



В.Н. ЕМЕЛЬЯНОВ, С.О. ЗДОРОВЕНИН, С.С. КРАЕВ

ANSYS - ПРАКТИКУМ

Учебное пособие
Версия 1.02 от 29.08.2005

Санкт-Петербург
2005

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Пакет ANSYS. Структура и возможности	5
1.1. Структура и интерфейс пакета	5
1.2. Сведения из теории	8
1.2.1. Матричная форма записи основных соотношений теории упругости	8
1.2.2. Основные этапы решения задач с применением метода конечных элементов	10
1.2.3. Типы конечных элементов	11
1.2.4. Построение геометрической модели в пакете ANSYS	12
1.2.5. Создание расчетной сетки	13
1.3. Демонстрационные задачи	14
1.4. Задания для самостоятельной проработки	20
Список использованных источников	27

ВВЕДЕНИЕ

На данном этапе развития вычислительных технологий и программного обеспечения все более и более широко используемыми становятся коммерческие пакеты прикладных программ для расчета механики конструкций. Подобные пакеты уже сейчас включают в себя весьма широкий спектр задач: статический и динамический анализ, исследование таких характеристик конструкций как прочность, жесткость, собственные частоты. Это позволяет использовать их для ускорения процесса проектирования новых технических устройств, оптимизации уже существующих. Данная работа предоставляет возможность ознакомиться с одним из подобного рода программных продуктов, пакетом ANSYS. Объясняются некоторые общие подходы к моделированию механики конструкций, получению и обработке результатов. Представлены сведения из теории динамики и прочности конструкций. Для методической проработки предложена серия соответствующих задач. Каждый раздел иллюстрируется тестовой задачей с описанием шагов, необходимых для ее постановки в пакете.

За основу принята обучающая версия ANSYS Educational 6.1, имеющая ограничение на количество расчетных узлов. Максимально возможное число узлов 1000 вполне позволяет ознакомиться со структурой пакета, основными возможностями моделирования механики твердого и деформируемого тела. Дополнительно включены более интересные работы, решение которых требует полной версии пакета ANSYS.

Современные информационные технологии предоставили новые возможности для освоения знаний и проведения учебной работы. Наличие у каждого обучающегося персонального компьютера становится не исключением, а нормой. Это определяет новые подходы к обеспечению учебного процесса.

Одним из вариантов новых учебных технологий, ориентированных на широкое использование электронных средств, являются электронные средства обучения. На этом поле можно представить широкий набор средств и вариантов их применения. Однако, чрезмерное стремление повысить роль «электронного брата» может сыграть и негативную роль в учебном процессе. Для творческой личности характерно стремление к самостоятельности и самоопределению, и жесткие рамки некоторых директивных учебных программ становятся обременительными и тягостными.

Методология включения электронных средств в учебный процесс еще не разработана в полной мере. Нам представляется, что на данном этапе актуальным является предоставление студенту необходимой учебной информации в достаточно полном объеме. Этой задаче и отвечает серия учебных пособий, предоставляемая в рамках настоящей электронной библиотеки.

Электронный формат методических материалов предполагает достаточно гибкую возможность их усовершенствования. Каждая новая редакция издания оперативно помещается в электронную библиотеку и становится доступной для пользователей.

Для предоставления материалов обучающемуся используется формат переносимых документов – pdf – portable document format. Этот формат читается общедоступной программой Acrobat Reader.

Методические материалы обеспечивают самостоятельную работу по курсу "Динамика и прочность конструкций".

Замечания и предложения следует направлять по адресу cmdsem@bstu.spb.su

ПАКЕТ ANSYS. СТРУКТУРА И ВОЗМОЖНОСТИ

Предлагаемый к рассмотрению конечно-элементный пакет ANSYS является мультифизическим, что означает возможность моделирования в нем разного рода физических явлений, таких как газовая динамика, механика твердого и деформируемого тела, магнитогидродинамика, ионная оптика, электротехника и некоторых других. Часть из этих явлений может быть промоделирована совместно, например механика деформируемого тела и газовая динамика.

1.1. Структура и интерфейс пакета

ANSYS включает в себя все средства, необходимые для моделирования: препроцессор, модуль решения и постпроцессор. В зависимости от характера задачи структура пакета автоматически изменяется для предоставления пользователю необходимых средств.

Препроцессор представляет из себя набор инструментов, позволяющих создавать геометрическую модель, сеточный генератор и средства постановки задачи. Модуль решения является полностью автоматическим и в процессе работы не требует вмешательства пользователя. Постпроцессор предлагает такие возможности как вывод графической информации о полях параметров, автоматизированное создание отчетов, анализ интегральных и точечных характеристик, экспортирование результатов в специализированные пакеты, например TecPlot.

Несмотря на то, что программа ANSYS располагает богатыми и сложными возможностями, ее организационная структура и “дружественный” графический интерфейс пользователя (GUI) делают изучение и применение программы очень удобным. Интерфейс пакета адаптирован к работе в среде Microsoft Windows и поддерживает основные версии операционной системы: 2000, XP, NT4.0, Millennium Edition (рис. 1.1).

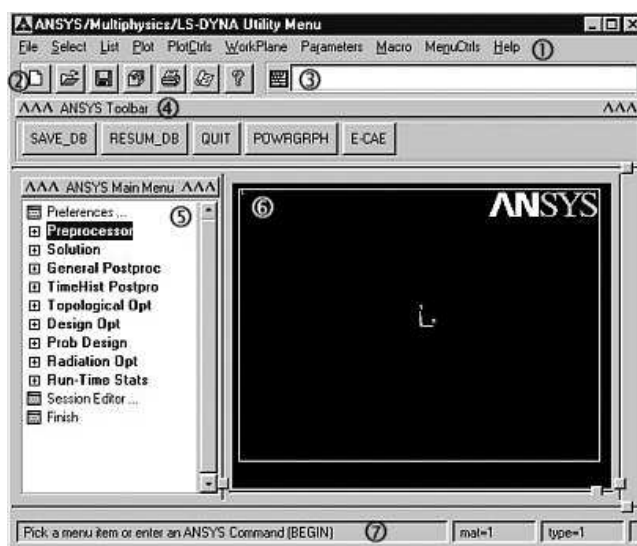


Рис. 1.1. Интерфейс пакета ANSYS6.1ED

- 1) Utility Menu — содержит сервисные функции, доступные в течение всего времени работы, такие как работа с файлами, выбор объектов, и т. д. Также через это меню производится выход из пакета.

- 2) Standard Toolbar — графические кнопки наиболее часто используемых команд.
- 3) Input Window — позволяет работать с ANSYS путем непосредственного набора команд. Все набранные команды сохраняются в истории.
- 4) ANSYS Toolbar — настраиваемая панель управления, на которую можно размещать кнопки наиболее часто используемых команд.
- 5) Main Menu — содержит первичные функции ANSYS, организованные процессорами (препроцессором, решателем, постпроцессором и т. д.)
- 6) Graphics Window — окно, в котором происходит графическое отображение информации.
- 7) Status and Prompt Area — строка, расположенная внизу GUI, показывает информацию о запрашиваемых действиях и статус анализа. Как правило, там отображаются запросы функций, которым требуется графический выбор. Необходимо прочитать запрос, так как он поможет выбрать надлежащие объекты.
- 8) Output Window — окно для вывода сообщений ANSYS.

Utility Menu содержит 10 тем:

- File — содержит функции работы с файлами базами данных, а также команду выхода из пакета.
- Select — функции, позволяющие производить выбор объектов и создавать компоненты.
- List — позволяет вывести список данных фактически по любым объектам сохраненным в базе данных. Также можно просмотреть лог-файл, файл ошибок и т.д.
- Plot — позволяет выбирать объекты для графического отображения.
- PlotCtrls — включает функции, которые управляют представлением, стилем, и другими характеристиками графического отображения объектов.
- WorkPlane — позволяет создавать, удалять и переключать системы координат.
- Parameters — позволяет определять, редактировать, и удалять скалярные параметры и массивы.
- Macro — позволяет выполнять блоки данных и макросы. Вы можете также создавать, редактировать, и удалять сокращения, которые появляются как кнопки на ANSYS Toolbar.
- MenuCtrls — позволяет переключаться между стандартным ANSYS Toolbar и Mechanical Toolbar. Пункт 'Save Menu Layout' сохраняет текущую конфигурацию GUI, включая все меню, расположение окон и т.д.
- Help — вызывает систему помощи ANSYS.

Standard Toolbar (рис. 1.2) включает в себя 7 кнопок:

- New Analysis — сохраняет и очищает всю информацию по текущему анализу и начинает новый.
- Open ANSYS File — читает входные файлы баз данных ANSYS.
- Save Model — сохраняет текущий анализ в базу данных.
- Pan-Zoom-Rotate — открывает диалог “Pan-Zoom-Rotate”
- Image Capture — распечатывает текущее изображение в Graphics Window.
- Report Generator — показывает отчет, сгенерированный GUI.
- Context Help — показывает оглавление для справки по ANSYS.



Рис. 1.2. Внешний вид стандартной панели инструментов

Main Menu (Главное Меню) содержит главные функции препроцессора, решателя и постпроцессора ANSYS. Все функции в главном меню являются "модальными" друг относительно друга; то есть необходимо закончить одну функцию перед стартом следующей.

Главное Меню имеет древовидную структуру (рис. 1.3).

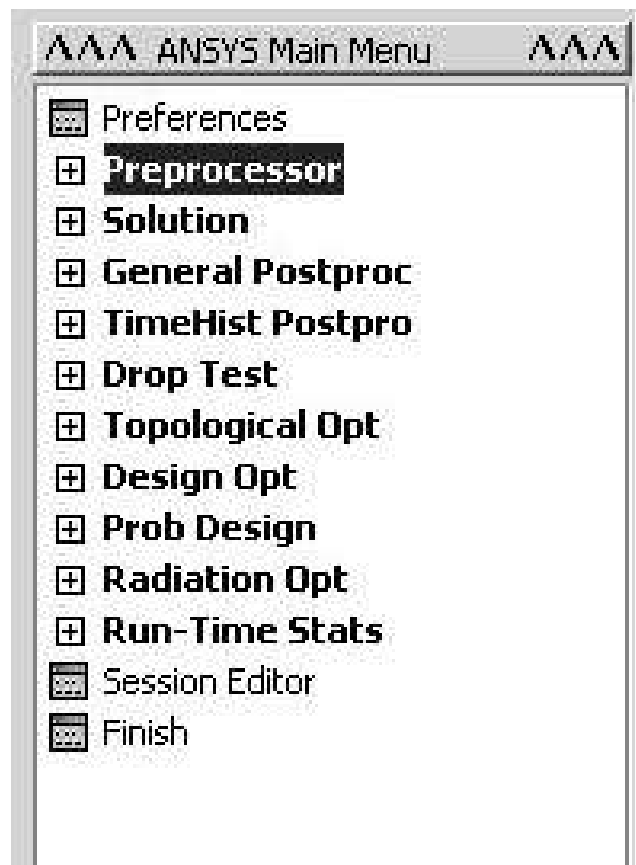


Рис. 1.3. Внешний вид стандартной панели инструментов

Каждый пункт меню в нем либо раскрывается, либо выполняет определенное действие. Меню состоит из трех команд и 10 подменю:

- Preferences — эта команда открывает окно, позволяющее изменить содержание подпунктов главного меню в зависимости от типа решаемой задачи.
- Preprocessor — открывает подменю препроцессора, включает функции построения модели, сетки и т.д.
- Solution — открывает подменю решателя, содержит функции выбора типа анализа, опций решателя и запуска анализа.
- General Postproc — входит в общий постпроцессор, предоставляет функции для отображения результатов расчета.
- TimeHist Postpro — запускает постпроцессор для нестационарных задач, позволяет делать просмотр нестационарных переменных. Включает в себя такие функции как определение, вывод и графическое отображение переменных.
- Design Opt — открывает функции отвечающие за оптимизацию (определение переменных оптимизации, старт управляемой оптимизации и т. д.)
- Prob Design — открывает PDS процессор.
- Radiation Matrix — открывает функции для определения излучений.
- Run-Time Stats — открывает модуль статистики.
- Session Editor — открывает редактор текущей сессии.
- Finish — выходит из текущего процессора и закрывает все раскрытые подменю.

1.2. Сведения из теории

1.2.1. Матричная форма записи основных соотношений теории упругости

В результате воздействия на тело внешних нагрузок и температуры его точки могут переместиться относительно друг друга в новые положения. В этом случае вектор перемещения для трехмерной задачи можно записать следующим образом:

$$\{u\} = \{u_x, u_y, u_z\},$$

где u_x , u_y , u_z (или соответственно u , v , w) — проекции вектора перемещений на координатные оси x , y , z соответственно.

Для двумерной задачи вектор перемещений имеет два компонента:

$$\{u\} = \{u_x, u_y\}.$$

Здесь и далее фигурными скобками $\{\dots\}$ обозначается вектор-столбец (для экономии места он иногда будет записываться в строчку). Квадратными скобками $[\dots]$ обозначаются квадратные и прямоугольные матрицы.

Разность перемещений двух соседних точек вызывает деформации в материале и связанные с ними напряжения.

В общем случае, деформации и напряжения в материале конструкции состоят из шести компонентов (рис. 1.4): $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ — для напряжений и $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ — для деформаций.

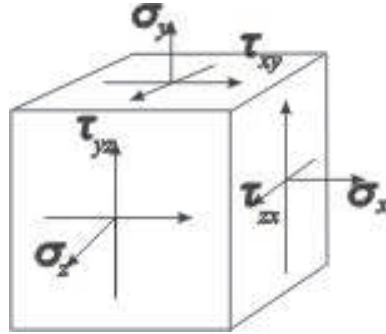


Рис. 1.4.

Для двумерных задач имеем $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ($\varepsilon_z \neq 0$). Такое состояние называют плоским напряженным.

Для упругих изотропных материалов можно записать:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} \quad (1.1)$$

или $\{\varepsilon\} = [E]^{-1}\sigma + \varepsilon_0$, где ε_0 — начальные деформации, E — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона, G — модуль сдвига. Из теории сопротивления материалов известно, что

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Решив систему уравнений (1.1), получим зависимость напряжений от деформаций:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu)/2 \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} \right)$$

или $\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} + \{\sigma_0\}$, где $\{\sigma_0\} = -[E]\{\varepsilon_0\}$ — начальные напряжения.

Приведенные выше формулы справедливы для случая плоского напряженного состояния. При плоской деформации выражения для постоянного материала в формулах необходимо заменить на следующие выражения:

$$E \rightarrow \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad \nu \rightarrow \frac{\nu}{1 - \nu}, \quad G \rightarrow G.$$

Подставив эти выражения в предыдущую систему, получим

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} \right)$$

Начальные напряжения вследствие изменения температуры определяются по формуле:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ 0 \end{Bmatrix},$$

где α — коэффициент термического расширения, ΔT — изменение температуры. Следует отметить, что если температурные деформации не стеснены, то при изменении температуры в конструкции не возникают упругие термические напряжения.

Для малых деформаций и смещений имеют место следующие зависимости: $\varepsilon_x = \partial u / \partial x$, $\varepsilon_y = \partial v / \partial y$, $\gamma_{xy} = \partial u / \partial y + \partial v / \partial x$, или в матричной форме:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}, \text{ или } \{\varepsilon\} = [D]\{u\}.$$

Согласно теории упругости, напряжения в элементе объема должны удовлетворять следующим уравнениям равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + f_x &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + f_y &= 0, \end{aligned}$$

где f_x , f_y — объемная сила (например, сила тяжести) на единицу объема.

Что касается задания граничных условий, то в методе конечных элементов все виды нагрузок (распределенные поверхностные нагрузки, объемные силы, сосредоточенные силы и моменты и др.) приводятся к сосредоточенным силам, действующим в узлах.

1.2.2. Основные этапы решения задач с применением метода конечных элементов

Модель конструкции сложной формы согласно МКЭ (метода конечных элементов) подразделяется на более мелкие части (конечные элементы) сравнительно простой формы, в пределах которых ищется приближенное решение. Результатом такого моделирования обычно является поле напряжений и смещений в целой конструкции.

Решение задачи с применением МКЭ состоит из следующих основных этапов:

- 1) идентификация задачи, создание чертежа конструкции и нагрузок;
- 2) создание геометрии модели, пригодной для МКЭ;
- 3) разбиение модели на сетку конечных элементов;
- 4) приложение к модели граничных условий (закрепление на границе или граничные нагрузки);
- 5) численное решение системы уравнений (с помощью вычислительных средств);
- 6) представление и анализ результатов.

Наиболее трудоемким из перечисленных этапов является построение конечно-элементной модели (расчетной сетки), так как далеко не во всех случаях автоматическое построение будет характеризовать задачу и рассматриваемые физические процессы.

Иногда целесообразным представляется пропустить некоторые этапы. Например, для конструкций простой формы выполнение чертежа может не потребоваться.

1.2.3. Типы конечных элементов

Как следует из основной концепции МКЭ, вся модель конструкции (или отдельной ее части) делится на множество конечных элементов, соединенных между собой в вершинах (узлах). Силы приложены к узлам. Конечный элемент не является “абсолютно жестким” телом.

Конечно-элементная модель предполагает, что напряжения и деформации имеются и вне данного конечного элемента.

Достоверность расчетов по МКЭ зависит от многих факторов, в том числе и от количества элементов. Однако, если напряжения не меняются значительно в пределах модели, то количество конечных элементов несущественно влияет на точность вычисления напряжений.

Конечные элементы могут быть линейными (элементы первого порядка) или параболическими (элементы второго порядка). Линейные элементы имеют прямые стороны и узлы только в углах. Таким образом, минимальное число узлов трехмерного элемента равно 4. Параболические элементы могут иметь промежуточный узел вдоль каждой из сторон. Именно благодаря этому стороны элемента могут быть криволинейными (параболическими). При равном количестве элементов параболические элементы дают большую точность вычислений, т. к. они более точно воспроизводят криволинейную геометрию модели и имеют более точные функции формы (аппроксимирующие функции).

В процессе создания конечно-элементной модели следует обращать внимание на соотношения между сторонами элемента. “Длинные” элементы с соотношением сторон 2 и более можно использовать, если не ожидаются большие градиенты смещений, деформаций и напряжений, т. е. вдали от зоны действия концентраторов напряжений.

В пакете ANSYS имеется два основных метода построения сетки: построение произвольной сетки построение упорядоченной сетки.

Произвольная сетка строится автоматически, при этом соседние элементы могут существенно отличаться по размерам. Упорядоченная сетка строится путем деления геометрических элементов модели на некоторые характерные части, для которых впоследствии создаются индивидуальные сетки (обычно H или O типа).

Практика расчетов с применением МКЭ позволяет дать следующие рекомендации:

- 1) линейные элементы требуют более частой сетки, чем квадратичные элементы (с одним промежуточным узлом) или кубические (с двумя промежуточными узлами);
- 2) упорядоченная сетка является более предпочтительной, чем произвольная сетка;
- 3) прямоугольная сетка с 4 узлами более чем сетка с треугольными элементами;
- 4) сетка треугольных элементов с промежуточными узлами имеет, по крайней мере, ту же самую точность, что и сетка прямоугольных элементов с 4 узлами;
- 5) прямоугольная сетка с 8 узлами является более предпочтительной, чем сетка треугольных элементов с промежуточными узлами, несмотря на больший размер прямоугольных элементов;
- 6) аппроксимация смещений кубическими полиномами не требует более мелкой сетки.

Стержневой элемент

Представляет из себя стержень постоянного сечения, воспринимающий только осевую нагрузку. В тех случаях, когда по условиям задачи требуется учесть распределенную

нагрузку, действующую вдоль оси стержня, необходимо заменить ее эквивалентными сосредоточенными силами, приложенными к узлам элемента. Характеризуется длиной L , площадью поперечного сечения и модулем упругости материала E . В пакете ANSYS такого рода элементами являются LINK1, LINK8 — общего назначения, LINK10 — билинейные.

Балочный элемент

Используется для моделирования упругих одномерных элементов конструкций, несущих изгибающую нагрузку. Характеристиками этого типа конечных элементов являются длина элемента L , момент инерции площади поперечного сечения I и модуль упругости E . Узлы элемента i и j имеют, как минимум, две степени свободы: прогиб ν и угол поворота сечения относительно оси z $\theta = \partial\nu/\partial x$. В пакете ANSYS такого рода элементами являются BEAM3, BEAM4 — общего назначения, BEAM54, BEAM44 — конические, BEAM23, BEAM24 — пластически деформируемые, BEAM188, BEAM189 — работающие на сдвиг.

Плоские конечные элементы

Треугольный плоский элемент имеет 6 узлов, пронумерованные против часовой стрелки. Каждый узел имеет две степени свободы (по осям x и y). Четырехугольный плоский элемент имеет 8 узлов. В качестве подобного элемента пакете ANSYS может выступать PLANE82, имеющий 8 узлов, что делает его пригодным для создания сетки как на основе квадратных, так и треугольных конечных элементов. В случае треугольных элементов 3 из 8 узлов объединяются в один. В зависимости от характера задачи также могут использоваться следующие типы элементов: PLANE42, PLANE182 — четырехугольные общего назначения, PLANE2 — треугольный общего назначения, HYPER84, HYPER56, HYPER74, VISCI88 — гиперупругие, VISCO106 — вязкоупругий, VISCO108, PLANE 145 — с большими деформациями, PLANE146 — P-элементы (полиномиальные).

Объемные конечные элементы

Чаще всего это пирамиды и восьмиугольники. Как и для плоских элементов, анализ для объемных пирамид и восьмиугольников может проводиться на одних и тех же конечных элементах ANSYS. Оставшиеся узлы сливаются в один. Необходимо отметить, что использовать линейные конечные элементы в форме пирамид, полученные подобным образом, не рекомендуется, что связано с увеличением ошибок счета. Вот несколько примеров элементов для различных типов задач: SOLID45, SOLID95, SOLID73, SOLID185 — прямоугольные параллелепипеды общего назначения, SOLID92, SOLID72 — тетраэдры общего назначения, HYPER86, HYPER58, HYPER158 — вязкоупругие, SOLID147 — для расчета больших деформаций, SOLID148 — P-элементы.

1.2.4. Построение геометрической модели в пакете ANSYS

ANSYS предоставляет пользователям три метода создания геометрических моделей:

- импорт модели из внешних CAD/CAE систем;
- непосредственное моделирование;
- твердотельное моделирование.

Пакет ANSYS поддерживает основные форматы передачи данных между CAD/CAE системами: SAT/ACIS, Unigraphics, CATIA, Parasolid, Pro/ENGINEER. Если пакет, в котором производилось геометрическое моделирование, поддерживает создание сетки, существует возможность ее импортирования. Качественная передача данных между пакетами является нетривиальной задачей по причине отсутствия унификации методов построения

и хранения геометрической информации. В данной работе рассматриваются лишь методы создания модели внутри пакета ANSYS.

Непосредственное моделирование заключается в указании положения всех необходимых узлов и элементов. Хотя в инструментарии пакета ANSYS содержится достаточное количество методов, таких как копирование, отображение, масштабирование и т. д. как отдельных узлов, так и их наборов, данный подход в десятки раз медленнее твердотельного моделирования.

Твердотельное моделирование можно разделить на две основные части: создание геометрии снизу вверх и сверху вниз. В первом случае сначала описываются низкоуровневые примитивы (узлы, линии и т. п.), затем на их основе более высокоуровневые (поверхности и объемы). Во втором случае создание геометрии начинается с описание высокоуровневых примитивов, таких как конусы, параллелепипеды, цилиндры и т. п. ANSYS автоматически создает для введенных примитивов все необходимые низкоуровневые элементы (линии, поверхности, точки). Данные варианты не являются взаимоисключающими и обычно дополняют друг друга.

Дополнительным инструментом геометрического моделирования является использование булевых операций над примитивами: сложение, вычитание, пересечение и некоторые другие.

Для выполнения представленных ниже работ предлагается использовать твердотельное моделирование снизу вверх (сверху вниз, где это необходимо) с использованием булевых операций. Перед выполнением индивидуальных заданий рекомендуется пройти соответствующие демонстрационные примеры.

1.2.5. Создание расчетной сетки

В зависимости от характера задачи и сложности модели используют автоматическое либо ручное создание сетки. И в том и в другом случае следует задать желаемый размер ячеек. Обычно устанавливается минимальный размер.

Как уже говорилось выше, создание упорядоченной сетки является более предпочтительным подходом, позволяющим быстрее получить качественный результат. Однако это сопряжено с необходимостью хорошо знать задачу, представлять характер получаемых данных. Поэтому зачастую для предварительных расчетов используют автоматическое создание неструктурированной сетки. Для этого в пакете ANSYS используется инструмент наилучшего подбора размеров ячеек (SmartSizing).

Для того, чтобы воспользоваться инструментом автоподбора размеров ячеек, достаточно задать минимально допустимое значение. После этого ANSYS автоматически создаст сетку, определяя размеры исходя из геометрических характеристик модели.

Если построенная сетка не удовлетворяет вашим требованиям, либо требуется получить структурированную сетку, целесообразно задать вручную положение и размеры отдельных узлов. Для этого в пакете ANSYS существует возможность для таких элементов как линии, поверхности и объемы задавать индивидуальные размеры ячеек. Кроме того, любой примитив может быть разбит на несколько и для каждого из них устанавливается свой размер ячеек. После этого пакет с помощью встроенных алгоритмов попытается создать сетку, удовлетворяющую определенным вами параметрам.

Возможно также совместное использование обоих подходов. Первым этапом выступает задание желательных размеров примитивов, затем применяется создание сетки с автоподбором размеров.

1.3. Демонстрационные задачи

Задача 1. Структурный анализ уголка

Проведем простейший линейный статический анализ плоского уголка. Геометрическая модель представлена на рис. 1.5.

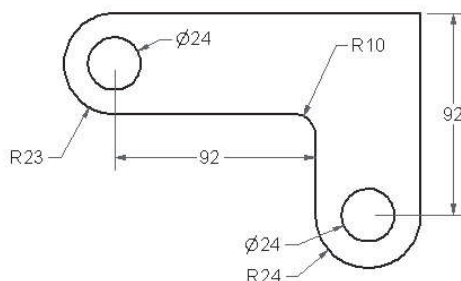


Рис. 1.5. Уголок

Уголок изготовлен из стали с модулем упругости $2.1 \cdot 10^6$ кГ/см² и коэффициентом Пуассона, равным 0.27.

Предполагается, что все напряжения, действующие в направлении, перпендикулярном плоскости уголка, равны нулю. Ими можно пренебречь, так как толщина уголка существенно меньше размеров в рассматриваемой плоскости.

1. Построение геометрии

В данном случае используется твердотельное создание модели, так как ее форма полностью описывается совокупностью прямоугольников и окружностей. Выбираем положение центра системы координат. Так как это не принципиально, возьмем в качестве него центр левого отверстия уголка. Положение центра системы координат никак не влияет на работу пакета при проведении анализа, поэтому просто начинаем создавать прямоугольники. Но перед этим установим единицы измерения, соответствующие системе СИ:

Main Menu → **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Areas** → **Rectangle** → **By Dimensions**

В диалоговом окне вводим размеры прямоугольника:

X1 = 0 **X2 = 0.14**
Y1 = -0.024 **Y2 = 0.024**

и создаем прямоугольник нажатием на кнопку **Apply**.

Примечание: Удобно пользоваться клавишей Tab для перехода на следующую позицию в диалоговом окне.

Второй прямоугольник:

X1 = 0.092 **X2 = 0.14**
Y1 = -0.068 **Y2 = 0.024**

Создаем прямоугольник и выходим из диалога нажатием **OK**.

Для того, чтобы проще различать поверхности, которыми являются созданные прямоугольники, можно включить отображение номеров и цветов поверхностей. С помощью диалогового окна "Plot Numbering Controls", доступного из меню утилит (Utility Menu) контролируется способ отображения элементов в графическом окне.

Включаем отображение цветов и номеров поверхностей:

Utility Menu → **PlotCtrls** → **Numbering**

Отмечаем нумерацию поверхностей (**area numbers**).

Подтверждаем выбор и выходим из диалога нажатием **OK**.

Перед переходом к следующему этапу сохраняем проект:

Изменяем имя проекта: **Utility Menu** → **File** → **Change Jobname...**

Вводим имя проекта: **demo1**

Подтверждаем изменение имени: **OK**

Сохраняем проект: **Utility Menu** → **File** → **Save as Jobname.db**

Примечание: если текущие результаты моделирования не устраивают, всегда можно вернуться к сохраненному проекту:

Utility Menu → *File* → *Resume Jobname.db...* для текущего проекта,

Utility Menu → *File* → *Resume from...* для проекта с другим именем.

Цель следующих шагов в создании полукругов с обеих сторон уголка. На самом деле создаются полные круги, а затем они склеиваются булевой операцией (add). Но перед началом для удобства рекомендуется уменьшить изображение на экране:

Откройте окно управления изображением:

Utility Menu → **PlotCtrls** → **Pan, Zoom, Rotate**

Щелкните по кнопке с изображением маленькой точки.

Закройте диалог, нажав **Close**.

Отобразите рабочую систему координат:

Utility Menu → **WorkPlane** → **Display Working Plane**

Обратите внимание, что появилось изображение рабочей системы координат в виде символов WX и WY. В данный момент рабочая (далее РСК — рабочая система координат) система координат совпадают с глобальной (символы X и Y). Теперь изменим РСК на полярную, зададим новое значение шага привязки и отобразим сетку координатных линий:

Открываем диалог настроек ЛСК:

Utility Menu → **WorkPlane** → **WP Settings**

Выбираем полярную РСК (**Polar**).

Выбираем отображение сетки и триады (**Grid and Triad**).

Введем **.1** (или **0.1**) в поле шага привязки (**Snap increment**),

0.001 в поле **Spacing**,

0.02 в поле **Radius**,

0.001 в поле **Tolerance**.

Нажимаем **OK**, принимая изменения и закрывая окно.

Создаем окружность:

Main Menu → **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Areas** → **Circle** → **Solid Circle**

Перед тем, как сделать следующие шаги, прочтите их все до конца абзаца. Поместите указатель мыши в графическом окне на центр системы координат. Щелкните на начало координат. Отведите указатель (с отпущенными кнопками мыши!) в любую сторону от центра РСК. При этом будет отображаться окружность с указанным на ней радиусом. Зафиксируйте необходимый радиус **0.024** щелчком мыши.

Нажимаем **OK** для закрытия диалога.

Для создания второго круга воспользуемся альтернативным способом.

Открываем диалог создания окружности:

Main Menu → **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Areas** → **Circle** → **Solid Circle**

Задаем положение и размеры вручную.

WP X: 0.116

WP Y:-0.068

Radius: 0.024

Подтверждаем создание: **ОК**.

Следующим шагом склеиваем полученные примитивы в одну поверхность. Диалог булевой операции склеивания поверхностей:

Main Menu → **Preprocessor** → **Modeling** → **Operate** → **Booleans** → **Add** → **Areas**

Выбираем все поверхности (**Pick all**).

Сохраняем проект: **Utility Menu** → **File** → **Save as Jobname.db**

Отменяем отображение РСК:

Utility Menu → **WorkPlane** → **Display Working Plane**

Отменяем нумерацию поверхностей и задаем нумерацию линий:

Utility Menu → **PlotCtrls** → **Numbering**

Выбираем нумерацию линий (**line numbering**) и сбрасываем выделение с нумерации поверхностей (**area numbering**).

Создаем скругление внутреннего угла уголка:

Main Menu → **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Lines** → **Line Fillet**

С помощью мыши выбираем линии **18** и **24** и подтверждаем выбор **ОК**.

Задаем радиус скругления: **0.01**

Подтверждаем создание и закрываем диалог: **ОК**.

Перерисовываем линии в графическом окне:

Utility Menu → **Plot** → **Lines**

Для удобства дальнейшей работы увеличим интересующую нас область:

Utility Menu → **PlotCtrls** → **Pan, Zoom, Rotate**

Нажимаем **Zoom**.

Помещаем указатель мыши в графическом окне на центр полученного скругления, щелкаем левой кнопкой мыши для фиксации центра увеличения, отводим указатель мыши до положения, в котором прямоугольник увеличения имеет нужный нам размер, и снова нажимаем левую кнопку мыши для увеличения.

Примечание: если результат увеличения не подходит, можно воспользоваться кнопкой возврата к предыдущему состоянию:

Utility Menu → *PlotCtrls* → *Pan, Zoom, Rotate* → *Back up*.

Создаем поверхность для области скругления:

Main Menu → **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Areas** → **Arbitrary** → **By Lines**

Выбираем мышью линии **3**, **4** и **1**,

подтверждаем создание **ОК**.

Закрываем диалог **Close**.

Сбрасываем увеличение

Utility Menu → **PlotCtrls** → **Pan, Zoom, Rotate** → **Fit**.

Отменяем нумерацию линий:

Utility Menu → **PlotCtrls** → **Numbering**

Сбрасываем выделение с нумерации линий (**line numbering**).

Перерисуем поверхности:

Utility Menu → **Plot** → **Areas**

Сохраняем проект: **Utility Menu** → **File** → **Save as Jobname.db**

Склеиваем полученные поверхности:

Main Menu → **Preprocessor** → **Modeling** → **Operate** → **Booleans** → **Add** → **Areas**

Выбираем все поверхности: **Pick All**.

Создаем первое отверстие:

Main Menu → **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Areas** → **Circle** → **Solid Circle**

Задаем положение и размеры вручную.

WP X: 0

WP Y: 0

Radius: 0.012

Подтверждаем создание: **OK**.

Создаем второе отверстие:

Main Menu → **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Areas** → **Circle** → **Solid Circle**

Задаем положение и размеры вручную.

WP X: 0.116

WP Y: -0.068

Radius: 0.012

Подтверждаем создание: **OK**.

Вырезаем поверхности отверстий из поверхности уголка:

Main Menu → **Preprocessor** → **Modeling** → **Operate** → **Booleans** → **Subtract** → **Areas**

В графическом окне выбираем основную поверхность из которой происходит вычитание остальных и подтверждаем выбор **Apply**. Выбираем площади отверстий и подтверждаем операцию **OK**.

Сохраняем проект: **Utility Menu** → **File** → **Save as Jobname.db**

2. Выбор материалов

Выбираем тип анализа:

Main Menu → **Preferences**

Выбираем структурный анализ (**structural**).

Выбираем материал:

Main Menu → **Preprocessor** → **Material Props** → **Material Models**

В правой части открывшегося окна выбираем последовательно

Structural, Linear, Elastic, Isotropic.

При двойном нажатии на **Isotropic** откроется диалог со свойствами материала. Назначаем модуль упругости и коэффициент Пуассона:

EX: 21e5.

PRXY: .27

Подтверждаем изменения и закрываем диалог: **OK**.

Закрываем окно выбора материалов: **Material** → **Exit**.

Выбор элементов.

В любом анализе необходимо назначить тип элементов, из которых состоит расчетная сетка. В данном случае будем использовать плоский четырехугольный квадратичный структурный элемент **PLANE82**. Для анализа понадобится назначить толщину элемента, что является одним из параметров **PLANE82**.

Добавляем тип элемента:

Main Menu → **Preprocessor** → **Element Type** → **Add/Edit/Delete**

Нажимаем кнопку **Add...** (добавить).

В открывшемся диалоге в левом окне выбираем **Structural Solid**, в правом **Quad 8node 82**.

Подтверждаем выбор и закрываем диалог: **OK**.

В диалоге добавления типа элемента нажимаем **Options** (свойства) для назначения необходимых свойств.

Выбираем **plane stress with thickness** (плоские напряжения с учетом толщины) для **Element behavior** (поведение элемента).

Применяем изменения и закрываем диалог: **OK**.

Закрываем окно добавления типа элемента: **Close**.

Инициализация характеристик элемента (толщины).

Main Menu → **Preprocessor** → **Real Constants** → **Add/Edit/Delete**

Выбираем **Add...** (добавить).

В открывшемся диалоге подтверждаем выбор по умолчанию **PLANE82**.

Вводим значение толщины **.002 (Thickness)**.

Подтверждаем изменения и выходим: **OK**.

Закрываем окно назначения характеристик: **Close**.

Сохраняем проект: **Utility Menu** → **File** → **Save as Jobname.db**

3. Создание сетки

В данном примере воспользуемся средствами генерации сетки с автоматическим подбором размеров ячеек. Это один из хороших вариантов когда неизвестно какую сетку выбрать для первоначального анализа.

Открываем инструмент генерации сетки:

Main Menu → **Preprocessor** → **Meshing** → **Mesh Tool**

Зададим максимальный размер ячейки:

Нажимаем **Size Controls** → **Global** → **Set**

Назначаем размер грани ячейки **SIZE: 0.007**

Принимаем изменения: **OK**.

Выбираем генерацию сетки для поверхностей: **Mesh** → **Areas**.

Нажимаем **Mesh** и выбираем в диалоге выбора элементов **Pick All**.

Закрываем окно создания сетки: **Close**.

Сохраняем проект: **Utility Menu** → **File** → **Save as Jobname.db**

4. Расстановка нагрузок

В пакете ANSYS данный этап относится к решению задачи.

Закрепляем внутреннюю поверхность левого отверстия:

Main Menu → **Solution** → **Define Loads** → **Apply** → **Structural** → **Displacement** → **On Lines**

Выбираем 4 дуги, образующие контур левого отверстия.

Подтверждаем выбор: **OK**.

В следующем диалоге назначаем закрепление всех степеней свободы: **All DOF**

Значение **displacement** (закрепление) устанавливаем равное **0**.

Подтверждаем установки и закрываем диалог: **OK**.

Перерисуем линии в графическом окне:

Utility Menu → **Plot Lines**.

Назначим давление для второго отверстия. Давление будет изменяться линейно от боковой точки до нижней. Максимальное значение давления 500 Па, минимальное 50 Па. Необходимо учитывать особенность установки давления в пакете ANSYS: положительное значение давления соответствует сжатию, т.е. направлено внутрь тела.

Прикладываем нагрузку:

Main Menu → **Solution** → **Define Loads** → **Apply** → **Structural** → **Pressure** → **On Lines**

Отмечаем в графическом окне нижнюю левую дугу окружности.

Подтверждаем выбор: **Apply**.

В основное поле **VALUE** заносим минимальное значение давления: **50**.

В дополнительное поле **optional PRES value** — максимальное: **500**.

Принимаем изменения: **Apply**.

Отмечаем в графическом окне нижнюю правую дугу окружности.

Подтверждаем выбор: **Apply**.

В основное поле **VALUE** заносим максимальное значение давления: **500**.

В дополнительное поле **optional PRES value** — минимальное: **50**.

Принимаем изменения: **Apply**.

Сохраняем проект: **Utility Menu** → **File** → **Save as Jobname.db**

5. Проведение вычислений

Запускаем решатель на счет:

Main Menu → **Solution** → **Solve** → **Current LS**

После анализа данных в появившемся окне информации о постановке задачи закрываем его: **File** → **Close**.

Подтверждаем начало расчета: **OK**.

Отвечаем **Yes** на все появляющиеся информационные сообщения.

Закрываем окно, сигнализирующее об окончании решения **Close**.

Сохраняем проект: **Utility Menu** → **File** → **Save as Jobname.db**

6. Анализ вычислений

Считываем результаты:

Main Menu → **General Postproc** → **Read Results** → **First Set**

Отображаем деформированное состояние:

Main Menu → **General Postproc** → **Plot Results** → **Deformed Shape**

Выбираем и деформированное и исходное состояния: **Def + undeformed**.

Выводим результат: **OK**.

Также можно просмотреть изменение деформированного состояния во времени:

Utility Menu → **PlotCtrls** → **Animate** → **Deformed Shape**

Принимаем настройки по умолчанию: **OK**.

ANSYS автоматически запустит анимацию. Можно изменить настройки проигрывания анимации:

Utility Menu → **PlotCtrls** → **Animate** → **Replay Animation...**

Отообразим эквивалентные напряжения по Мизесу (von Mises).

Main Menu → **General Postproc** → **Plot Results** → **Contour Plot** → **Nodal Solution**

В первом окне параметров выбираем напряжения (**Stress**)

Во втором окне выбираем **von Mises**.

Отображаем: **OK**.

Как и в предыдущем случае можно вывести изменение параметров во времени:

Utility Menu → **PlotCtrls** → **Animate** → **Deformed Results**

В качестве анимируемых параметров выбираем **Stress** (первое окно), **von Mises** (второе).
Подтверждаем создание ролика: **ОК**.

Сохраняем проект: **Utility Menu** → **File** → **Save as Jobname.db**

Закрываем ANSYS: **Utility Menu** → **File** → **Exit...**

На предложение ANSYS сохранить результаты выберите интересующий вас вариант.

1.4. Задания для самостоятельной проработки

Цель работ: ознакомиться с основами работы в пакете ANSYS, выработать первоначальные навыки моделирования плоских и трехмерных геометрических объектов, а также создания сетки.

Задание: Провести моделирование, в отчете представить деформированное состояние, поля напряжений как это проделано в демонстрационном примере 1.

Геометрические параметры для всех вариантов приведены в приложении Б. В заданиях, где это возможно, рекомендуется использовать симметрию. Во всех плоских случаях толщину модели принять исходя из характерного масштаба как это сделано в первом демонстрационном примере.

1 вариант

а) плоская скоба

Стальная скоба (рис. 1.6) находится в вертикальном положении и закреплена в двух отверстиях меньшего диаметра. На скобу действует распределенная нагрузка N_1 в виде приложенного к отверстию большего диаметра давления, направленного вертикально вниз. Максимум давления приходится на нижнюю точку отверстия.

б) объемная скоба

Стальная скоба (рис. 1.7) закреплена приложенным к внутренней поверхности большего отверстия условиям запрещения перемещения (all DOF). К двум остальным отверстиям приложены растягивающие усилия q_1 , направленные параллельно плоскости скобы под углом 30° к ее оси. Место приложения выбирается учащимся.

2 вариант

а) поперечное сечение профиля 1

Профиль (рис. 1.8) закреплён по линиям АВ, ВС, DE и EF (all DOF) и нагружен по линии GH распределенной нагрузкой q_1 (сила действует вертикально вниз).

б) прокатный профиль 1

Балка соответствующего профиля длиной 2 м закреплена с одного торца (all DOF). С другого торца вертикально вниз действует распределенная нагрузка q_1 .

3 вариант

а) плоская балка 1

Балка (рис. 1.9) закреплена с левого торца (all DOF), по линии АВ запрещены перемещения по оси OX. К точке С вертикально вниз приложена сила N_1 .

б) объемная балка 1

Балка закреплена с левого торца (all DOF) и нагружена крутящим моментом q_1 с правого торца. Также по одной из горизонтальных линий правого торца вертикально вниз действует распределенная нагрузка q_2 .

4 вариант

а) плоская балка 2

Балка (рис. ??) закреплена в нижней точке левого торца (all DOF), в точке С запрещены перемещения по оси ОУ. По линии АВ вертикально вниз действует распределенная нагрузка q_1 .

б) объемная балка 2

Балка закреплена с левого торца (all DOF) и нагружена по верхней линии правого торца распределенной нагрузкой q_1 (сила действует вниз).

5 вариант

а) плоский болт (рис. 1.11), работающий на растяжение

Болт закреплен по линиям АВ, CD (all DOF) и нагружен растягивающей распределенной нагрузкой q_1 , действующей по линиям EF, GH.

б) объемный болт, работающий на растяжение

Схема аналогична плоскому случаю.

6 вариант

а) плоский болт (рис. 1.12), работающий на срез

Болт закреплен по линиям АВ, DE (all DOF) и нагружена распределенной нагрузкой q_1 по линии ВС (сила действует вниз).

б) объемный болт, работающий на срез

Болт закреплен (all DOF) по поверхности, ограниченной линиями, отмеченными в плоском случае точками А, В, D, E. На верхнюю поверхность, ограниченную линиями, отмеченными в плоском случае точками В и С, действует равномерная нагрузка q_1 .

6 вариант

а) поперечное сечение профиля 2

Нижнее основание профиля (рис. 1.13) закреплено (all DOF), на участок, выделенный жирной линией, действует распределенная нагрузка q_1 , направленная вниз.

б) прокатный профиль №2

Балка длиной 1 метр закреплена одним торцем (all DOF), на второй торец вертикально вниз действует нагрузка q_2 .

Задания повышенной сложности

7 вариант

Провести моделирование уголка из демонстрационного примера и аналогичного ему уголка без внутреннего скругления. Проанализировать и сделать выводы влияния наличия скругления на возникающие напряжения.

8, 9 вариант

На основании предложенных конструкций ферм (рис. 1.14–рис. ??) самостоятельно выбрать необходимые геометрические характеристики, провести моделирование, проанализировать полученные результаты. На основании полученных данных сделать выводы о напряженно-деформированном состоянии конструкции, наметить пути улучшения ее характеристик.

10 вариант

Прокатный профиль 2

Балка длиной 1 метр закреплена одним торцем (all DOF), определить максимально допустимую нагрузку на правый торец, не приводящую к разрушению. (Предел текучести для стали выбрать самостоятельно).

Приложение А

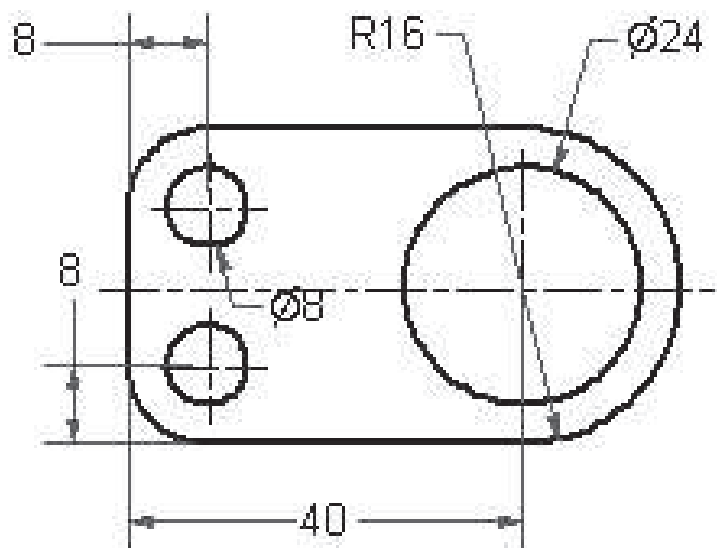


Рис. 1.6. Плоская скоба

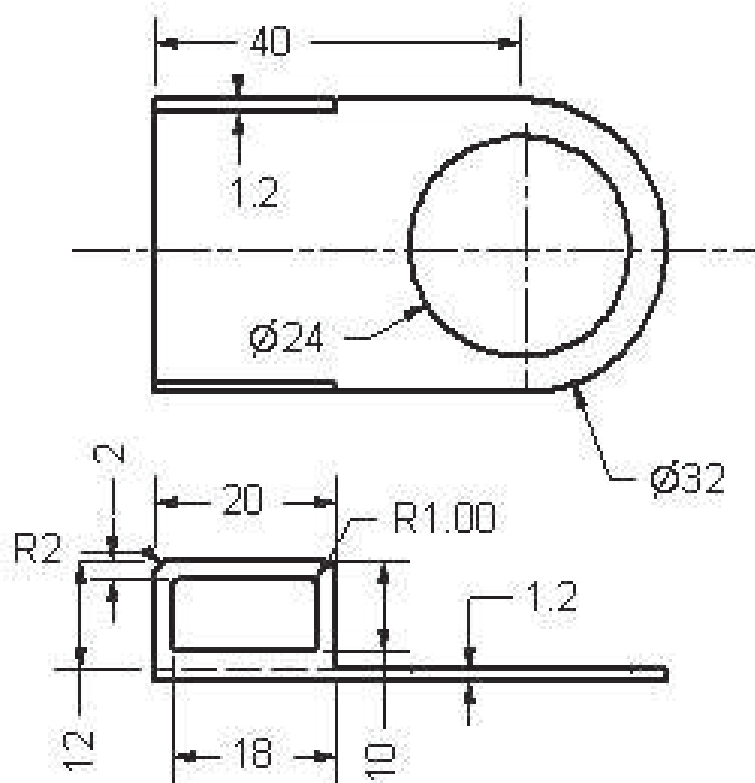


Рис. 1.7. Объемная скоба

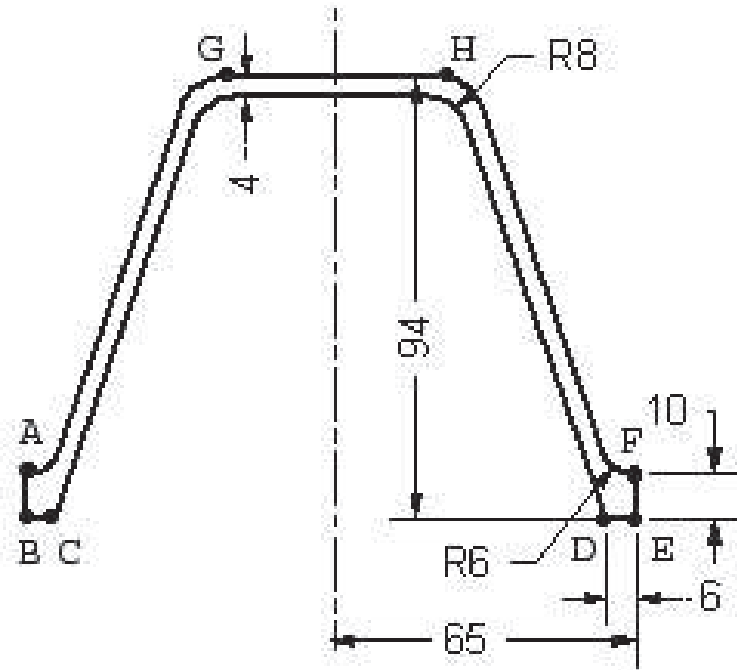


Рис. 1.8. Профиль 1

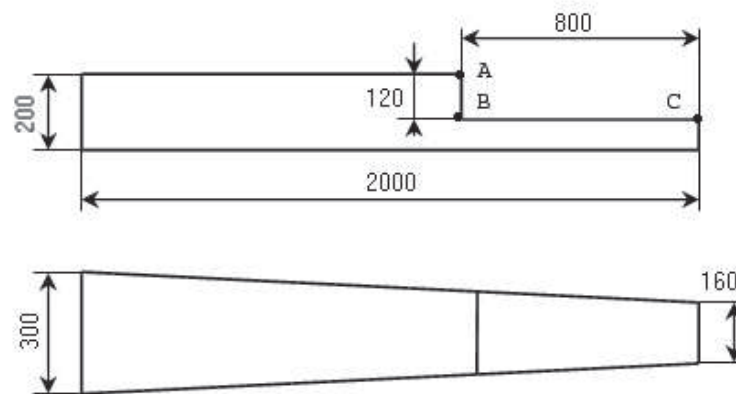


Рис. 1.9. Балка 1

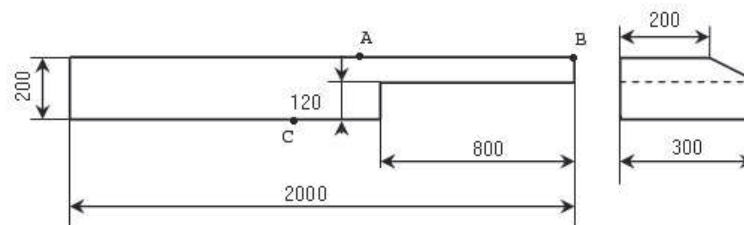


Рис. 1.10. Балка 2

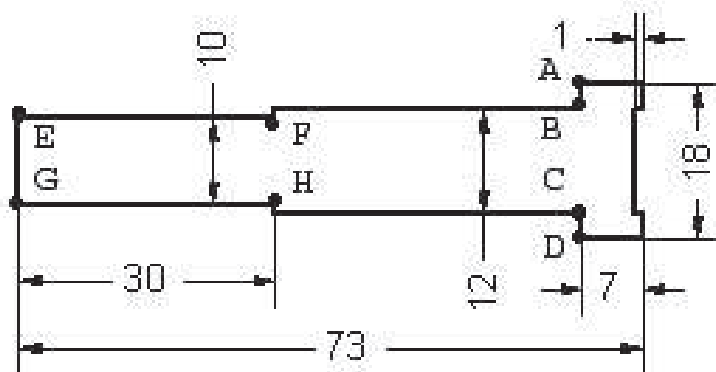


Рис. 1.11. Болт 1

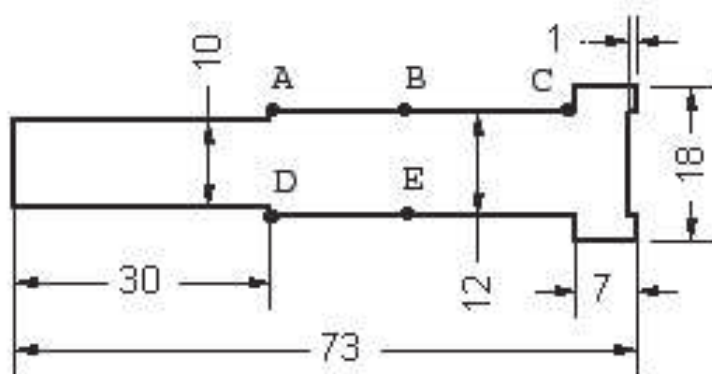


Рис. 1.12. Болт 2

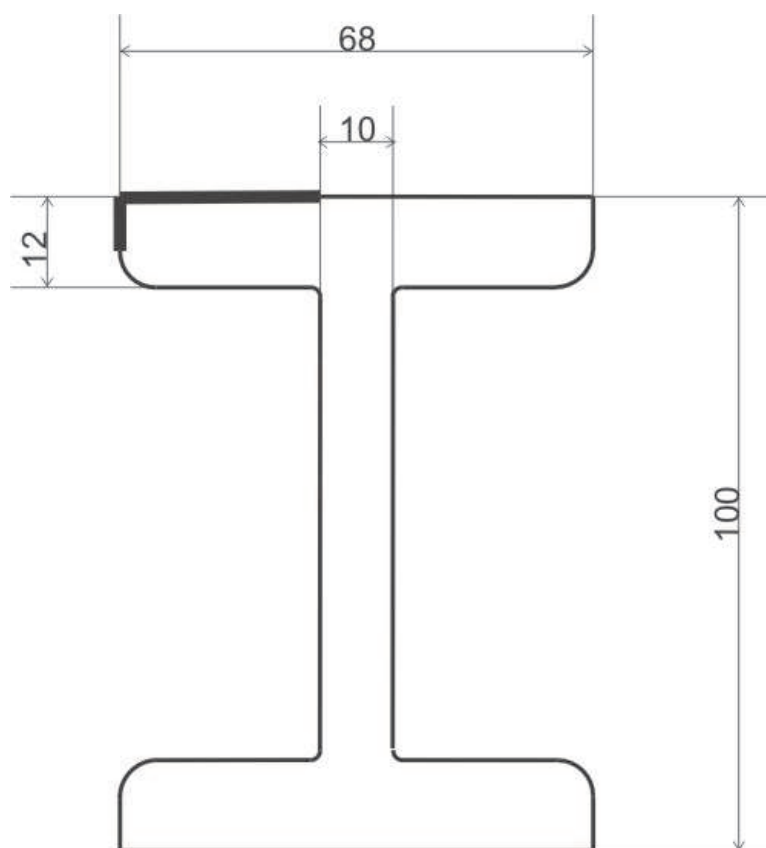


Рис. 1.13. Профиль 2

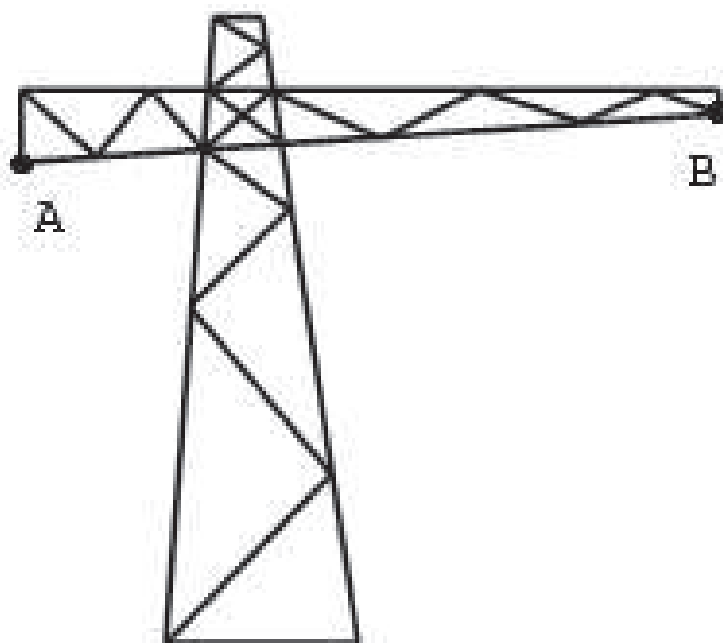


Рис. 1.14. Ферма 1

Вариант	N_1 , Н	q_1 , Н/м	q_2 , Н/м
1	500	200	—
2	—	1000	—
3	2000	200	1000
4	—	5000	—
5	—	3000	—
6	—	4000	—
7	—	1500	1000

Таблица 1.1. Значение сил и распределенных нагрузок

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 272 с.*