении» более мощных связей. Итак (32, 1, 2, 3). При этом надо понимать, что пункт 3 требует отметить все грани в плоскостях XZ, YZ.

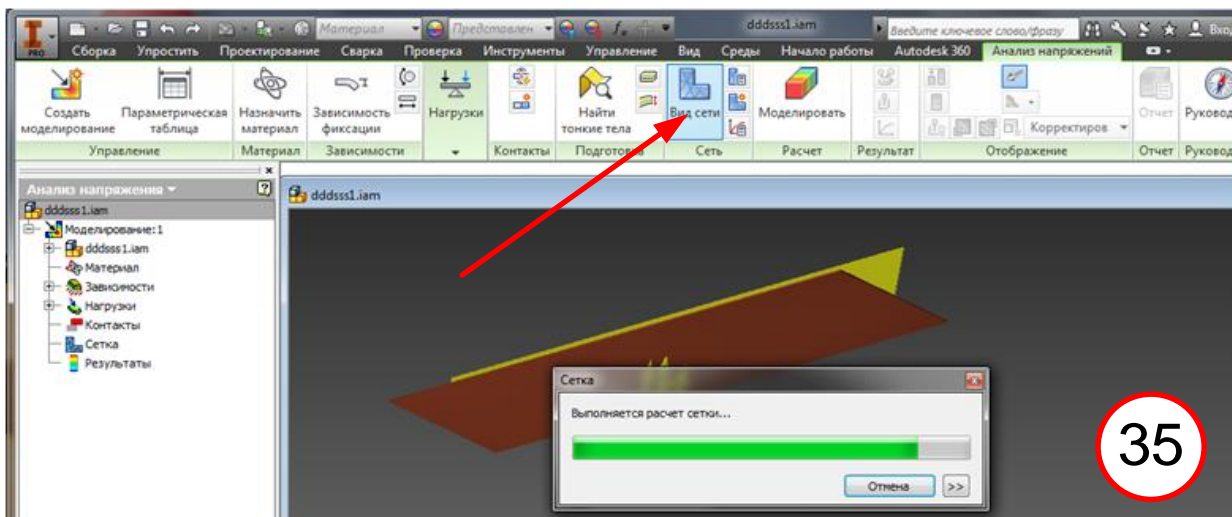




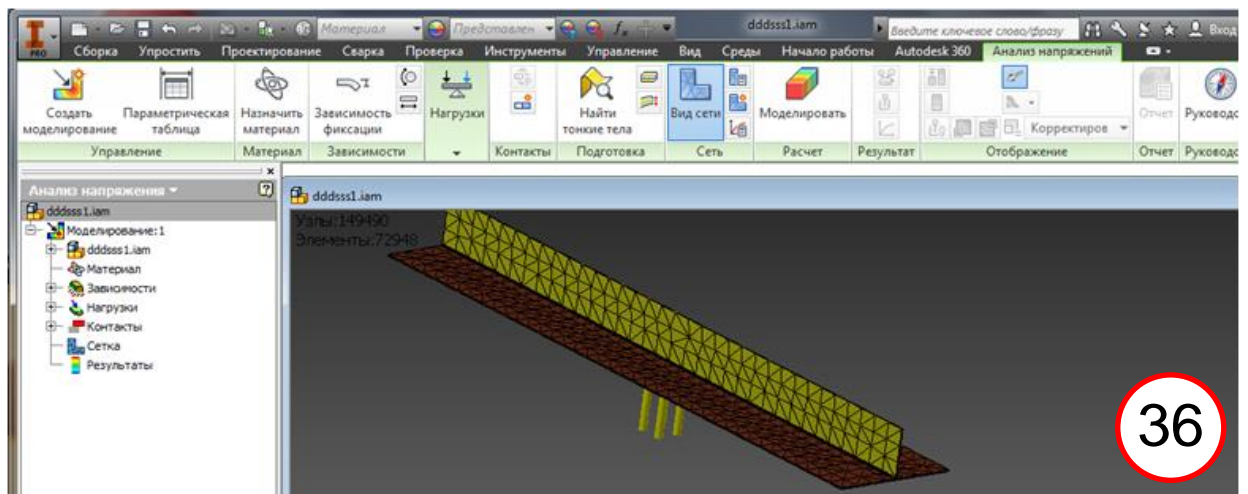
Формируем нагрузки (33, 1, 2). В виде нагрузки задаем внешнее давление (2) интенсивностью 0.1 МПа на нижней поверхности полки (34, 1, 2, 3)



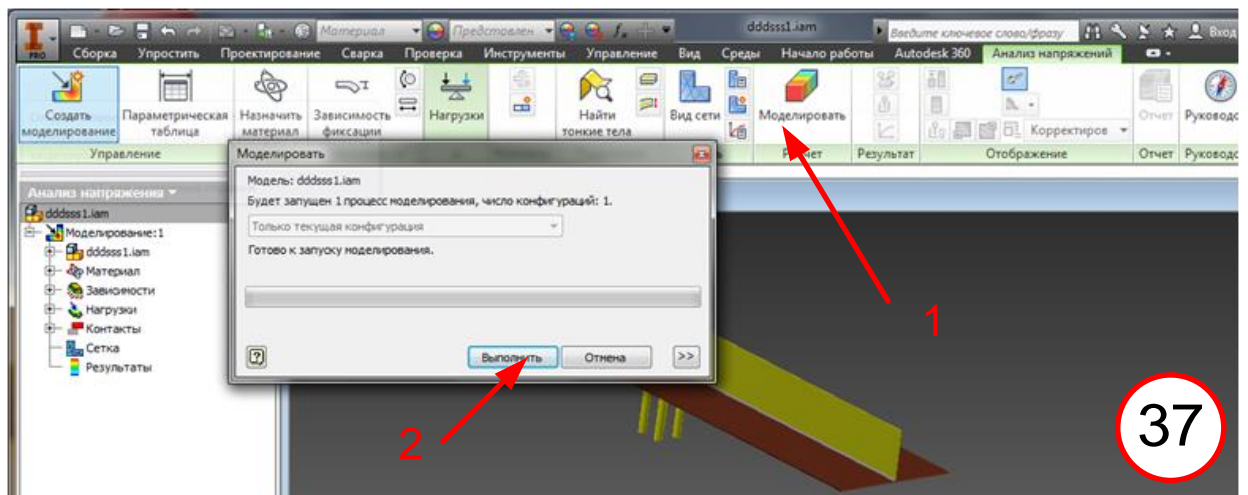
Все проблемы, связанные с геометрией, материалом, закреплением, нагрузкой решены. Приступаем к разбиению геометрии на конечные элементы. Для этого инициируем автоматическое разбиение на КЭ (35).



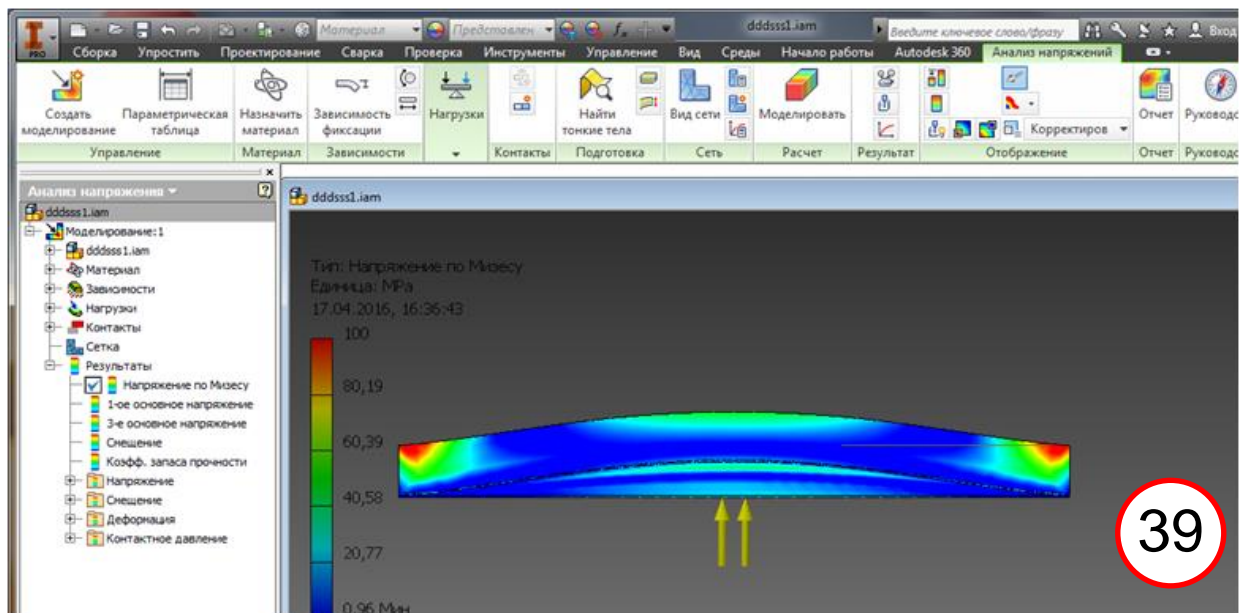
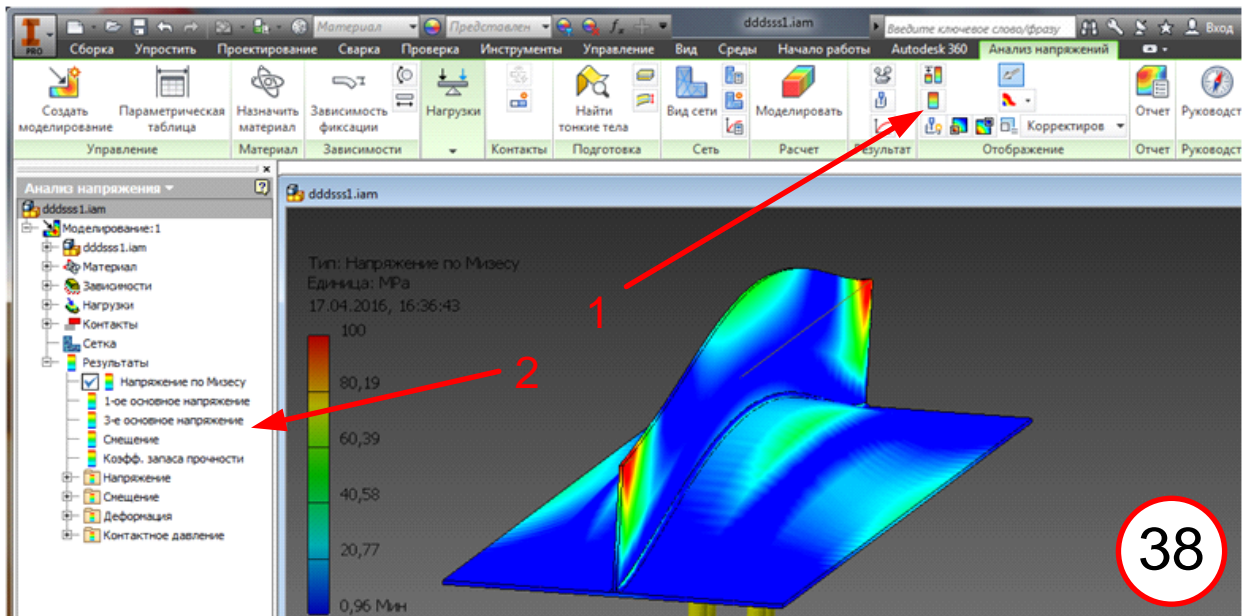
Разбиение на КЭ осуществлено. Вид сетки КЭ представлен на рис 36.



Отправляем задачу на расчет (37, 1, 2).



Интенсивность напряжений в результате расчета дана на рис. 38, 39. Перемещения представлены в утрированном масштабе. Рис. 38 – изометрия, 39 – вид сбоку. Возможна коррекция изображения напряжений (38, 1). Представление компонент напряжений и деформаций производится с помощью меню 38, 2.



## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

5.1. Титульный лист.

5.2. Реферат.

5.3. Теоретические основы расчета МКЭ напряженно-деформированного состояния сварных конструкций.

5.4. Вариант задания с представлением чертежа пластины с разбиением на КЭ.

5.5. Результаты расчета по пункту 4.9.

5.6. Анализ напряженно-деформированного состояния по результатам расчета.

5.7. Анализ остаточных сварочных напряжений и деформаций, рассчитанных МКЭ.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. В чем смысл МКЭ?

6.2. Каковы основные этапы расчета конструкций МКЭ?

6.3. Каковы достоинства и недостатки расчета МКЭ сварочных напряжений и деформаций.

Литература.

1. А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. ANSYS для инженеров. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.

## КУРСОВАЯ РАБОТА

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение размеров и формы сварной конструкции в некоторых случаях снижает ее работоспособность и портит ее внешний вид. Если остаточные деформации достигают заметной величины они могут привести к неисправимому браку. При разработке, технологии сборки и сварки конструкции следует учитывать необходимость снижения остаточных деформаций до величины, при которой они не отражаются на работоспособности и внешнем виде конструкции и не затрудняют сборку отдельных элементов. Если величина остаточных деформаций выходит за допускаемые пределы, следует проводить правку конструкции. Правка конструкции является весьма трудоемкой операцией, требует высокой квалификации рабочих.

Исходя из выше изложенного – количественная оценка ожидаемых сварочных деформаций – важный этап производства сварных конструкций. Знание величины и характера ожидаемых сварочных деформаций позволяет еще на стадии проектирования сварной конструкции вносить соответствующие изменения, направленные на обеспечение требуемой точности. Не менее важно оценить сварочные деформации при проектировании технологического процесса изготовления сварной конструкции, так как на основе такой оценки производится выбор метода снижения сварочных деформаций и назначаются соответствующая технологическая оснастка, а также обоснованные технологические припуски заготовок.

### 1. ЦЕЛЬ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Дальнейшее закрепление и расширение знаний полученных студентами в процессе изучения теоретического курса. Задачей работы является приобретение практических навыков в инженерно-технологической работе при определении ожидаемых остаточных деформаций сварных конструкций, расчете их основных параметров, а также при расчете режимов и технологии сварки различных материалов.

1.1. При выполнении работы студент должен выбрать в зависимости от задания способ сварки или резки. В соответствии с выбранным способом студенту необходимо определить тип оборудования. При этом для правильной эксплуатации требуется учитывать ряд критериев связанных с техническими и эксплуатационными характеристиками.

1.2. Срок выдачи задания студентам дневного отделения 3-4 неделя после начала семестра.

1.3. Срок окончания работы и его защита четвертый месяц соответствующего семестра.

### 2. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ

2.1. Курсовая работа должна содержать следующие главы:

Описание конструкции из заданного материала (химические, физические и механические свойства);

Выбор режимов сварки (форма разделки кромок, количество проходов и режимы сварки);

Причины возникновения остаточных сварочных деформаций и классификация остаточных сварочных деформаций;

Расчет и построение эпюры продольных сварочных деформаций;

Расчет продольных сварочных деформаций;

Расчет поперечных сварочных деформаций;

Расчет общих сварочных деформаций;

Мероприятия по уменьшению остаточных сварочных деформаций и напряжений.

2.2. Работа должна быть представлена расчетно-пояснительной запиской объемом не менее 20-25 стр., в которой должно быть отражены все вопросы п.2.1.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Во введении необходимо подробно описать заданную конструкцию, объяснить причины вызывающие деформации и напряжения сварных конструкций, дать классификацию сварочных деформаций и напряжений.

3.2. Для расчетного определения ожидаемых сварочных деформаций сварной конструкции необходимо знать механические и теплофизические свойства материала.

3.3. Выбор режима сварки.

Технологию сварки и сборки конструкции следует разрабатывать с учетом обеспечения минимальной величины сварочных напряжений, и там, где это диктуется условиями работы конструкции, предусматривать снятие этих напряжений. При этом следует учитывать, что снятие сварочных напряжений – весьма трудоемкая и сложная операция, и к ней следует прибегать только при действительной, технически обоснованной необходимости. Если значения сварочных напряжений достигнут предела текучести металла, они вызовут его пластическую деформацию, а следовательно, и изменения размеров и формы свариваемой конструкции, т.е. ее деформацию (коробление).

В соответствии с ОСТ 5.9083–83 «Корпуса стальных судов. Сварка углеродистых и низколегированных сталей» в работе необходимо выбрать способ сварки, род тока, полярность, положение при сварке. Геометрические размеры формы подготовки кромок, а также режимы сварки привести в таблице.

3.4. Построение эпюры продольных деформаций.

Для построения эпюры продольных деформаций необходимо пользоваться методом Г.А. Николаева.

При этом принимается:

гипотеза плоских сечений, устанавливающая, что поперечные сечения пластин в процессе сварки не искривляются;

гипотеза одноосных напряжений, согласно которой в свариваемых пластинах возникают лишь напряжения  $\sigma_x$ ;

схематизированная зависимость предела текучести от относительной упругой деформации на уровне предела текучести от температуры;

модель идеально упругопластического тела;

независимость теплофизических свойств металла от температуры в широком интервале температур;

равномерность распределения температур, деформаций и напряжений по толщине пластины.

Цель метода – определение параметров  $\varepsilon_{пол}^{ост}$ ,  $b_{п,у}^*$ , которые позволяют построить эпюру остаточных упругих  $\varepsilon_{упр}^{ост}$  деформаций (напряжений) в поперечном сечении сварного стыкового соединения. Чтобы определить указанные параметры, необходимо рассмотреть продольные деформации в поперечном сечении на двух стадиях – нагрева и в остаточном состоянии после полного охлаждения. В каком именно поперечном сечении по длине соединения рассматривать деформации после охлаждения – не имеет значения, поскольку считается, что все поперечные сечения в смысле напряженно-деформированного состояния одинаковы. Что же касается стадии нагрева, то в этом состоянии далеко не безразлично, какое поперечное сечение необходимо рассматривать. Г.А. Николаев предлагает рас-

смагивать деформации в поперечном сечении, в котором при нагреве в процессе движения источника тепла достигается максимальная ширина изотермы 600 °С.

**Исходные данные:**

№	Материал	Спрс об сварки	Предел текучести $\sigma_{0.2}$ , МПа	Модуль упругости E, Мпа	Ширина пластины В, см	Толщина пластины s, см	I, А	U, V	V, м/час
1	Вст3сп	Аф	250	200000	10	2	110	20	18
2	X18H9T	РД	385	130000	10	2	110	20	10
3	АМг6	МП	350	100000	10	2	100	20	16
4	ОЦС 6-6-3	Г	100	160000	10	2			10
5	Вст3сп	РД	250	200000	20	2	120	23	16
6	X18H9T	МП	360	150000	20	2	120	23	18
7	АМг6	Аф	350	90000	20	2	120	23	19
8	ОЦС 6-6-3	РД	100	120000	20	2	100	20	10
9	Вст3сп	МП	250	200000	30	3	160	28	15
10	X18H9T	Аф	300	140000	30	3	160	28	21
11	АМг6	РД	350	90000	30	3	120	25	12
12	ОЦС 6-6-3	Аф	100	130000	30	3	160	28	22
13	Вст3сп	МП	250	200000	40	4	200	30	22
14	X18H9T	МП	380	140000	40	4	200	30	21
15	Вст3сп	МП	250	200000	50	4	200	30	23
16	X18H9T	Аф	400	110000	50	4	180	25	31
17	АМг6	РД	350	70000	40	5	220	34	15
18	ОЦС 6-6-3	Аф	100	160000	40	5	180	25	28
19	Вст3сп	МП	250	200000	45	5	220	36	23
20	X18H9T	МП	480	150000	45	5	220	34	35

Порядок расчета:

1. Определение ширины зоны пластической деформации:

$$b_{\Pi} = \frac{B\rho}{\rho - \varepsilon_{0.2}},$$

где  $b_{\Pi}$  – ширина зоны пластических деформаций, см;

B – ширина свариваемых пластин, см;

$\varepsilon_{0.2} = \frac{\sigma_{0.2}}{E}$  – деформация соответствующая пределу текучести;

$$\rho = \frac{0.484\alpha q}{2v\delta c\gamma(y_1 + y_2 - 2B)},$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения, 1/°С;

q – мощность источника нагрева, Вт;

v – скорость сварки, см/с;

$\delta$  – толщина свариваемых пластин, см;

$c\gamma$  – объемная теплоемкость, Дж/(см<sup>3</sup>·°С);

$y_1 = \frac{0.484q}{2v\delta c\gamma 600}$  – расстояние от оси шва до точки, на котором есть только пластические

деформации сжатия, см;



$y_2 = \frac{0.484q}{2\nu\delta\sigma_0} -$  расстояние от оси шва, где температура равна 500 °С.

3.5. Нахождение полной остаточной деформации сварного соединения:

$$\varepsilon_{ост}^{non} \approx -\frac{\varepsilon_{0.2} b_n}{B - b_n}$$

Расстояние от оси шва, на котором остаточные упругие деформации достигают уровня пластических деформаций:

$$y_* \approx \frac{\varepsilon_{0.2} (b_n - y_1)}{\varepsilon_{ост}^{non} - \alpha 600} + b_n, \text{ см.}$$

3.6. Расчет общих сварочных деформаций сварной конструкции.

Расчет общих сварочных деформаций необходимо произвести по методике С.А. Кузьмина.

В расчете приняты следующие допущения:

сечения при деформации конструкции от сварки всегда остаются плоскими;  
соотношение между размерами конструкции таково, что при сварке она работает в условиях плоского изгиба без выпучивания или скручивания;  
величина укорочения сварного соединения не зависит от направления сварки;  
деформация в продольном направлении не влияет на деформацию в поперечном направлении и наоборот;  
на деформацию конструкции не влияет ее кривизна.

Исходные данные:

Материал; I; U; V;  $\delta$ ; способ сварки;  $\sigma_{0.2}$ ; B; E.

Порядок расчета:

Приварка набора вызывает укорочение конструкции в продольном и поперечном направлениях, а также изгиб конструкции (но изгиб в процессе сварки не возникает вследствие закрепления).

Деформация всей конструкции в продольном направлении от всех швов будет такой же, как деформация в продольном направлении одного ребра с пояском от одного шва. Рассмотрим ребро с пояском. Ширина пояса принимается меньшему из значений  $a$ ,  $50\delta$ ,  $L/6$ . В данном случае принимаем  $b = L/6$  – ширина пояса.

Момент инерции относительно центральной оси:

$$J_0 = J_{x1} + J_{x2} + a_1 A_1 + a_2 A_2, \text{ см}^4$$

$D = \frac{1}{F} + \frac{z_c^2}{J_0}$ ,  $1/\text{см}^2$  – параметр, характеризующий податливость конструкции на внецентренное сжатие.

3.7. Определение продольного укорочения.

Объем продольного укорочения определяется совместно для набора и полотнища, т.к. условия охлаждения и толщины свариваемых элементов одинаковы.

$$\sqrt{\chi} = \sqrt{\frac{\chi\delta}{\delta}}, \text{ 1/см} - \text{ для полотнища и ребра, т.к. их толщины одинаковы.}$$

Безразмерный критерий процесса пластических деформаций при сварке конструкции конечной жесткости

$$\Omega_1 = \frac{\alpha}{c\gamma} \cdot \frac{q_n}{\varepsilon_s} k_{\chi\delta} D_1$$

По рис. 1 определяется коэффициент, учитывающий влияние податливости конструкции на площадь пластических деформаций и ширину зоны пластических деформаций в случае сварки тонколистовых конструкций  $k_{v1}$  для рассчитанного значения  $\Omega_1$ .

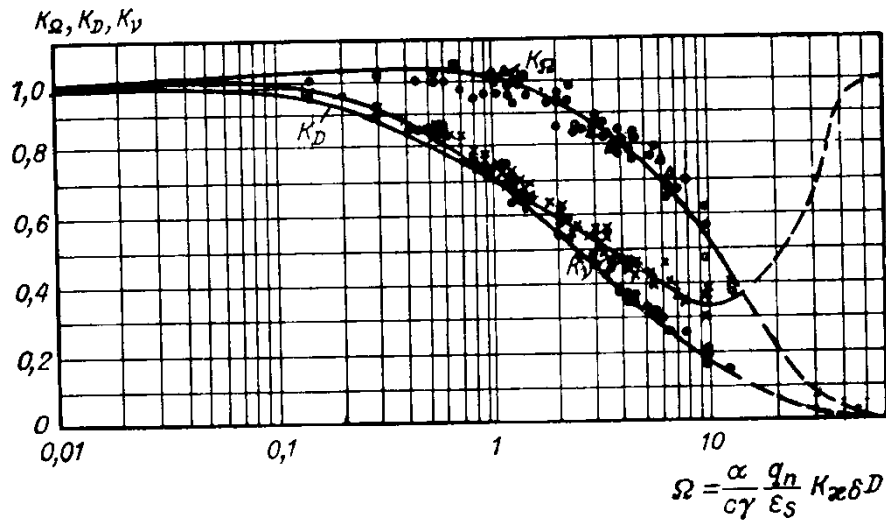


Рис. 1. Определение коэффициентов  $k_{\Omega}$ ,  $k_D$  и  $k_{\gamma}$ , учитывающих влияние жесткости свариваемых элементов на продольное укорочение сварного соединения  $O - k_{\Omega}$ ;  $x - k_D$ ;  $\bullet - k_{\gamma}$ ;  $\Delta -$  экспериментальные точки  $k_{\Omega}$ .

$$X_1 = \frac{\alpha}{c\gamma} \cdot \frac{q_n}{\sum \delta} \cdot \frac{k_{v1}}{\varepsilon_s} \sqrt{\chi}$$

По кривой рис. 2 для  $X_1$  определяется значение  $k_{\chi 1}$ .

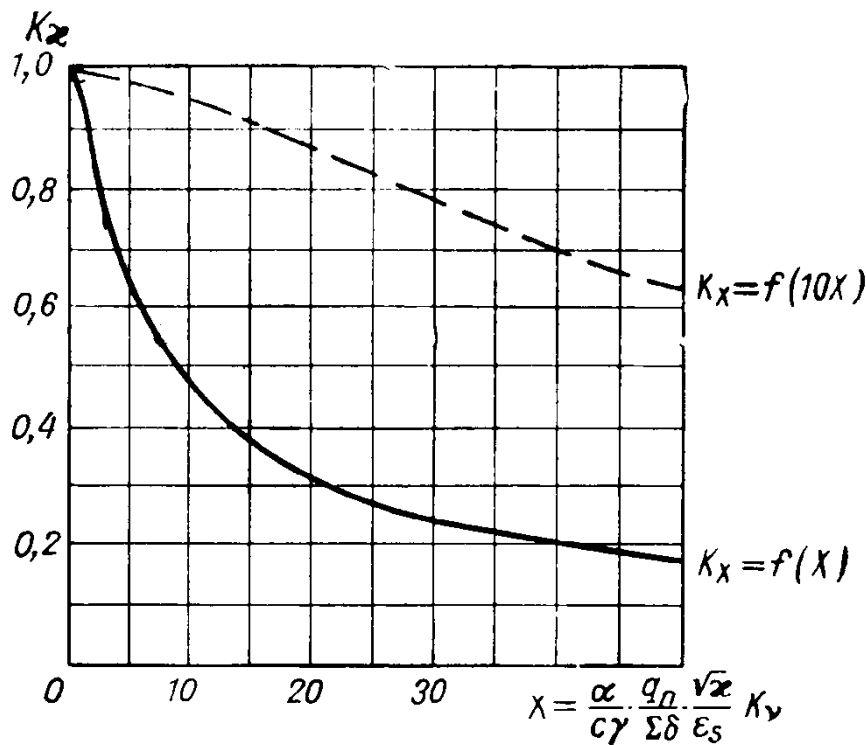


Рис. 2. Определение коэффициента  $k_\chi$  в зависимости от  $X_l = \frac{\alpha}{c\gamma} \cdot \frac{q_n}{\sum \delta} \cdot \frac{k_{vl}}{\varepsilon_s} \sqrt{\chi}$ .

$$Y_l = \frac{\alpha}{c\gamma} \cdot \frac{q_n}{\sum \delta} \cdot \frac{k_{vl}}{\varepsilon_s}$$

По кривой рис. 3 для  $Y_l$  определяется значение  $k_{\chi\delta}$ .

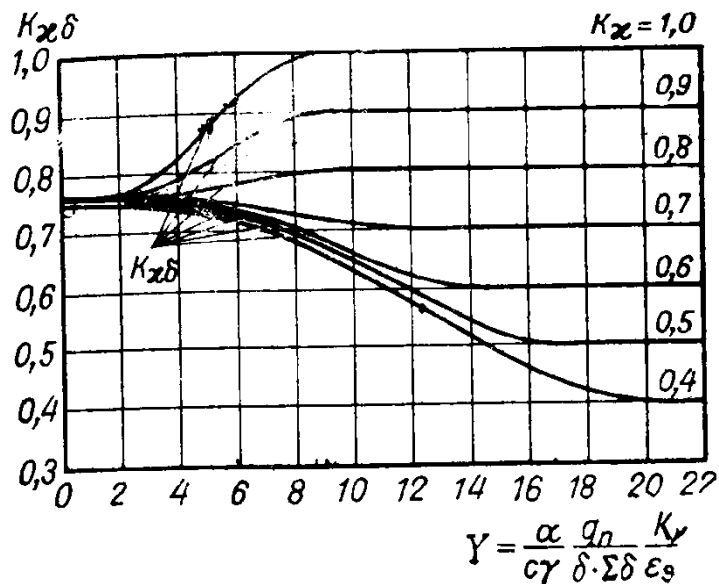


Рис. 3. Определение коэффициента  $k_{\chi\delta}$ .

Принятое значение  $k_{\chi\delta}$  равно расчетному:  $k_{\chi\delta} = 0,85$ .

$$v_b = 0.335 \frac{\alpha}{c\gamma} q_n k_{\chi b} k_{\sigma} \quad , \text{ см}^2;$$

$$V = v \cdot l_{ш} \quad , \text{ см}^3.$$

3.8. Определение объема поперечного укорочения из условия сварки.

$k_{и} = k_{ж} = k_{\sigma} = 1$ ;  $k_{\mu} = k_{\phi} = 0$  – из условия сварки.

По кривым рис. 4 для заданных  $\delta_p$  и  $\delta_n$  определяется  $k_n$ .

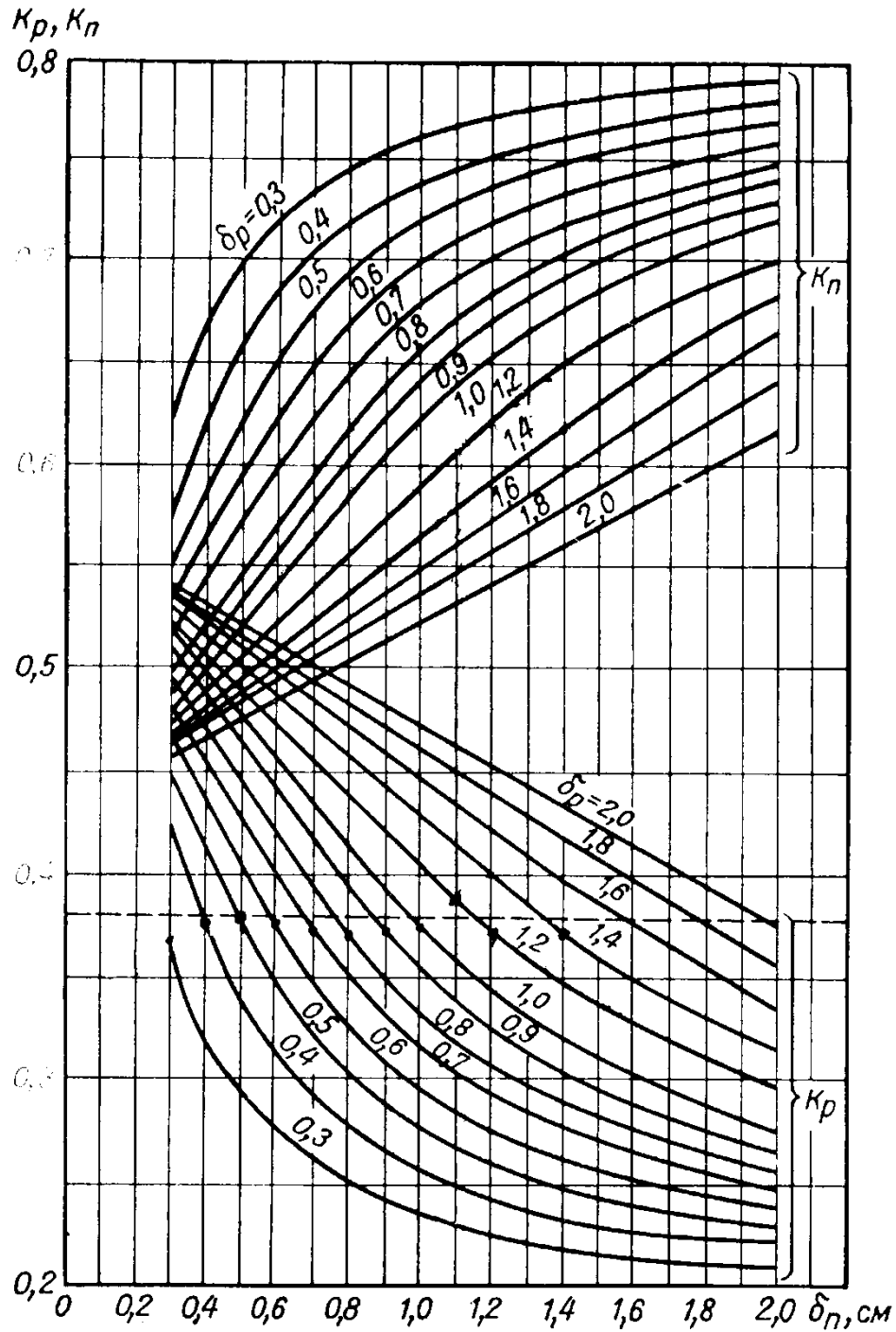


Рис. 4. Определение коэффициентов  $k_n$  и  $k_p$  при приварке набора к полотнищу  $\delta_p$  – толщина ребра, см;  $\delta_n$  – толщина полотнища, см.

По кривым рис. 5 для значения  $\frac{I}{d_s}$  А/мм определяется  $\psi_0$ .

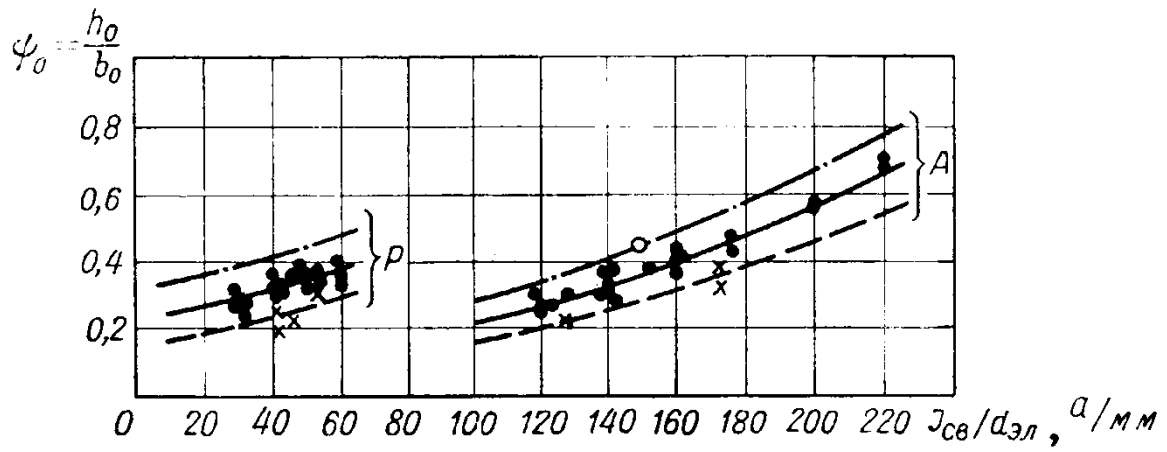


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $\psi_0 = \frac{h_0}{b_0}$  от  $\frac{I_{cs}}{d_{эл}}$  при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

$P$  – ручная сварка;  $A$  – автоматическая сварка под флюсом.  
 $o$  – короткая дуга;  $\bullet$  – нормальная дуга;  $x$  – удлиненная дуга

$$\varepsilon_3 = \frac{q_{n.n.} k_n V_{cs}^2}{\lambda T_0 a}$$

По кривым рис. 6 для рассчитанного значения  $\varepsilon_3$  определяется  $\eta_0$ .

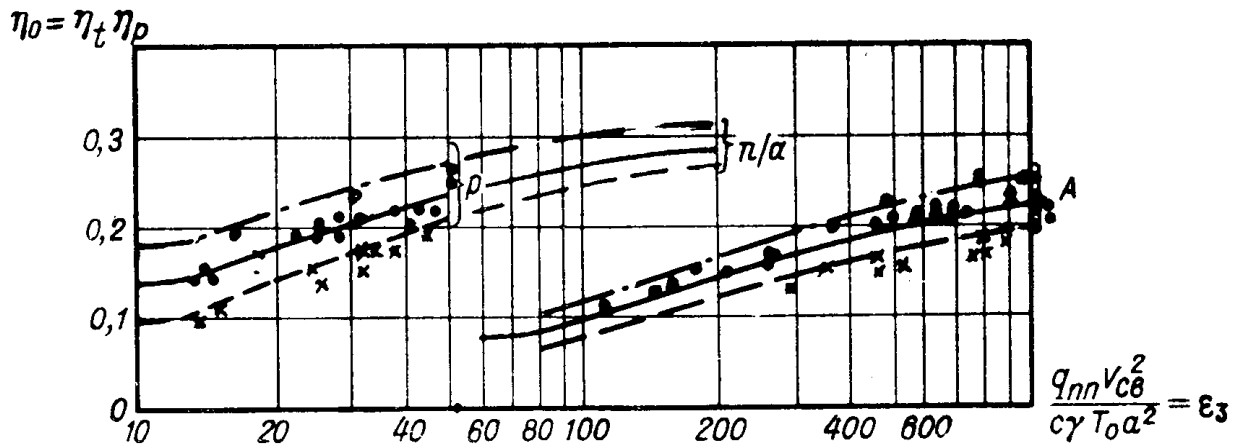


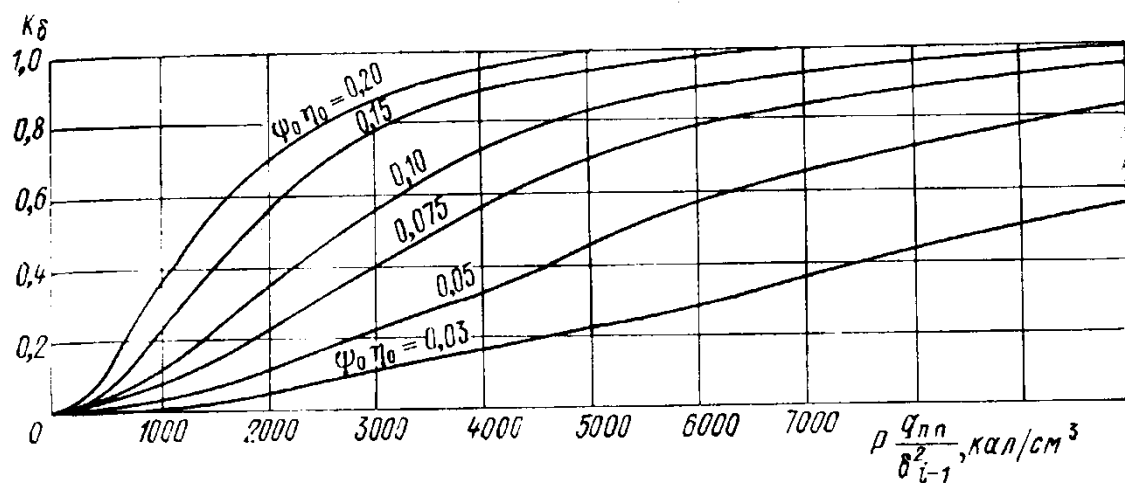
Рис. 6. Зависимость  $\eta_0 = \eta_p \eta_t$  от  $\varepsilon_3 = \frac{q_{n.n.} V_{cs}^2}{\lambda T_0 a}$

$P$  – ручная сварка;  $A$  – автоматическая сварка под флюсом;  $o$  – короткая дуга;  $\bullet$  – нормальная дуга;  $x$  – удлиненная дуга.

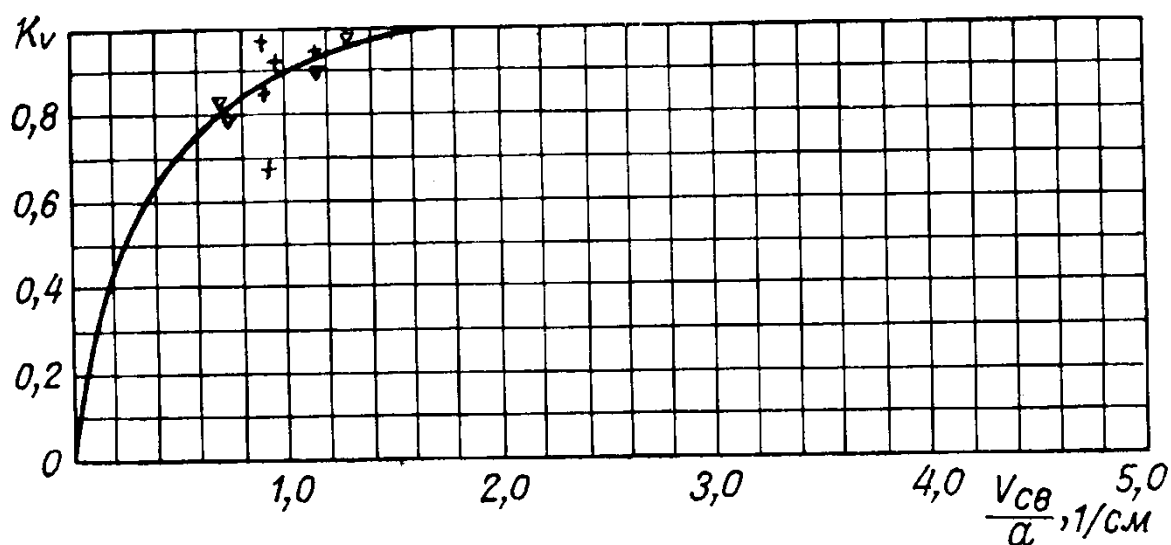
$$p \frac{q_{nn} k_n}{\delta^2}, \text{ кал/см}^3$$

По рис. 7 для отношения  $p \frac{q_{nn} k_n}{\delta^2}$  и  $\psi_0 \eta_0$  определяется  $k_\delta$ .

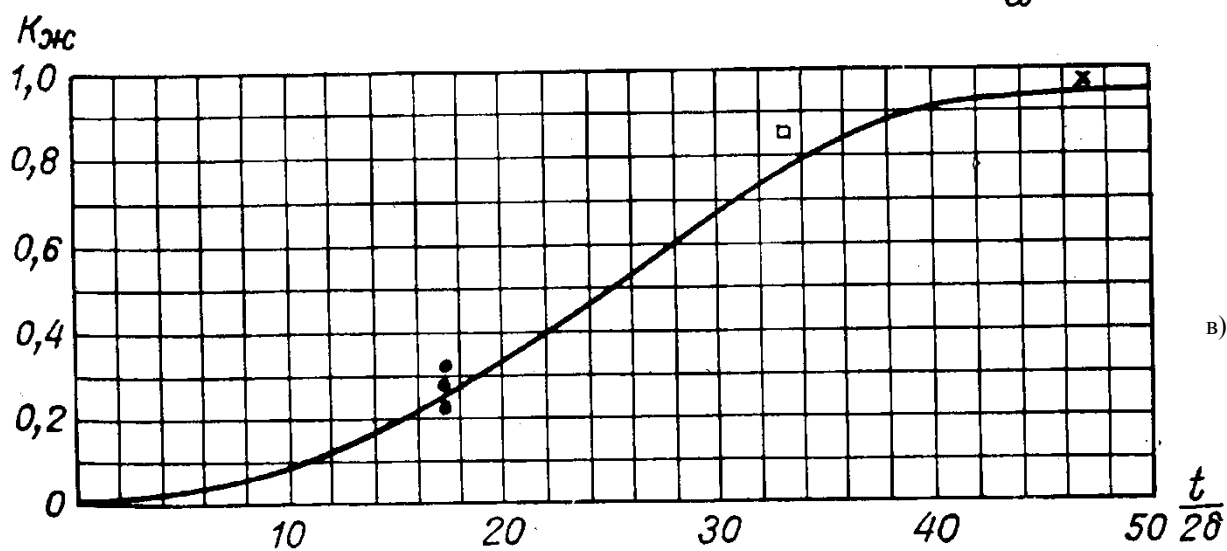
По рис. 7 для отношения  $\frac{V_{cs}}{a}$  определяется  $k_v$ .



a)



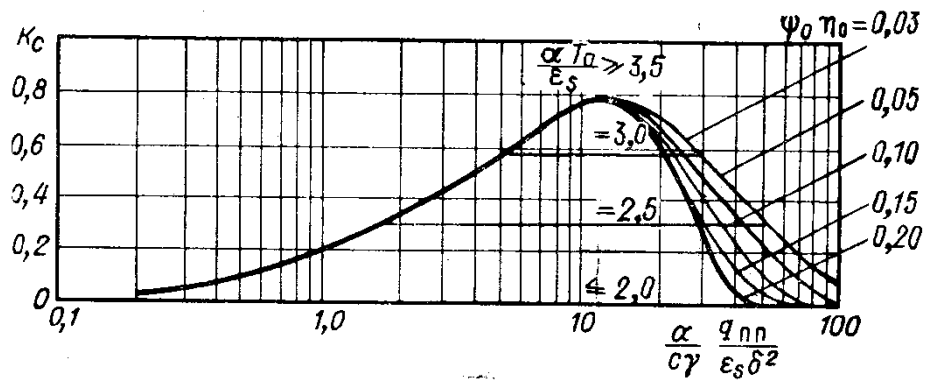
б)



в)

Рис. 7. Определение коэффициентов  $k_\delta$ ,  $k_v$ ,  $k_{ж}$   
(графики а, б, в – соответственно).

По рис. 8 для  $\psi_0\eta_0$ ,  $\frac{\alpha T_0}{\varepsilon_s}$  и  $\frac{\alpha}{c\gamma} \frac{k_n q_{nn}}{\varepsilon_s \delta^2}$  определяется  $k_c$ .



$$\frac{\alpha \Gamma_0}{\epsilon_s} \quad \frac{\alpha}{c\gamma} \cdot \frac{k_n q_{nn}}{\epsilon_s \delta^2}$$

Рис. 8. Зависимость  $K_c$  от  $\psi_0 \eta_0$ ,  $\frac{\alpha \Gamma_0}{\epsilon_s}$  и  $\frac{\alpha}{c\gamma} \cdot \frac{k_n q_{nn}}{\epsilon_s \delta^2}$ .

$$\xi = \frac{\alpha}{c\gamma} [0.255 + 0.745 k_\delta (0.04 + 0.96 k_{ж} k_v)] \cdot (1 + k_\mu k_\delta) \cdot [1 + k_c (1 - k_\delta)] \cdot k_u k_\sigma, \text{ см}^3 / \text{кал};$$

$$w = \xi \cdot q_{nn} = \xi \cdot k_n (1 - k_\phi k_\delta) q_n, \text{ см}^2; \quad W = w l_{ш}, \text{ см}^3;$$

### 3.9. Определение общих сварочных деформаций.

Продольное укорочение конструкции:

$$\Delta L = \frac{V}{F_b}, \text{ см.}$$

Поперечные укорочения конструкции:

$$\Delta B = \frac{(\sum_{j=1}^n V_j + \sum_{i=1}^m W_i)}{F_l}, \text{ см, } S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_{nn}}{\delta^2}, \text{ кал/см.}$$

По графику на рис. 9 определяется для рассчитанной  $S - z_c$ .

Угол поворота одного конца секции относительно другого (как от одного продольного шва):

$$\varphi_l = \frac{V z_c}{J_b};$$

Угол поворота одного конца секции относительно другого:

$$\varphi_b = \frac{W z_c}{J_l};$$

Стрелка прогиба конструкции в продольном направлении:

$$f_l = \frac{\varphi_l L}{8}, \text{ см.}$$

Стрелка прогиба конструкции в поперечном направлении:

$$f_b = \frac{\varphi_b B}{8}, \text{ см.}$$

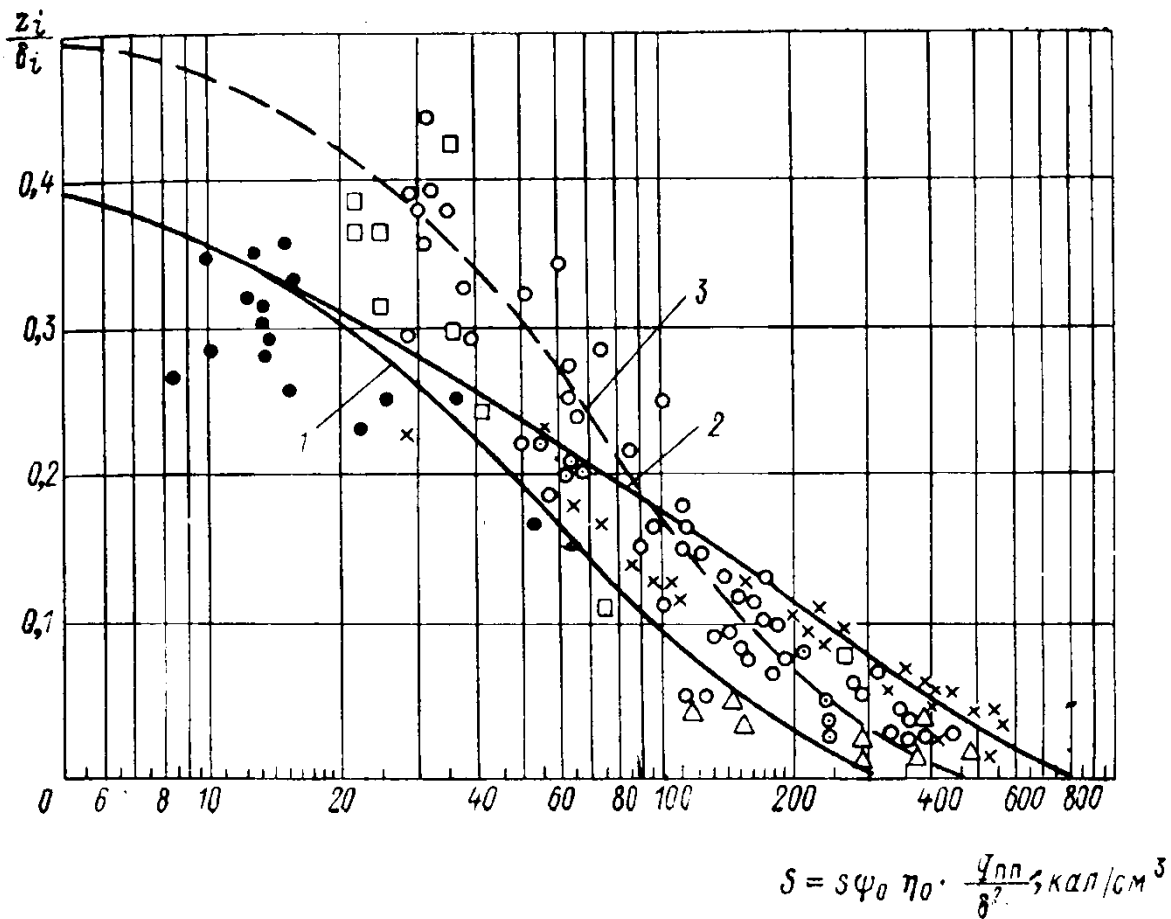


Рис. 9. Определение коэффициента  $z$

- 1 – при сварке в жестком закреплении; 2 – при сварке без закрепления  
 3 – при многопроходной сварке

**3.10. Если меры предотвращения образования сварочных напряжений и деформаций оказываются недостаточными, появляется необходимость в устранении (снятии) возникших напряжений и деформаций.**

В последней части работы необходимо подобрать методы снижения сварочных напряжений и устранения остаточных деформаций.