

ГЛАВА 9

КОМПЛЕКСНЫЙ ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ С УЗЛОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

В этой главе кратко рассматриваются возможности совместной работы модуля прочностного расчета APM Structure3D и модуля расчета соединений APM Joint. Результаты прочностного расчета узла стержневой модели, полученные с помощью APM Structure3D, передаются в автоматизированном режиме в APM Joint, где и производится их расчет. Соединяться узловыми элементами могут болтами или заклепками, а также с помощью сварки.

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

Статический прочностной расчет в модуле APM Structure3D с последующим расчетом одного из сварных швов в модуле APM Joint рассмотрим на примере металлоконструкции поворотного крана (рис. 9.1). Соединяемые детали изготовлены из стали 40. Поперечные сечения различных элементов поворотного крана приведены на рис. 9.1:

- вертикальный стержневой элемент (колонна) имеет поперечное сечение типа труба с диаметром $D = 159$ мм и толщиной стенки 8 мм, ГОСТ 10704-91;
- горизонтальный стержневой элемент имеет поперечное сечение из двутенных швеллеров N12, ГОСТ8240-89;
- наклонные стержневые элементы (раскосы) изготовлены из уголков L70x5, ГОСТ 8509-93.

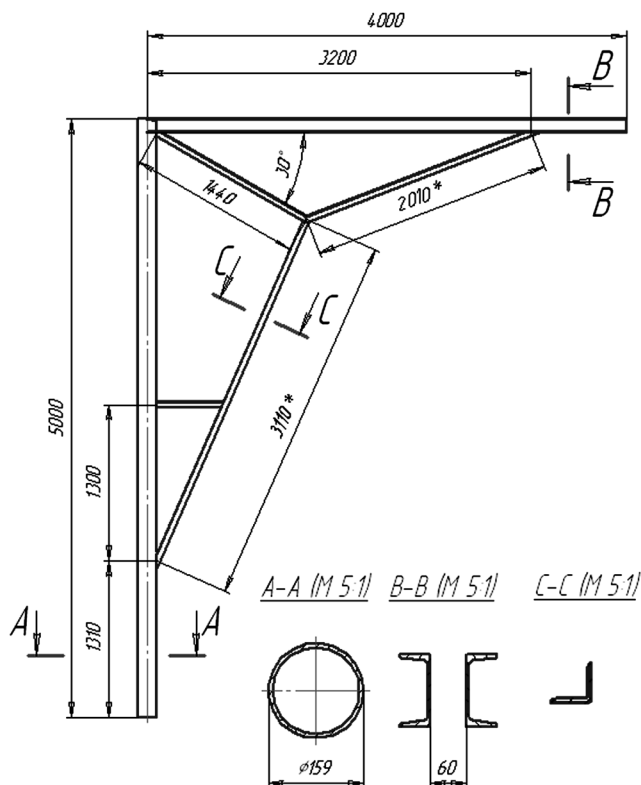
К правому концу горизонтального стержня прикреплен поднимаемый груз массой 1,2 т (вес груза составляет при этом 11 772 Н). При расчетах следует учесть действие силы тяжести.

Необходимо спроектировать сварное соединение стержней в центральном узле, обеспечив следующие значения коэффициентов запаса сварного шва:

- по статической прочности — не ниже 3;
- по выносливости — не ниже 1,5.

Все расчеты проводим по машиностроительным стандартам (ГОСТ).

Рис. 9.1.
Чертеж металлоконструкции
поворотного крана



9.1.1. Выполнение статического расчета в модуле APM Structure3D. Передача элементов узла в модуль APM Joint

Создаем стержневую модель поворотного крана, затем присваиваем элементам модели необходимые по условию поперечные сечения, задаем параметры материала, а также параметры закрепления и нагружения (рис. 9.2).

После выполнения статического расчета анализируем карту эквивалентных напряжений (рис. 9.3), убеждаясь в работоспособности созданной модели.

Далее переходим к операции проектирования соединений в центральном узле и передаче их в модуль APM Joint. Начинаем ее с выделения узла и входящих в него стержневых элементов, обращая внимание на порядок выделения, поскольку первый из выделенных стержней примет в окне редактора APM Joint горизонтальное положение. После этого нажимаем кнопку **Сварное соединение односторонним швом**



на панели **Соединения** (меню **Расчеты/Сварное соединение односторонним швом**), что вызывает открытие в окне редактора APM Structure3D окна редактора соединений APM Joint и передачу туда выделенных стержней.

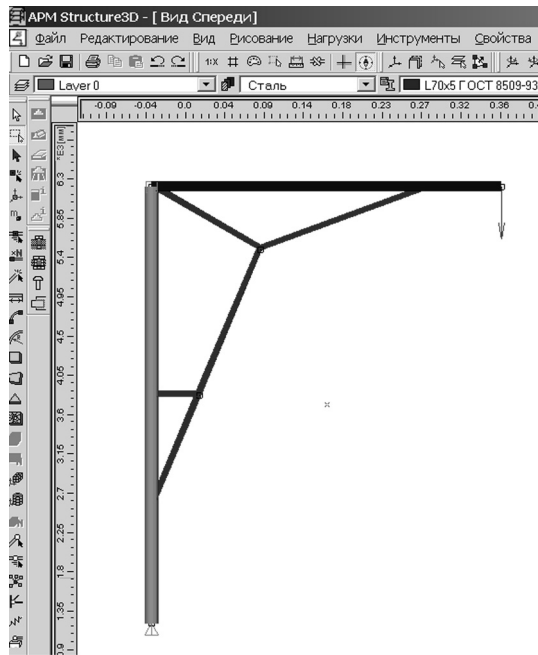


Рис. 9.2. Стержневая модель поворотного крана

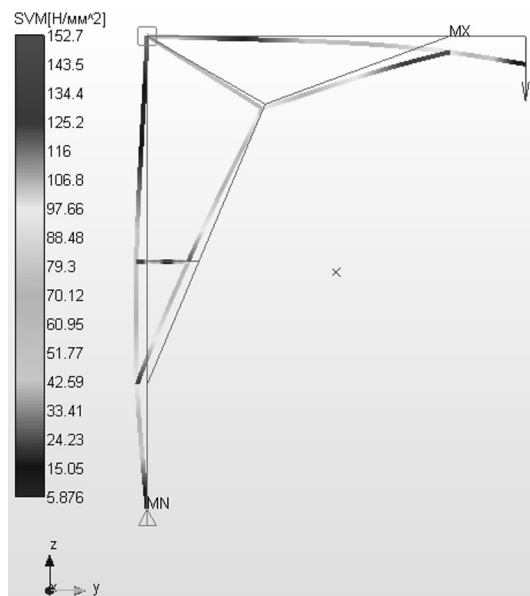



Рис. 9.3. Фрагмент карты эквивалентных напряжений, возникающих в стержнях модели поворотного крана

На рис. 9.4 показаны переданные в APM Joint стержневые элементы, образующие узел, а рядом приведено увеличенное схематическое изображение этого узла с внутренними силовыми факторами в виде сил и моментов, возникающими в узловых точках стержней. Возле каждого стержня написано его название (например, для горизонтального стержня это Rod 11) и название присвоенного ему сечения (L70x5 ГОСТ 8509-93). В рассматриваемом примере стержни имеют значительную длину, так что их названия отображаются относительно мелким шрифтом. Поэтому на рис. 9.4 названия стержней и соответствующих им слоев продублированы крупным шрифтом вдоль каждого из стержней.

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

Величину любого из действующих силовых факторов, силы или момента, можно визуализировать и при необходимости отредактировать. Для перехода в режим редактирования силового фактора нужно нажать кнопку **Модификация**  на панели **Модификация** (меню **Модификация/Модификация свойств**), а затем щелкнуть на этом силовом факторе левой кнопкой мыши. В открывшемся диалоговом окне **Модификация силы** (или **Модификация момента**) показывается название слоя, в котором расположена рассматриваемая нагрузка, а также тип

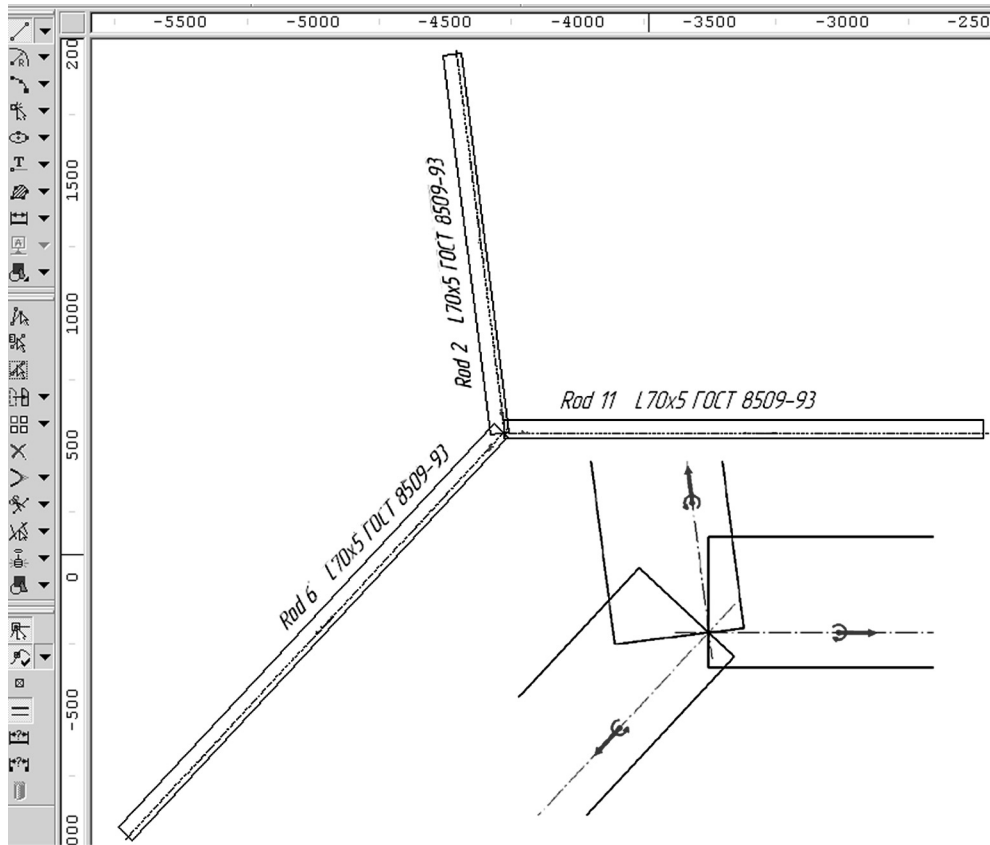


Рис. 9.4. Схематическое изображение соединения стержней центрального узла после передачи в модуль APM Joint

линии, которым она схематически изображается (рис. 9.5). Каждый из стержней с соответствующими ему силовыми факторами располагается в отдельном слое редактора, при этом слой и находящийся в нем стержень имеют одинаковое название. Если необходимо отредактировать параметры нагрузки, то нажимаем кнопку **Свойства**, выбираем из выпадающего списка необхо-

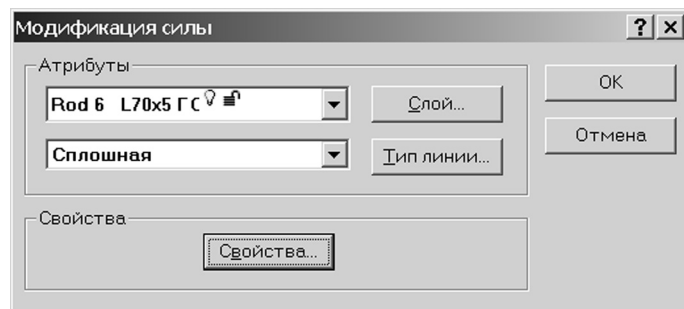


Рис. 9.5.
Диалоговое окно
Модификация силы

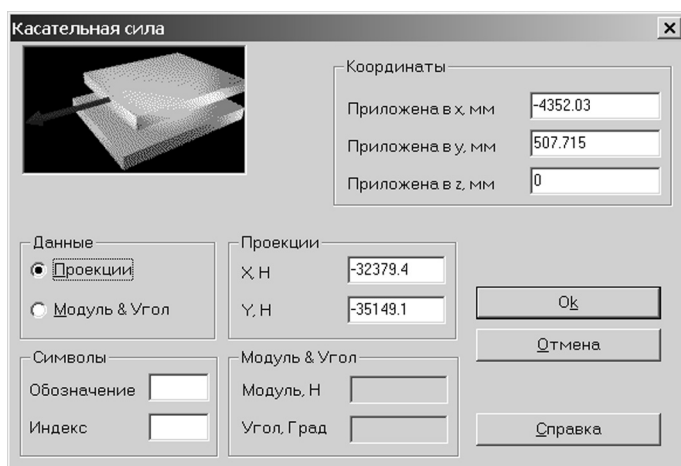



Рис. 9.6.
Диалоговое окно
Касательная сила

димый тип нагрузки и записываем в поля ввода открывшегося диалога параметры этой нагрузки. В качестве примера на рис. 9.6 показано окно диалога **Касательная сила**.

9.1.2. Задание конфигурации сварных швов и параметров расчета

Для обеспечения сварного соединения наклонных стержневых элементов следует создать вспомогательную пластину и поместить ее в любой имеющийся или созданный заново слой. Произвольным может быть и тип линии при изображении контура пластины, за исключением типа **Сварной шов**. Наоборот, при изображении сварных швов необходимо выбирать тип линии **Сварной шов**, причем сварные швы для стержней должны размещаться в тех же слоях, что и сами свариваемые стержни и соответствующие им силовые факторы. Выбор типа линии и слоя происходит из выпадающих списков, расположенных на инструментальной панели **Формат** .

В качестве примера на рис. 9.7 изображены прямоугольная пластина и сварной шов, которым она приваривается к стержню Rod 6. Пластина, сварные швы и привариваемый к этой пластине стержень Rod 6 L70x5 ГОСТ 8509-93 размещаются в одном и том же слое. Аналогично типом линии **Сварной шов** в слоях, соответствующих другим стержням, изображаем сварные швы для всех остальных стержней.

Замечание. Картина соединения стержней в реальной конструкции отличается от расчетной схемы. Дело в том, что при моделировании стержневые КЭ соединяются в одном из узлов, в то время как при монтаже конструкции стержни привариваются к соединительной пластине с некоторым отступом друг от друга, что необходимо по конструктивным соображениям. Это хорошо видно на рис. 9.7 — например, стержень Rod 6, изготовленный из уголка L70x5 ГОСТ 8509-93, заканчивается поперечным сварным швом, а реальное соединение элементов осуществляется с помощью дополнительной пластины. Все возникающие в узле внут-

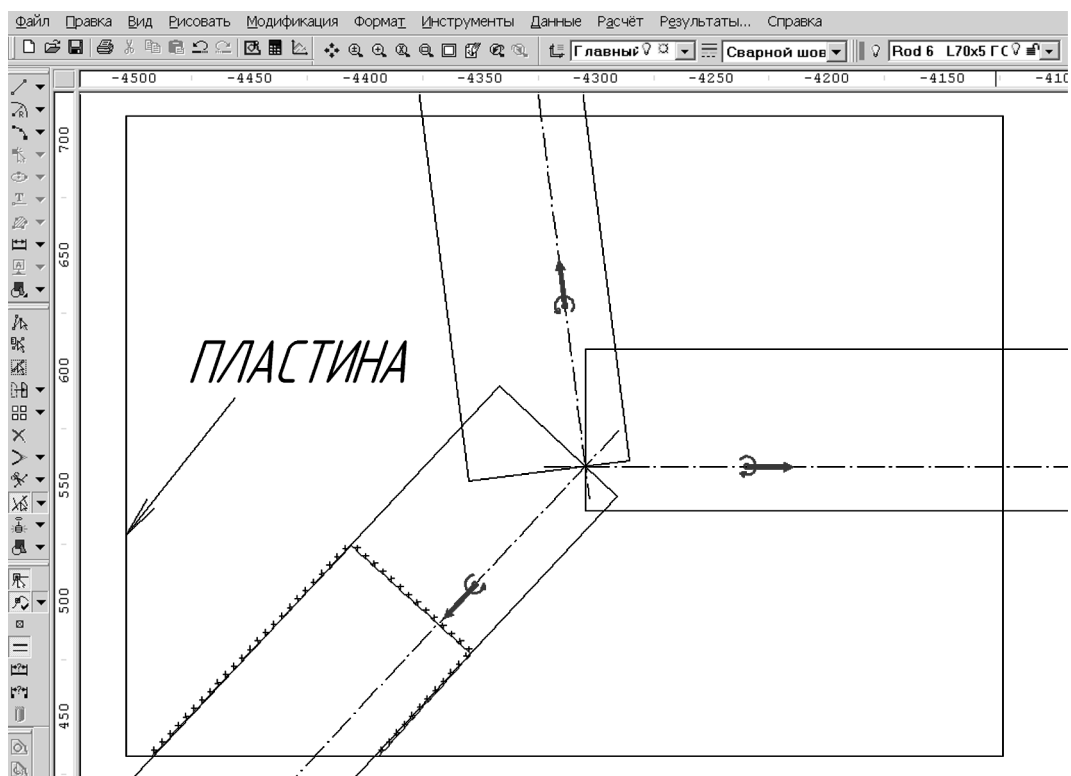



Рис. 9.7. Конфигурация сварного шва, соединяющего стержень Rod 6 и вспомогательную пластину

ренние 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.

Перед выполнением расчета сварных швов необходимо выбрать его стандарт. Для машиностроительных конструкций это ГОСТ, а для строительных — СНиП. По умолчанию установлен стандарт ГОСТ. При необходимости с помощью меню **Расчет/Стандарт** его можно изменить на СНиП. После выбора стандарта расчета нужно задать некоторые постоянные параметры, к которым относятся материал соединяемых деталей и набор различных коэффициентов.

Для визуализации и корректировки значений постоянных параметров служит диалоговое окно **Постоянные параметры** (рис. 9.8), которое открывается с помощью кнопки **Постоянные параметры**  на панели инструментов **Главная** (меню **Данные/Постоянные параметры...**). При сварке активными являются поля **Коэффициент запаса текучести деталей крепления**, **Предел текучести материала деталей сопряжения** и **Предел прочности материала деталей сопряжения**. По умолчанию в этих полях стоят значения, соответствующие

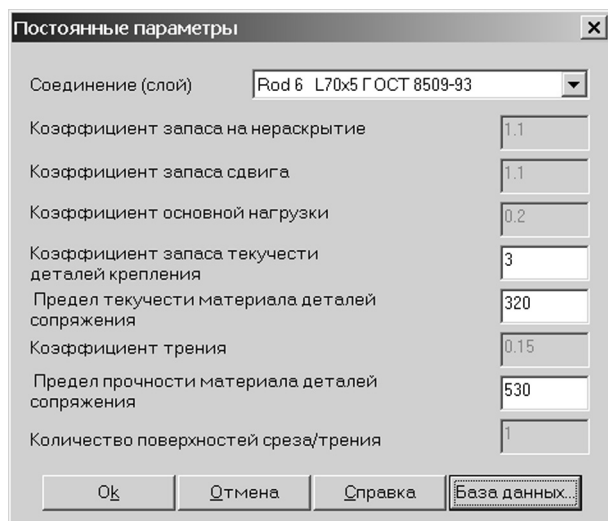


Рис. 9.8.
Диалоговое окно
Постоянные параметры

ющие стали Ст3кп. Материал сварного шва (в рассматриваемом примере это Сталь 40) задается следующим образом: нажимаем кнопку **База данных...**, а затем действуем по описанной в п. 2.3.1 методике. Соответствующие значения параметров материала для выбранного типа стали автоматически перепишутся в поля ввода диалогового окна **Постоянные параметры**.

Далее из выпадающего списка **Соединение (слой)** выбираем нужный слой и соответствующий ему сварной шов.


Наконец, убеждаемся в том, что в поле **Коэффициент текучести деталей крепления** записано число 3, как это требуется по условию.

Корректировку значений постоянных параметров расчета и задание параметров материала сварного шва следует произвести для каждого из слоев, в которых размещены сварные швы.

9.1.3. Выполнение проектировочного расчета сварного шва и просмотр результатов

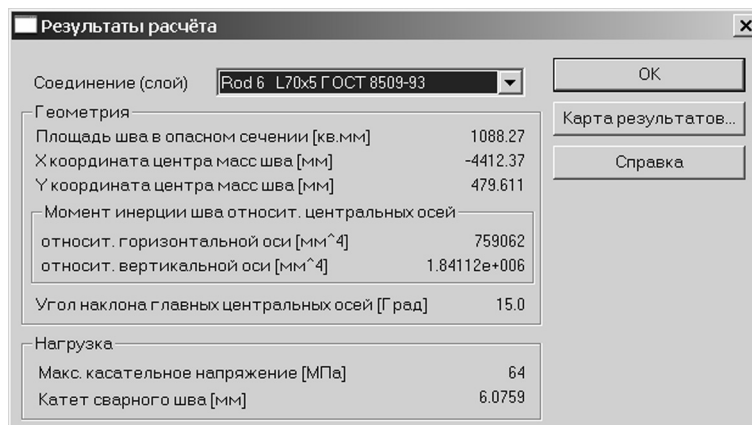
С помощью меню **Расчет/Тип** выбираем тип расчета — **Проектировочный** или **Проверочный**. По умолчанию первым выполняется **Проектировочный** расчет.

Проектировочный расчет позволяет определить геометрию элементов соединения (величину катета сварного шва, диаметр болтов или заклепок) по известным параметрам, таким как величины внешних силовых факторов (сил и моментов), количество и расположение сварных швов, свойства материала сварных швов и коэффициент запаса. При этом расчет ведется при статическом характере нагружения.

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

После завершения расчета кнопка **Результаты**  на панели **Главная** (меню

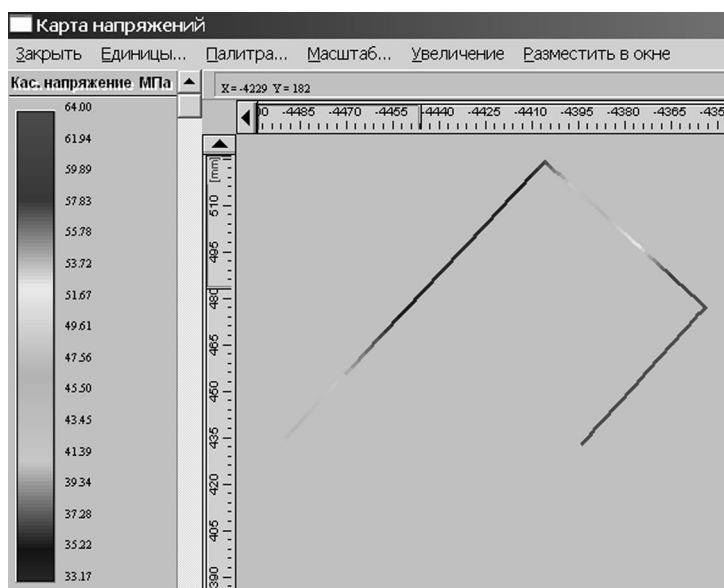
Рис. 9.9.
Диалоговое окно
Результаты расчета
с результатами
проектировочного
расчета



Результаты...) становится активной. Нажимаем ее, открывая тем самым диалоговое окно **Результаты расчета** (рис. 9.9), и выбираем из выпадающего списка **Соединение (слой)** стержень для просмотра результатов расчета сварного шва. В группе параметров **Нагрузка** показывается значение катета этого шва. Например, на самом нагруженном участке стержня Rod 6 катет сварного шва равен 6,08 мм.

Нажатием кнопки **Карта результатов...** вызываем появление карты напряжений сварного шва рассматриваемого стержня. На карте схематически изображен сварной шов, разбитый на окрашенные в различные цвета участки (рис. 9.10). Цветовая гамма шва отвечает цветовой шкале **Кас. напряжения МПа**, расположенной в левой верхней части окна. Видно, что наиболее нагруженными частями

Рис. 9.10.
Карта напряжений
сварного шва
для стержня Rod 6



сварного шва являются нижний и угловой участки, в то время как верхний участок наименее нагружен.

Аналогичные результаты можно получить по всем слоям (сварным швам). Анализ полученных результатов расчета позволит осознанно подойти к выбору формы соединительной пластины и конфигурации сварных швов и тем самым оптимизировать проектируемую конструкцию.

9.1.4. Проверочный расчет

В ходе *проверочного расчета* прочность сварного шва анализируется не только в условиях статического нагружения, как это происходит при проектировочном расчете, но и в условиях действия переменных нагрузок. Для выполнения проверочного расчета должна быть задана полная геометрия сварных швов — величины катетов и расположение сварных швов, материал соединяемых деталей; кроме того, для определения коэффициента запаса по усталостной прочности требуется задать минимальное значение действующих на элементы соединения нагрузок. Расчет по усталости ведется при числе циклов нагружения, превышающем базовое, т.е. в условиях длительной усталостной прочности.

Кроме того, в результате проверочного расчета можно получить значение коэффициента запаса по текучести.

Для перехода в режим проверочного расчета в меню **Расчет/Тип** выбираем **Проверочный**. При этом открывается окно, аналогично тому, с которым мы работали при проведении проектировочного расчета, с изображением конфигурации сварного шва. Значения сил также автоматически переносятся из проектировочного расчета, но с одной особенностью — для выполнения проверочного расчета нужно задать дополнительные параметры, а именно минимальные значения внутренних силовых факторов, зависящие от конкретной расчетной схемы (по умолчанию эти параметры равны нулю). Получить

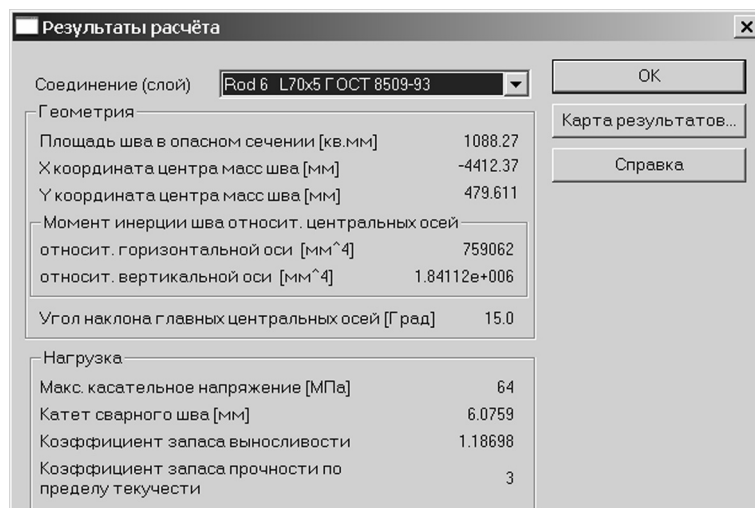


Рис. 9.11.
Диалоговое окно
Результаты расчета
с результатами
проверочного расчета

эти значения можно, выполнив повторный прочностной расчет модели, но с учетом только ее собственного веса, т. е. при отсутствии нагрузки на конце горизонтальной штанги. Определив в результате такого расчета значения минимальных силовых факторов, нужно записать их в соответствующие поля ввода проверочного расчета.

Редактирование силовых факторов выполняется по правилам, описанным в п. 9.1.1.

Запуск на расчет и анализ результатов проверочного расчета производится аналогично подобным операциям проектировочного расчета (см. п. 9.1.3). Диалоговое окно **Результаты расчета** с результатами выполнения проверочного расчета изображено на рис. 9.11.

Анализируя результаты расчета на выносливость каждого из сварных швов, которыми соответствующие стержни привариваются к пластине, видим, что коэффициент запаса по текучести равен 3, а коэффициент запаса по выносливости — 1,19, что ниже заданных по условию требований. Следовательно, величины катетов всех сварных швов необходимо увеличить. Сделать это можно следующим образом:

- в меню **Данные** выбираем **Дополнительные параметры....**, открывая тем самым одноименное диалоговое окно (рис. 9.12);
- из выпадающего списка **Соединение (слой)** этого диалога выбираем один из входящих в соединение стержней — в рассматриваемом случае это Rod 6;
- в поле ввода **Катет шва (mm)** записываем новое значение катета сварного шва, превышающее прежнее значение 6,08 мм — например, 8 мм;
- величину эффективного коэффициента концентрации напряжений оставляем заданной по умолчанию, а именно равной 3.

Выполнив повторный расчет, получаем, что для стержня Rod 6 коэффициент запаса по текучести стал равным 3,95, а коэффициент запаса по выносливости — 1,56. Следовательно, необходимые по условию требования по коэффициентам запаса можно считать выполненными.

Аналогичную операцию проводим для каждого из сварных швов.

9.2. Особенности расчета соединения с использованием болтов или заклепок

Для соединения стержневых элементов в узел вместо сварного можно использовать болтовое или заклепочное соединения. Если болты установлены с зазором, то кроме сдвигающей нагрузки они могут воспринимать и отрывающие усилия. Заклепки и установленные без зазора болты способны воспринимать только касательные силы и моменты, лежащие в плоскости стыка.

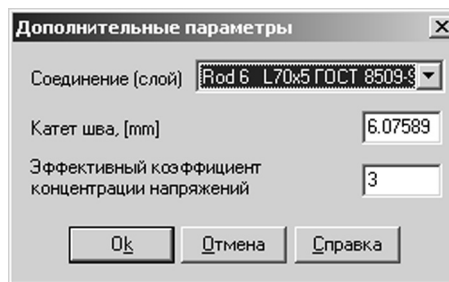


Рис. 9.12. Диалоговое окно **Дополнительные параметры**

В примере, рассмотренном в п. 9.1, анализировалась плоская рама, нагруженная действующими в ее плоскости силовыми факторами. Если отрывающие усилия, перпендикулярные плоскости рамы, отсутствуют, то в этой раме можно устанавливать болты без зазора или заклепки. В противном случае соединение необходимо осуществлять болтами с зазором или с помощью сварки.

Для того чтобы после конечно-элементного анализа плоской рамы в APM Structure3D передать в APM Joint модель соединения в узле для дальнейшего расчета, необходимо воспользоваться одной из следующих кнопок панели **Соединение** модуля APM Structure3D:

- **Болтовое соединение без зазора**  (меню **Расчеты/Болтовое соединение без зазора**);
- **Болтовое соединение с зазором**  (меню **Расчеты/Болтовое соединение с зазором**);
- **Заклепочное соединение**  (меню **Расчеты/Заклепочное соединение**).

Выбрав тип соединения стержневых элементов центрального узла, получаем его схематическое изображение после передачи в модуль APM Joint, аналогичное приведенному на рис. 9.4.

Затем следует схематически изобразить расположение болтов/заклепок, с помощью которых обеспечивается соединение стержней друг с другом или со вспомогательной пластиной, и поместить картину распределения соединительных элементов для каждого из стержней в соответствующий ему слой. Далее задаются материалы болтов/заклепок и коэффициент запаса по статике, а затем проводится проектировочный расчет, в котором вместо катера сварного шва рассчитывается диаметр наиболее нагруженного болта/заклепки, сила затяжки болта и т. п. В ходе проверочного расчета проверяется работоспособность болтового/заклепочного соединения при работе на переменную нагрузку и определяется коэффициент запаса на выносливость.