

5.3. Комплексный прочностной расчет металлоконструкции с учетом сварного соединения входящих в узел стержней

Задача

Выполнить в среде модуля APM Structure3D комплексный статический прочностной расчет металлоконструкции консольной опоры для крепления технологического оборудования с последующей передачей полученных силовых факторов в модуль APM Joint. Задать конфигурацию сварных швов и сделать расчет таврового сварного соединения, предназначенного для соединения наклонных стержневых элементов в центральном узле с использованием накладной пластины. Схема конструкции консольной опоры изображена на рис. 5.3.1. Материал, из которого изготовлены соединяемые детали — ВСт3кп (соответствует С235). Тип сварки: ручная дуговая сварка электродом Э42.

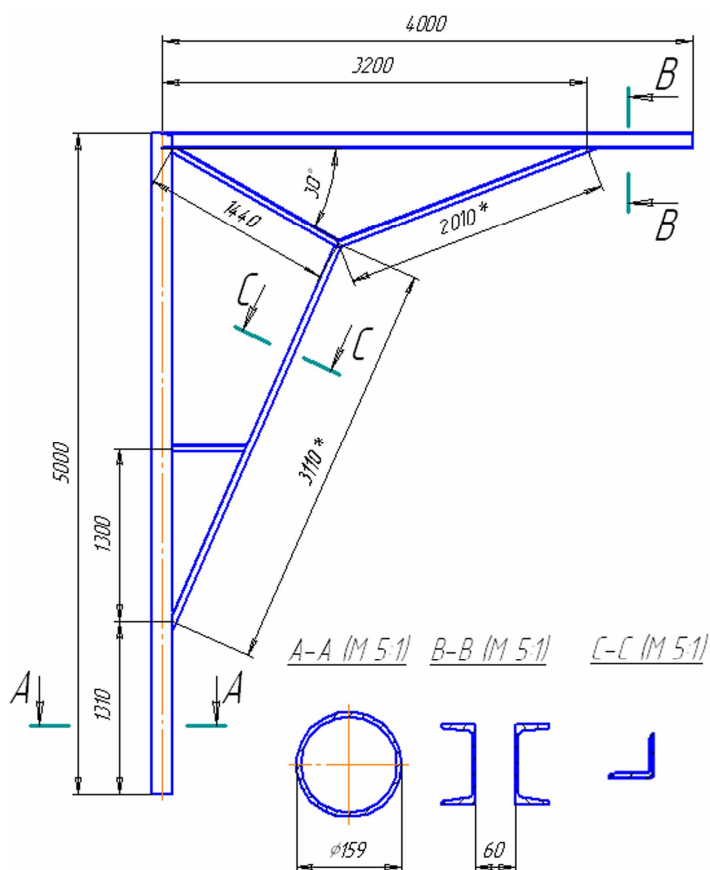


Рис. 5.3.1. Расчетная схема консольной опоры

Поперечные сечения различных элементов базового варианта консольной опоры также приведены на рис. 5.3.1:

- вертикальный стержневой элемент (колонна) имеет поперечное сечение Труба $D = 159$ мм с толщиной стенки 8 мм, ГОСТ 10704-91;
- горизонтальный стержневой элемент имеет поперечное сечение из сдвоенных швеллеров N12, ГОСТ 8240-89;
- наклонные стержневые элементы (раскосы) выполнены из уголков L70x5, ГОСТ 8509-93.

Расстояние между сдвоенными профилями 60 мм. Сечение сдвоенных элементов ориентировано таким образом, что плоскость их симметрии находится в плоскости элементов консольной опоры. Соединение стержневых элементов друг с другом жесткое.

К правому концу горизонтального стержня прикреплено технологическое оборудование массой 1,2 т (вес груза составляет при этом 11 772 Н). При расчетах следует учесть действие силы тяжести. Расчет следует проводить по строительным нормам и правилам.

Общий порядок расчета

1. Создание стержневой модели металлоконструкции и выполнение ее статического расчета в модуле APM Structure3D
2. Передача выбранных элементов узла в модуль APM Joint

3. Отрисовка сварных швов
4. Выбор стандарта и уточнение постоянных параметров для расчета
5. Выбор типа расчета: проверочный и задание дополнительных параметров
6. Выполнение расчета
7. Просмотр и анализ результатов расчета
8. Подготовка чертежей узла сварного соединения

Решение

1. Создание стержневой модели металлоконструкции и выполнение ее статического расчета в модуле APM Structure3D

В соответствии с алгоритмом, приведенным в разделе 2.1 главы 2, создаем стержневую модель консольной опоры, затем присваиваем элементам модели необходимые по условию поперечные сечения и задаем параметры материала, а также параметры закрепления и нагружения (рис. 5.3.2).

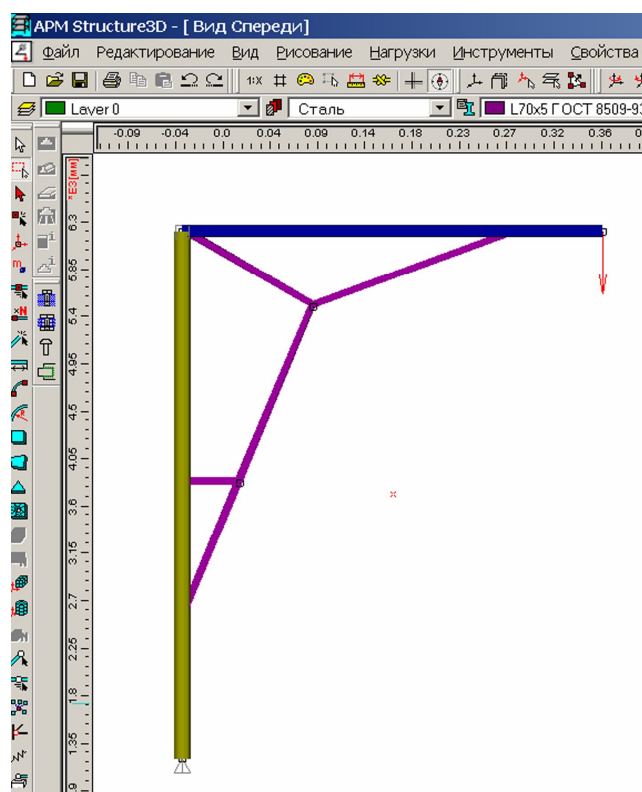


Рис. 5.3.2. Стержневая модель металлоконструкции в APM Structure3D

После проведения статического расчета анализируем карту эквивалентных напряжений (рис. 5.3.3) и убеждаемся, что действующие эквивалентные напряжения не превышают расчетных сопротивлений материала.

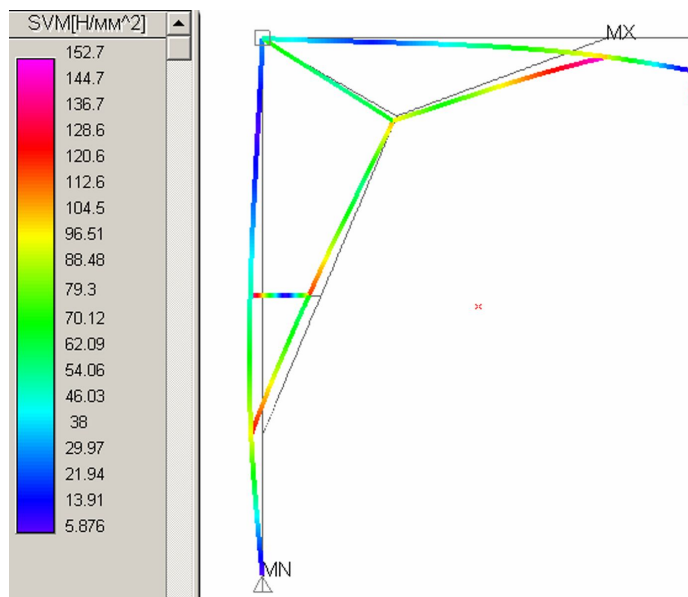




Рис. 5.3.3. Карта эквивалентных напряжений

2. Передача выбранных элементов узла в модуль APM Joint

Выделяем входящие в узел стержни и сам узел с помощью команды  **Выбрать** панели инструментов **Нарисовать**. Затем, удерживая нажатой клавишу Shift, последовательно щелкаем непосредственно по узлу и по каждому из стержней, входящих в узел. Порядок выделения стержней имеет значение, поскольку первый из выделенных стержней примет в окне редактора APM Joint горизонтальное положение. После этого нажимаем кнопку  **Сварное соединение односторонним швом** на инструментальной панели **Соединения** (меню **Расчеты/Сварное соединение односторонним швом**), что вызывает открытие в окне редактора APM Structure3D окна редактора соединений APM Joint APM и передачу туда выделенных стержней (рис. 5.3.4).

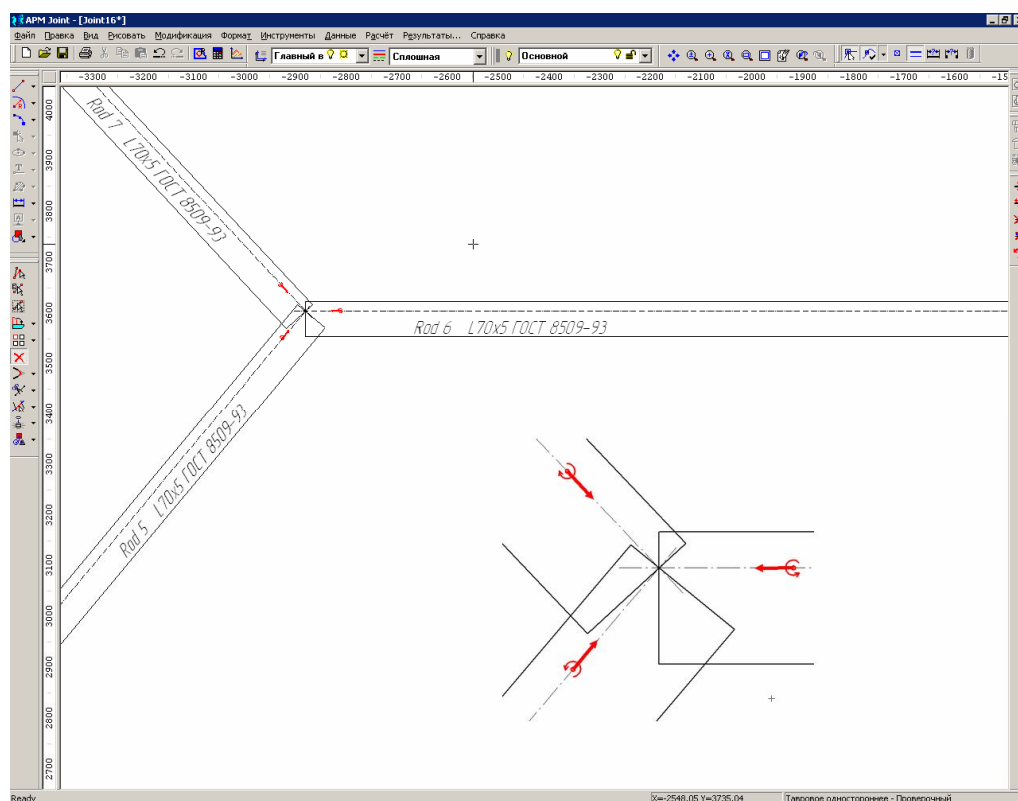


Рис. 5.3.4. Модель узла в системе APM Joint


На рисунке показаны выбранные стержневые элементы, образующие узел, а рядом изображен сам увеличенный узел с внутренними силовыми факторами в виде сил и моментов, возникших в узле.

кающих в узле для каждого из стержней. Возле каждого из стержней написано его название (**Rod 5**) и название сечения, которое присвоено этому стержню (**L70x5 ГОСТ 8509-93**). В рассматриваемом примере стержни имеют значительную длину, так что их названия отображаются относительно мелким шрифтом. Поэтому на рис. 5.3.4 названия стержней и соответствующих им слоев продублированы крупным шрифтом вдоль каждого из стержней.

Каждый из стержней с соответствующими ему силовыми факторами размещается в отдельном слое редактора, причем название этих слоев соответствует названию стержней.

Замечание

*Документ, созданный после передачи входящих в узел (совместно с нагрузками) стержней из модуля APM Structure3D в модуль APM Joint, можно сохранить как файл формата *.wjt и далее работать с этим расчетом в модуле APM Joint.*

Возможно просмотреть величину каждого из силовых факторов и при необходимости ее отредактировать. Для просмотра и редактирования следует воспользоваться командой  **Модификация** одноименной панели инструментов (команда меню **Модификация/Модификация**). Редактирование выполняется по правилам, описанным, например, в п. 3.1.2, раздел 3.2 главы 5.

Проведем расчет для наиболее нагруженного элемента узла. Таковым является стержень Rod 6. Нормальная сила, приложенная к Rod 6 составляет около 48 кН. Согласно таблице 35 СП 53-102-2004 минимальный катет для нахлесточного сварного соединения ручной дуговой сваркой составляет **5 мм**. Расчетная длина углового шва должна быть и не менее 40 мм (согласно п. 15.1.7 СП 53-102-2004). Выполним проверочный расчет сварного соединения исходя из минимальных конструктивных требований. При необходимости длину сварного шва потом можно увеличить.

3. Отрисовка сварных швов

Для проведения дальнейших расчетов сварных швов следует указать конфигурацию пластины, к которой привариваются стержни, и конфигурацию сварных швов. Выбор типа линии и слоя происходит аналогично п. 2, раздел 5.2 главы 5. При изображении сварных швов необходимо выбирать тип линии **Сварной шов**, в то время как тип линии контура пластины, напротив, может быть любым, за исключением типа **Сварной шов**. Сварные швы должны размещаться в тех же слоях, что и привариваемые стержни.

Для отсутствия пересечения профилей уголка выполним конструктивный отступ от точки пересечения линии центра масс стержней по 40 мм. В качестве примера на рис. 5.3.5 изображены прямоугольная пластина и сварные швы. Пластина и сварные швы размещаются в том слое, в котором находится привариваемый к этой пластине стержень **Rod 6 L70x5 ГОСТ 8509-93**.

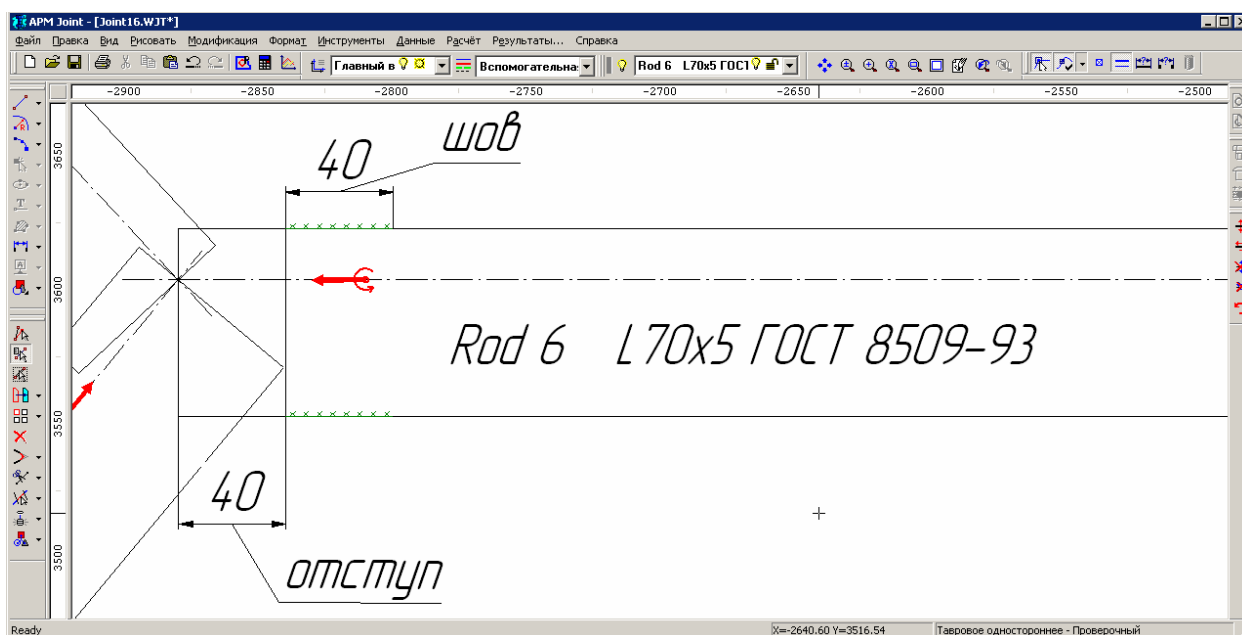


Рис. 5.3.5. Расчетная модель сварного соединения в программе APM Joint


Аналогично типом линии **Сварной шов** в слоях, соответствующих другим стержням, можно изобразить сварные швы, которыми эти стержни будут привариваться к пластине.

Замечание

Картина соединения стержней в реальной конструкции будет отличаться от расчетной схемы. Дело в том, что при моделировании стержневые конечные элементы соединяются в узле, в то время как при изготовлении конструкции стержни будут привариваться к соединительной накладной пластине с некоторым отступом друг от друга, что необходимо по конструктивным соображениям. Это хорошо видно на рис. 5.3.5 – например, стержень Rod 6, изготовленный из уголка L70x5 ГОСТ 8509-93, приварен по краям, а реальное соединение элементов осуществляется с помощью дополнительной пластины. Все возникающие в узле внутренние силовые факторы передаются через сварной шов, которым стержень приваривается к пластине. Важно помнить, что для корректного расчета сварного соединения необходимо правильно указать местоположение шва с учетом его конструктивного исполнения.

4. Выбор стандарта и уточнение постоянных параметров для расчета

Расчет сварного соединения может быть произведен как по строительным нормам и правилам (СНиП, СП), так и по машиностроительным стандартам (ГОСТ). Изменение стандарта расчета на СНиП (по умолчанию установлен стандарт ГОСТ) осуществляется с помощью меню **Расчет/Стандарт**. Установку стандарта следует производить до задания постоянных параметров, поскольку вид диалогового окна **Постоянные параметры** значения постоянных параметров зависят от выбранного стандарта расчета.

Для уточнения и/или задания значений задания параметров нужно перейти в соответствующий режим, нажав кнопку  **Постоянные параметры** панели инструментов **Главная** (меню **Данные/Постоянные параметры....**). В появившемся окне введите постоянные параметры в соответствии с таблицей 1. Уточнение постоянных параметров расчета и задание параметров материала сварного шва следует произвести для каждого из слоев, в которых размещены сварные швы.

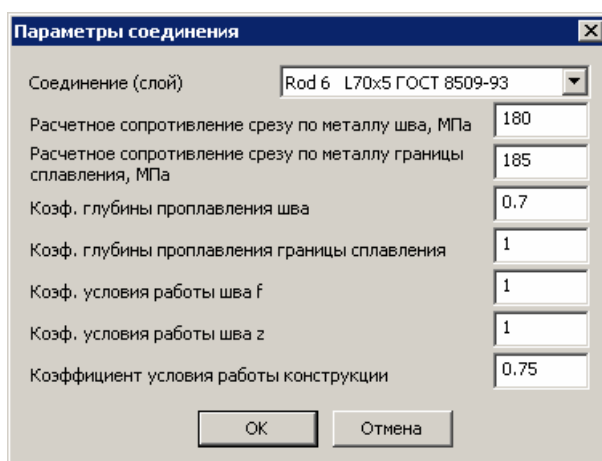


Рис. 5.3.6. Результаты расчета сварного соединения

Таблица 1 – Постоянные параметры

Наименование параметра	Выбор значения по СП 53-102-2004
Расчетное сопротивление срезу по металлу шва, $R_{wf} = 180$ [МПа]	Согласно таблице Г.2 СП 53-102-2004
Расчетное сопротивление срезу по металлу границы сплавления, $R_{wz} = 0,45R_{un} = 0,45 \cdot 360 = 185$ МПа	$R_{un} = 360$ МПа – временное сопротивление разрыву металла
Коэффициент глубины проплавления шва, $\beta_f = 0,7$.	Таблица 36, СП 53-102-2004
Коэффициент глубины проплавления границы сплавления, $\beta_z = 1$.	
Коэффициент условий работы шва, $\gamma_{wf} = 1$	Коэффициенты согласно п. 11.2 СНиП II-23-81*, учитывающие эксплуатацию в климатических районах I ₁ , I ₂ , II ₂ и III ₃ .
Коэффициент условий работы шва, $\gamma_{wz} = 1$	
Коэффициент условий работы конструкции, $\gamma_c = 0,75$	Таблица 1, СП 53-102-2004

5. Выбор типа расчета: проверочный и задание дополнительных параметров

Для выбора типа расчета (проектировочный или проверочный) следует в меню **Расчет/Тип** выбрать **Проектировочный** или **Проверочный**. По умолчанию первым выполняется **Проектировочный** расчет. В данном случае требуется переключиться в режим **проверочного** расчета

Для проверочного расчета необходимо задать катет сварного шва $k_f = 5$ мм, используя команду меню **Данные/Дополнительные параметры...**

6. Выполнение расчета

Для запуска на расчет нужно нажать кнопку  **Расчет** на панели инструментов **Главная** (меню **Расчет/Расчет!**).

7. Просмотр и анализ результатов расчета

После завершения расчета пункт меню **Результаты...** становится активным. Выбираем этот пункт, открывая тем самым диалоговое окно **Результаты расчета** (рис. 5.3.7), в котором показывается коэффициент запаса по расчетному сопротивлению, который должен быть больше **1**. В данном случае он составляет 0,52, что недостаточно. Увеличим длину сварных швов вдвое (рис. 5.3.8) и повторим расчет.

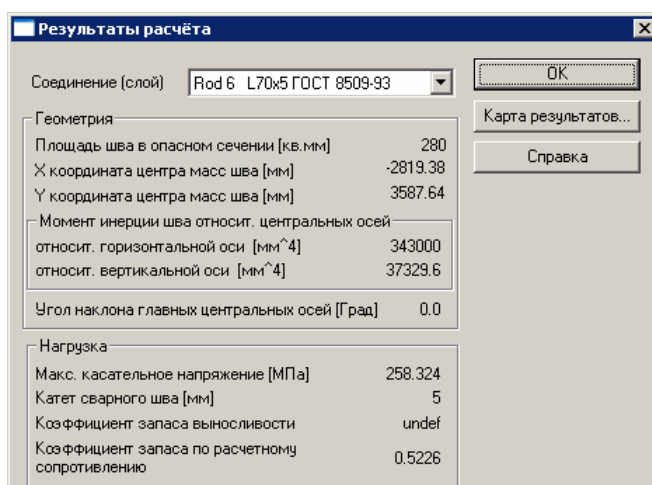


Рис. 5.3.7. Результаты расчета сварного соединения

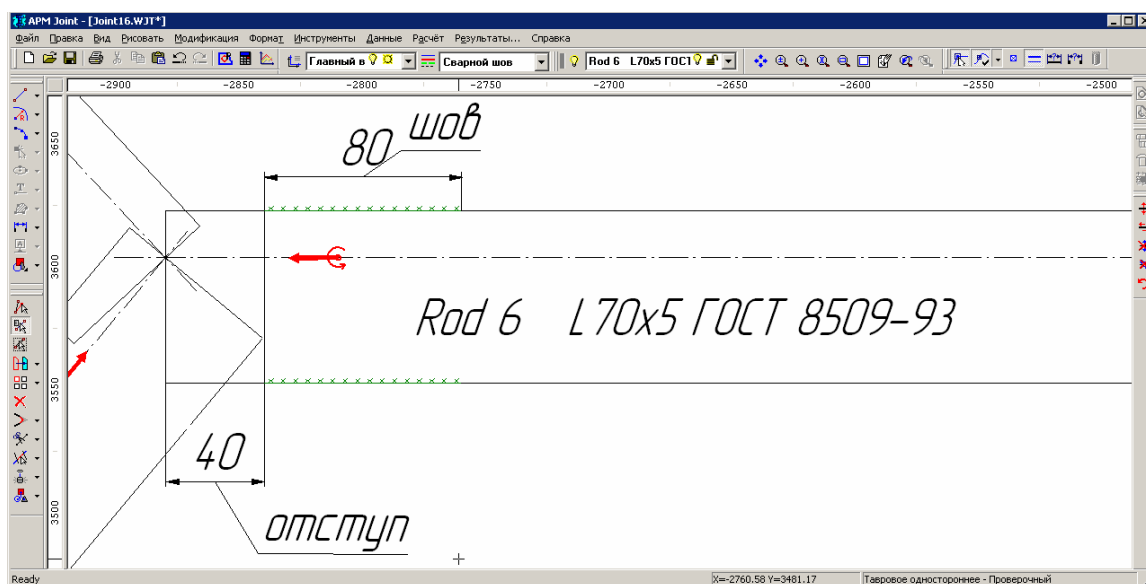


Рис. 5.3.8. Расчетная модель сварного соединения в программе APM Joint

После увеличения длины сварных швов и выполнения расчета выберете меню **Результаты...** В диалоговом окне **Результаты расчета** (рис. 5.3.9) коэффициент запас по расчетному сопротивлению больше **1**.

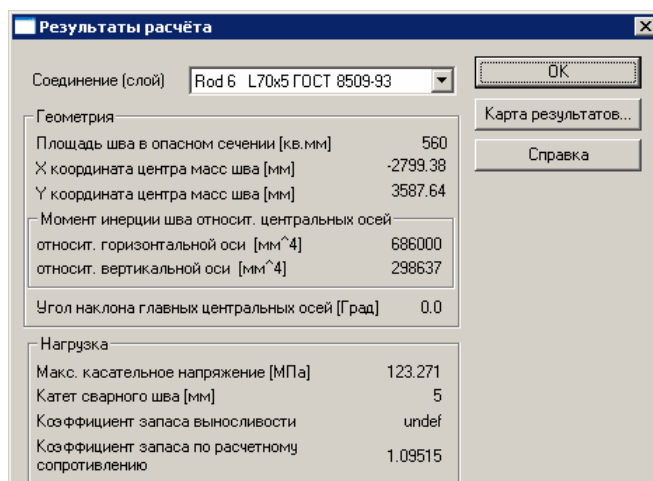


Рис. 5.3.9. Результаты расчета сварного соединения

Нажатием кнопки **Карта результатов...** вызываем появление карты напряжений этого слоя (рис. 5.3.10), на которой изображен сварной шов. Цветовая гамма шва отвечает цветовой шкале **Кас. напряжения МПа**, расположенной в левой верхней части окна. Видно, что наиболее нагруженным участком сварного шва будет примыкающий к полке.

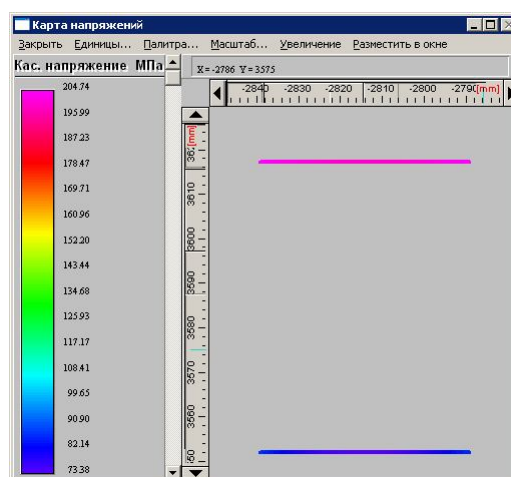







Рис. 5.3.10. Карта эквивалентных напряжений в сварном шве


Аналогичные результаты можно получить по всем слоям (сварным швам). Анализ результатов расчета позволяет осознанно, а не интуитивно, подходить к выбору как формы накладной пластины, так и самих сварных швов, оптимизируя при этом проектируемую конструкцию.

8. Подготовка чертежей узла сварного соединения

APM Structure3D позволяет создавать чертежи типовых узлов металлоконструкций в чертежно-графическом редакторе APM Graph. Генерация чертежа узла предполагает ввод основных параметров соединения, таких как вид соединения (болтовое или сварное), размеры накладной пластины и т.д. Поэтому генерацию чертежа целесообразно проводить после прочностного расчета.

Для создания чертежа типового узла данного примера необходимо перейти в APM Structure3D, выделить все стержневые элементы, входящие в узел с помощью команды  **Выбрать группу** или  **Выбрать** (удерживая клавишу **Shift** нажатой). Далее нажать кнопку  **Накладная пластина-внутренний узел** панели инструментов **Соединение стальных элементов**. При этом запускается графический редактор APM Graph с параметрической моделью чертежа узла. Переменные модели принимают значения по умолчанию.

Редактировать параметрическую модель можно с помощью переменных (команда  **Список переменных соединения**) или изменяя параметры в диалоговом окне (команда  **Параметры соединения**). Рассмотрим эти способы подробнее.

Для редактирования значений переменных параметрической модели выберите команду  **Список переменных соединения** панели инструментов **Параметры модели узла**. Что приведет к открытию диалогового окна редактирования переменных параметрической модели (рис. 5.3.11).

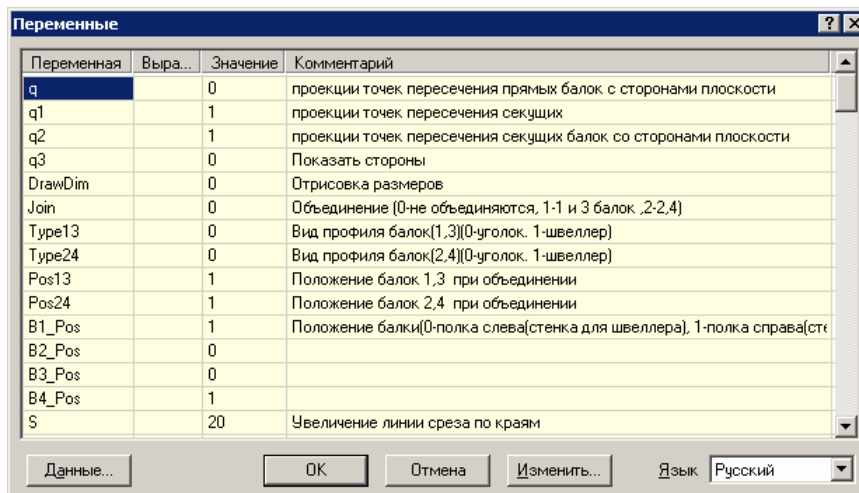



Рис. 5.3.11. Диалоговое окно Переменные

Замечание:

*Размеры, доступные для редактирования непосредственно на модели отображаются **синим** цветом. Для этого необходимо после активации команды  **Модификация** щелкнуть по размеру или по уголку, то сразу появится диалоговое окно переменной размера или названия профиля. Такой подход позволяет редактировать переменные без вызова окна со списком переменных.*

Для редактирования значения щелкните по переменной дважды или выберите ее в списке и нажмите кнопку **Изменить** диалогового окна. При этом появится окно редактирования переменной (рис. 5.3.12). Измените значения переменных параметрической модели в соответствии с таблицей 2. Переменные в таблице размещены в порядке расположения в диалоговом окне (см. рис. 5.3.11). Конструктивную длину каждого непрерывного участка сварного шва (согласно п. 15.1.16 СП 53-102-2004) следует увеличить на 1 см.

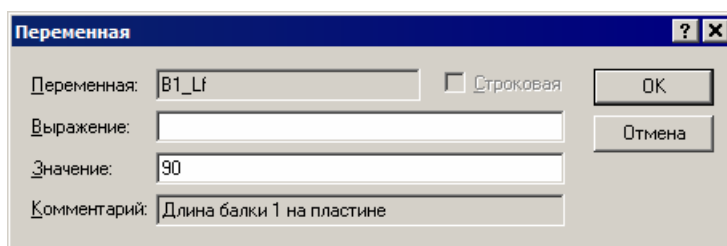



Рис. 5.3.12. Диалоговое окно редактирования значения переменной

Таблица 2

Переменная	Значение	Комментарий
Bolted1	0	Вид соединения балки 1 (0 - сварное, 1 - болтовое)
Bolted2	0	Вид соединения балки 1 (0 - сварное, 1 - болтовое)
Bolted3	0	Вид соединения балки 1 (0 - сварное, 1 - болтовое)
Plate_T	5	Толщина пластины
Plate_s	235	Предел текучести пластины
B1_Lf	90	Длина балки 1 на пластине
B2_Lf	90	Длина балки 2 на пластине
B3_Lf	90	Длина балки 3 на пластине
Double1	0	Балка 1 с двух сторон пластины
Double2	0	Балка 2 с двух сторон пластины
Double3	0	Балка 3 с двух сторон пластины
B1_s	235	Предел текучести материала балки 1
B2_s	235	Предел текучести материала балки 2
B3_s	235	Предел текучести материала балки 3

Для редактирования параметров в диалоговом окне выберите команду  **Параметры соединения** панели инструментов **Параметры модели узла**. Интуитивно понятный интерфейс диалогового окна позволяет выполнить редактирование параметров во вкладках *Геометрия*, *Сечения*, *Крепления балок*, *Пластины*. Замените во вкладке *Геометрия* тип соединения на сварное, во вкладке *Пластины*: L1, L2, L3 = 90 мм, толщина пластины 5 мм (рис. 5.3.13). После выполнения редактирования нажмите кнопку «Применить» диалогового окна, чтобы принятые изменения отображались на модели.

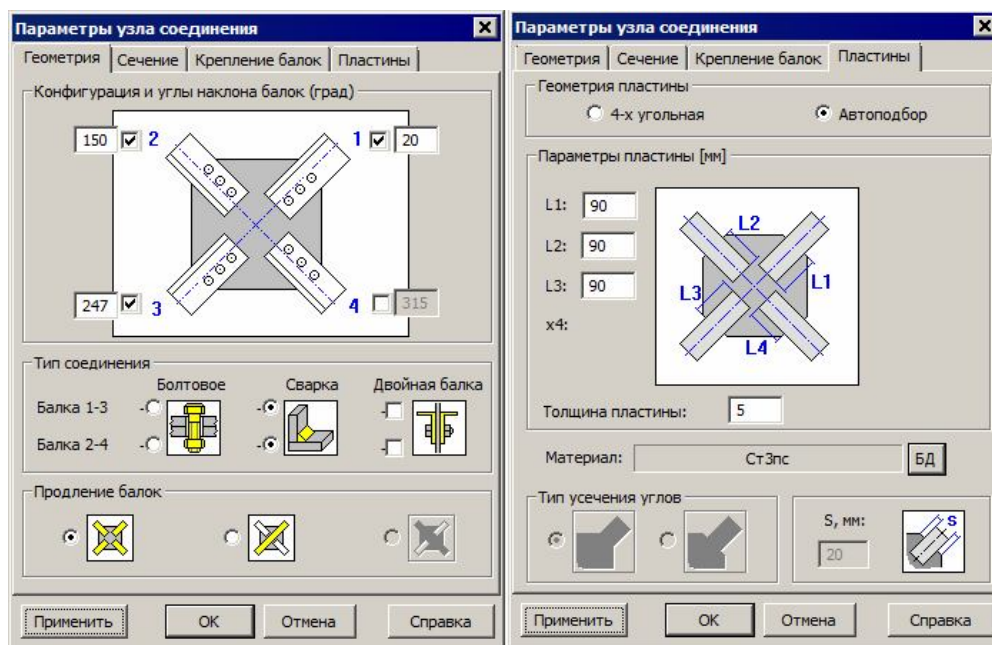


Рис. 5.3.13. Диалоговое окно Параметры узла соединения – вкладки *Геометрия* и *Пластины*

Помимо визуального анализа конструктивной реализации соединения параметрические модели типовых узлов металлоконструкций позволяют выполнить ряд проверок для присвоенных значений переменных. Информации о не выполнении условий проверки выводится в **Окне сообщений**. Вызов окна сообщений осуществляется одноименной командой меню **Вид**. В данном примере в окне сообщений предупреждений нет (рис. 5.3.14).

Дальнейшая доработка параметрической модели до чертежа может осуществляться как средствами чертежно-графического редактора APM Graph, так и CAD систем сторонних разработчиков. При использовании APM Graph остановимся на основных необходимых командах.

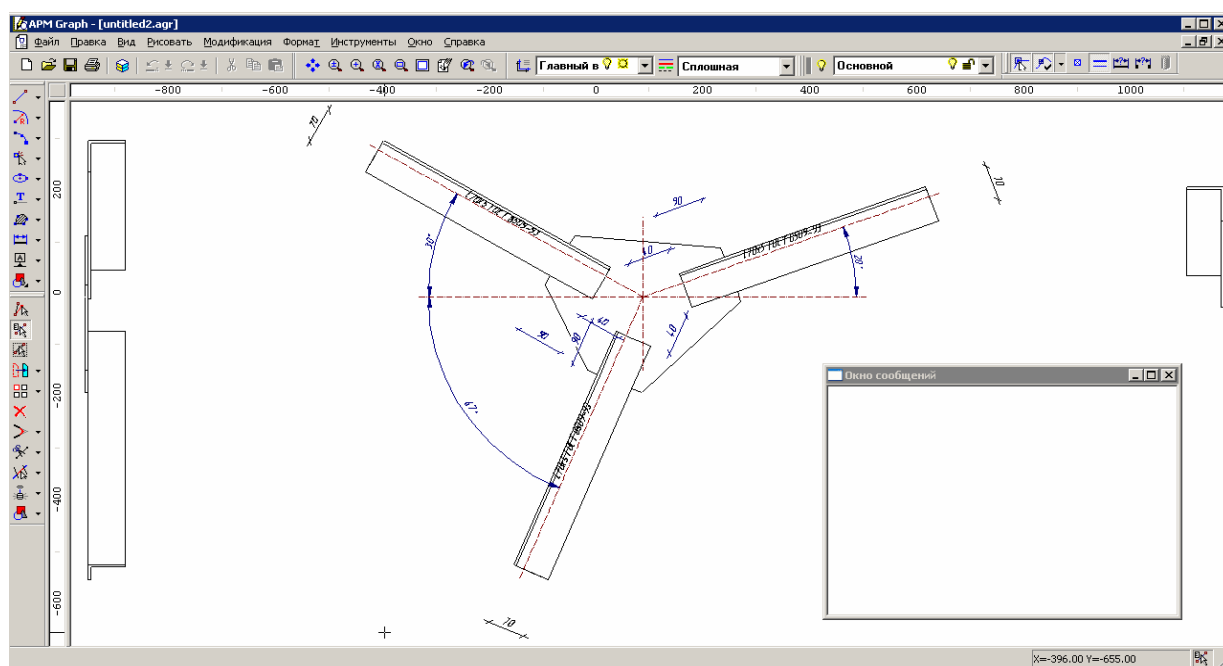





Рис. 5.3.14. Параметрическая модель узла после редактирования переменных

Отрисовка линий сварного шва на чертеже

Для отрисовки линий сварного шва на чертеже используются специальные шаблоны линий.

По умолчанию данные шаблоны линий не загружены. Для их загрузки активируйте команду  **Шаблоны линий** (команда меню **Формат/Шаблоны линий**). В появившемся диалоговом окне нажмите кнопку **Загрузить**. Это приведет к появлению окна загрузки **Шаблонов линий** (рис. 5.3.15). Выберите файл **Сварные линии.lin**, расположенный в папке C:\Program Files\APM Civil Engineering. При этом в правой части окна отобразятся все шаблоны линий данного файла. Выберите интересные шаблоны или воспользуйтесь кнопкой **Выделить Все**. После нажатия кнопки **OK** выделенные шаблоны будут загружены в список APM Graph и станут доступны для выбора с помощью панели инструментов **Формат**  Шов сварно .

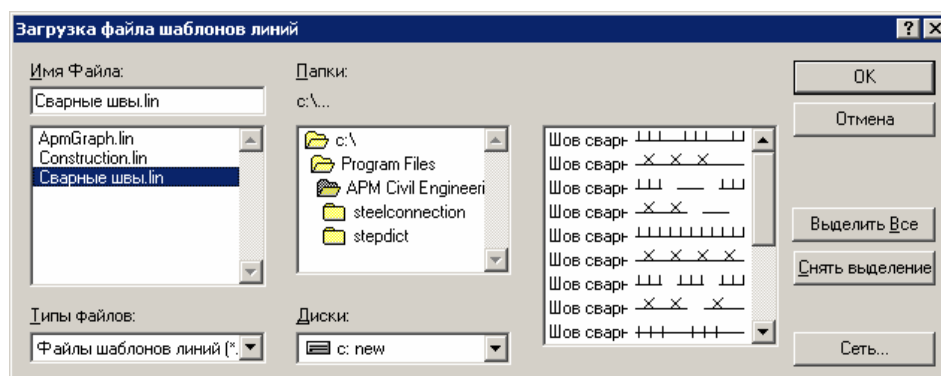



Рис. 5.3.15. Загрузка типов линий – сварные швы

Для отрисовки сварных швов на чертеже воспользуйтесь одной из команд для отрисовки линий панели инструментов **Рисование** (меню **Рисование/Линия**) предварительно выбрав шаблон сварного шва.

Обозначение сварного шва

Для обозначения сварного шва на чертеже воспользуйтесь командой  **Специальные символы/Выноска** панели инструментов **Рисование** (команда меню **Рисование/Специальные символы/Выноска**). После активации команды задайте начальную точку выноски. Следующим щелчком установите конечную точку. После задания точек выноски во вкладке **Швы сварных соединений** введите параметры обозначения в появившемся диалоговом окне (рис. 5.3.16).

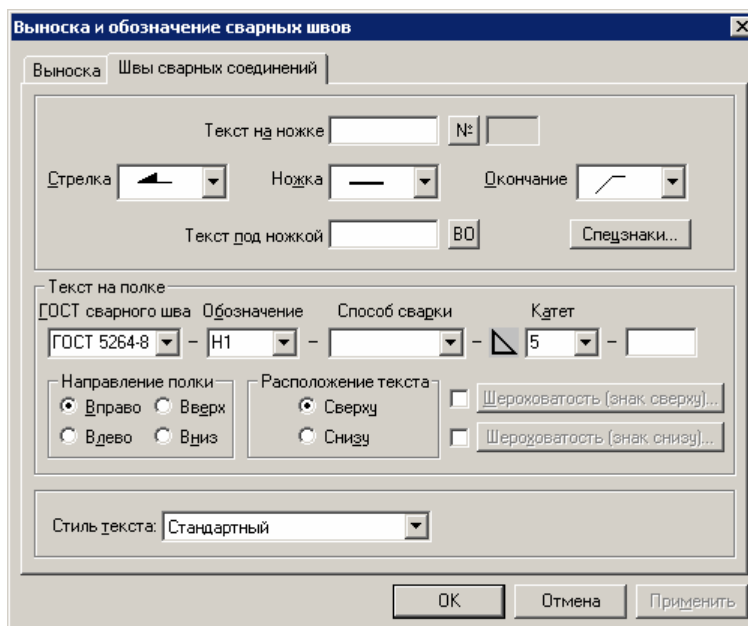



Рис. 5.3.16. Диалоговое окно обозначения сварных швов

Экспорт полученных чертежей в CAD системы сторонних разработчиков возможен через формат *.dxf. Для корректной передачи всех элементов чертежа перед экспортированием все па-

параметрические блоки должны быть разбиты с помощью команды  **Расчленить блок** панели инструментов **Модификация** (команда меню **Модификация/Блок/Расчленение блока**). Для сохранения чертежа в формате *.dxf воспользуйтесь командой меню **Файл/Экспорт**.

Практическое задание

Рассчитать соединения одного из узлов стержневой модели, изображенной на рис. 2.1.20, с использованием накладной пластины. Создать конфигурацию сварных швов, выполнить их прочностной расчет, меры по их оптимизации. Подготовить рабочий чертеж соединения в графическом редакторе APM Graph с использованием параметрической модели соединения.