
ПОСВЯЩЕНИЕ

На кафедре сопротивления материалов и в Механической лаборатории (так она называлась вначале) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (до 1989 г. Ленинградский политехнический институт) работал ряд известных ученых и преподавателей.

Сотрудником лаборатории был первый директор института князь Андрей Григорьевич Гагарин, первым заведующим лабораторией (1903—1930) — Сергей Иванович Дружинин, сотрудниками лаборатории и кафедры были К. М. Дубяго, С. П. Тимошенко, Н. Н. Драгомиров, И. И. Бентковский, Н. Н. Давиденков, К. Э. Рерих, Н. А. Шапошников, Ю. И. Ягн и др.

В 1972—1988 гг. кафедрой заведовал профессор Петр Аркадьевич Павлов. Сотрудниками кафедры была разработана эффективная, оригинальная методика преподавания курса сопротивления материалов и сходных учебных дисциплин. Особое внимание этому вопросу уделял П. А. Павлов.

По инициативе члена-корреспондента АН СССР А. И. Лурье Петр Аркадьевич разработал и в течение ряда лет читал курс, посвященный феноменологическим аспектам прочности конструкционных материалов и элементов конструкций.

Высокий уровень научных исследований и лекционных курсов позволил опубликовать написанные на их основании монографии и учебные пособия. Важнейшие из них: «Механические состояния и прочность материалов» (1980), «Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность» (1988), «Элементы линейной механики разрушения» (1993, в соавт.).

Авторы учебника в значительной степени считают себя учениками П. А. Павлова. В учебнике использованы как сформулированные им идеи, так и современные научные представления.

ВВЕДЕНИЕ

Инженерные объекты различного назначения (машины, приборы, здания, корабли, самолеты и т. д.) должны отвечать широкому кругу требований, выполнение которых обеспечит их надежную и эффективную эксплуатацию. Важнейшими, а в ряде случаев определяющими, являются требования достаточной прочности и жесткости конструкции. Здесь под прочностью понимается способность конструкции не разрушаться, а под жесткостью — сохранять в определенных пределах свою форму. Вместе с этим конструкция должна удовлетворять и определенным экономическим требованиям. Современные нормы проектирования позволяют найти известный компромисс между взаимно противоречивыми требованиями надежности и экономичности. Следовательно, конструкция, выполненная из конкретного материала, должна успешно *сопротивляться* внешним воздействиям: силовым, тепловым, радиационным и т. п. Инженерная дисциплина, в которой рассматриваются экспериментальные и теоретические основы методов оценки прочности и жесткости конструкций с одновременным учетом требований экономичности, получила название *сопротивления материалов*.

Эта дисциплина в учебных планах технических университетов играет несколько ролей. Во-первых, с ее помощью студент впервые вводится в круг важнейших инженерных понятий, которые необходимы для расчетов на прочность и жесткость конструкций и которые получают дальнейшее развитие в специальных учебных дисциплинах на старших курсах. Во-вторых, эта дисциплина имеет самостоятельное применение в инженерной практике, потому что представленная в ней система оценок надежности вполне достаточна для решения проблемы целиком, начиная с отыскания всех внешних сил, действующих на конструкционный элемент, и заканчивая рекомендациями об оптимальных значениях его поперечных размеров. Подчеркнем, что курс насыщен примерами расчетов на прочность и жесткость многих типичных деталей современных машин и сооружений.

Таким образом, сопротивление материалов является одной из фундаментальных дисциплин инженерного образования.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ. ВНЕШНИЕ И ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 1.1. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Сопротивление материалов как инженерная и общетеоретическая наука имеет свою богатую событиями историю. Проблема обеспечения прочности конструкций различного назначения решается человечеством на всем протяжении его истории, трансформировавшись из задачи о прочной хижине в задачу о прочности современного небоскреба или авиалайнера.

В древности и в средние века эти задачи решались методом проб и ошибок, что вело к многочисленным авариям и человеческим жертвам. Первые попытки обоснованного научного решения задачи прочности конструкционного элемента совпадают по времени с эпохой великих географических открытий XV–XVII веков и обусловлены необходимостью создания судов значительной грузоподъемности. Именно к этому периоду относятся опыты Леонардо да Винчи по определению прочности проволок и канатов. Однако основоположником сопротивления материалов как науки принято считать великого итальянца Г. Галилея, который поставил серию специальных экспериментов по оценке прочности изгибаемых деревянных брусьев в зависимости от соотношения размеров и сделал попытку их теоретического осмысления.

Другой важнейший этап истории сопротивления материалов связан с именами английских ученых Р. Гука и Т. Юнга. Первому принадлежит приоритет в открытии и четкой формулировке фундаментального закона сопротивления материалов, согласно которому деформация, т. е. изменение размеров конструкционного элемента, прямо пропорциональна приложенной к нему силе.

Как писал Р. Гук, какова сила, таково и перемещение. В конце XVIII века Т. Юнг придал этому утверждению законченную математическую формулировку с одновременным истолкованием механического смысла используемой здесь константы материала, известной ныне как модуль упругости — модуль Юнга.

Сопротивление материалов в современном понимании в основном сложилось к концу XIX — началу XX века как результат совместных усилий ученых и инженеров ведущих мировых держав. Здесь нельзя не отметить заслуг российской школы механиков.

Одновременно с развитием сопротивления материалов как науки шло становление и методики ее преподавания в высших учебных заведениях. Значительный вклад в создание эффективных приемов преподавания внесен отечественными механиками. Достаточно сказать, что учебники профессоров С. П. Тимошенко и Н. М. Беляева получили мировое признание. Деятельность этих выдающихся механиков была тесно связана с Петербургским (Ленинградским) политехническим институтом (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет — СПбГПУ). Лучшая в течение длительного времени машина для испытания образцов материалов на прочность также была разработана в СПбПИ его первым директором князем А. Г. Гагариным.

Современная техника, использующая новейшие технологии и материалы, предъявляет все более жесткие требования к качеству и экономичности инженерных объектов, что требует постоянного развития науки о сопротивлении материалов и смежных дисциплин.

§ 1.2. НЕКОТОРЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ПОНЯТИЯ И ГИПОТЕЗЫ

Любая отрасль человеческих знаний, в том числе такая как сопротивление материалов, оперирует некоторым набором исходных определений, понятий и гипотез. С одной стороны, используются фундаментальные определения и понятия из математики, физики, общей механики. С другой — сопротивление материалов также базируется на данных экспериментальных исследований, из которых важнейшими являются результаты испытаний на растяжение и сжатие образцов конкретных материалов.

Теоретическое осмысление опытных данных служит основой гипотез, приближенно описывающих поведение материалов, конструктивных элементов и конструкций целиком. По мере накопления новых сведений об этой стороне явлений уточняются старые гипотезы и создаются новые.

Современная физика материалов считает объект своего исследования дискретным телом на двух уровнях: поликристаллическом и молекулярном. Однако полученные в подобных предположениях зависимости оказались настолько сложны и громоздки, что пока не получили широкого распространения в сопротивлении материалов. В этих обстоятельствах оказалась плодотворной гипотеза *о сплошности* материала, согласно которой тело рассматривается как некий материальный континуум или среда, непрерывно заполняющая данный объем и наделенная указанными выше экспериментально найденными физико-механическими свойствами. Практическая реализация такого подхода подтверждает его эффективность, поскольку именно на этой основе спроектированы, построены и успешно эксплуатируются все современные инженерные объекты. Одним из существеннейших преимуществ является возможность ввести в рассмотрение бесконечно малые величины (например: длины, площади, объемы) и использовать тем самым мощный и хорошо развитый аппарат дифференциального и интегрального исчисления.

Гипотеза сплошности материала, являющаяся центральной в современном сопротивлении материалов, теснейшим образом связана с так называемым *феноменологическим* подходом к анализу поведения инженерных объектов при внешнем воздействии. Суть его состоит в том, что как свойства материалов, так и поведение сооружений исследуются в форме констатации экспериментально установленных фактов с последующим построением на их основе соответствующих расчетных методик. При этом тонкие подробности физических процессов на кристаллическом, а тем более на молекулярном уровне в большинстве случаев не принимаются во внимание. В особых обстоятельствах упомянутые подробности учитываются путем введения тех или иных поправок в гипотезу сплошности.

Результатом внешних силовых воздействий на тело является изменение его размеров и формы, т. е. *деформация*. В некоторых случаях этим свойством материалов можно пренебречь, и тогда

пользуются известными читателю представлениями об *абсолютно твердом* теле (моделью абсолютно твердого тела). Эта модель широко используется в курсе «Теоретическая механика». Однако во многих задачах требуется учесть деформируемость твердых тел. Простейшей и вместе с тем широко распространенной моделью является понятие о *линейно деформируемом* материале Гука, когда его деформация пропорциональна внешней силе.

Современная техника в ряде случаев использует металлические монокристаллы для особо прочных конструктивных элементов, например лопаток авиационных газовых турбин. Механические характеристики монокристалла зависят от направления, в котором они определяются. Это свойство называется *анизотропией*.

Обычный металл состоит из огромного количества кристаллитов. Они ориентированы случайным образом, поэтому их совокупность обладает *изотропией*, т. е. одинаковостью свойств по всем направлениям. К изотропным материалам кроме металлов, при определенных условиях, относятся бетон, минерало- и металлокерамика, неорганические и многие органические стекла, т. е. большинство обычных конструктивных материалов. В связи с этим сопротивление материалов ориентировано прежде всего на них.

После известной модификации методы сопротивления материалов применимы и к деталям из анизотропных материалов. Перечень нужно начать с деревянных брусьев, переходя далее ко всякого рода композитам. Последние представляют собой достаточно пластичную матрицу, армированную высокопрочными волокнами. Матрицы и волокна могут быть как органическими, так и неорганическими, включая и металлы.

§ 1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ

Отдельные конструктивные элементы инженерных конструкций представляют собой пространственные трехмерные тела более или менее сложного очертания. Ясно, что степень сложности поведения таких элементов под внешней нагрузкой так или иначе зависит от особенностей его геометрии. Это делает целесообразным принять определенную их классификацию по геометрическим признакам.

Первая группа элементов — тела с размерами одного порядка. Примерами могут служить массивный фундамент здания, шарик или ролик в подшипнике качения и т. д. Исследование поведения таких «трехмерных» элементов под нагрузкой наиболее сложно и трудоемко.

Следующая группа элементов — тела, у которых один размер значительно (по крайней мере в 5–6 и более раз) меньше двух других. Примерами таких «двумерных» элементов являются пластины и оболочки, рис. 1.1а и 1.1б. Первые ограничены в пространстве двумя плоскостями, а вторые — криволинейными поверхностями таким образом, что расстояние между ними относительно мало. Исследовать поведение двумерных элементов несколько проще, чем трехмерных. Однако в общем случае соответствующая теория достаточно обширна и сложна, требует от инженера повышенной математической подготовки.

Третью группу составляют так называемые *стержни* или *брусья*. Сюда относят такие конструкционные элементы, у которых длина существенно превосходит ширину и высоту. В стержнях вводят понятие оси, т. е. линии, проходящей через центры тяжести поперечных сечений.

Соответственно говорят о стержнях прямых (рис. 1.1в... ж), кривых (рис. 1.1з) и коленчатых (рис. 1.1и). Различают также стержни постоянного и переменного поперечного сечения. Последние иллюстрируются рис. 1.1е и 1.1ж.

Именно стержни являются центральным объектом исследования в традиционном курсе сопротивления материалов, что объясняется двумя причинами. Во-первых, на примере стержня можно наиболее удобно и относительно просто ввести основные понятия сопротивления материалов, продемонстрировать практически все подходы к экспериментальным исследованиям и изложить основы методов расчетной оценки предельных нагрузок при заданных размерах. Во-вторых, элементы типа стержня распространены в различных областях техники, поэтому полученные в курсе результаты находят непосредственное применение в инженерных расчетах.

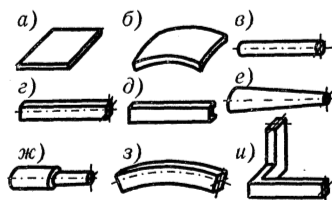


Рис. 1.1

§ 1.4. ОПОРНЫЕ ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Фиксированное положение конструкций в пространстве обеспечивается их связями с неподвижными телами. Реальные связи между объектами имеют обычно достаточно сложное конструктивное решение и обладают определенной деформативностью или, как принято говорить, податливостью. Учет этих обстоятельств значительно осложняет анализ поведения конструкций под нагрузкой, а потому в обычных инженерных расчетах используют понятия идеальных связей, когда пренебрегают податливостью.

Изучение идеальных связей обычно начинают с моделей закрепления стержней, находящихся под действием плоской системы сил. В этом случае закрепления препятствуют движению (смещению) этих стержней в упомянутой плоскости.

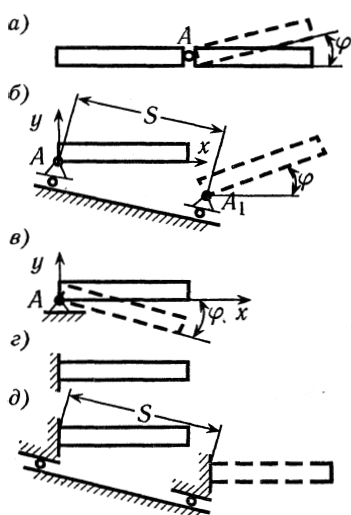


Рис. 1.2

Напомним известное из теоретической механики понятие шарнира как устройства, соединяющего два или более стержня так, что исключено взаимное поступательное движение, но возможно вращательное, рис. 1.2а.

Простейшей опорой является подвижный шарнир, который допускает не только поворот стержня, но и его линейное смещение в каком-либо направлении, рис. 1.2б. Добавим, что такое графическое изображение предполагает невозможность отрыва от опоры. Если опора односторонняя, то это оговаривается специально.

Неподвижный шарнир допускает поворот, но запрещает любое линейное перемещение того сечения стержня, которым он прикреплен к опоре, рис. 1.2в.

Наконец, инженеры рассматривают также закрепление, когда запрещается поворот одного из концевых сечений стержня. Такая связь называется *заделкой* или *жестким защемлением*.

При этом различают неподвижную («глухую») заделку, рис. 1.2г, и подвижную, рис. 1.2д. В первом случае помимо поворота запрещаются смещения в любом направлении, во втором запрет на поворот сохраняется, но разрешается линейное перемещение в каком-либо направлении. В отдельных случаях подвижная заделка позволяет линейные перемещения в любых направлениях. Предлагаем читателю самостоятельно изобразить схематическое устройство такого закрепления.

§ 1.5. КОНСТРУКЦИЯ И ЕЕ РАСЧЕТНАЯ СХЕМА

Даже сравнительно неполное перечисление факторов, определяющих поведение конструкции при внешних воздействиях, говорит о том, что поставленная задача по обеспечению ее надежности (безотказности, безопасности) оказывается весьма сложной. Одновременно достаточно очевидно, что роль и влияние отдельных факторов могут существенно отличаться в зависимости от обстоятельств. Это позволяет заранее исключить из рассмотрения те из факторов, которые в рассматриваемой ситуации почти не влияют на результаты. В конечном итоге инженерному анализу подвергается не реальная конструкция, а некоторая идеализированная ее модель, в которой отброшены все малозначительные факторы, влияющие на поведение конструкции. Такую модель в сопротивлении материалов называют *расчетной схемой*.

В качестве примера рассмотрим две конструкции. Первая (рис. 1.3а) представляет собой две втулки 2 и 3, которые

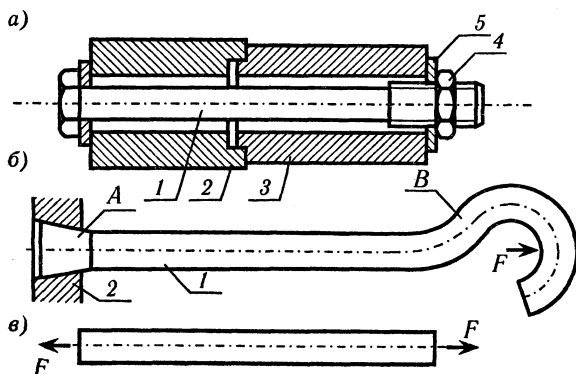


Рис. 1.3

стягиваются в единое целое болтом 1 и гайкой 4 через шайбы 5. При надлежащем закручивании гайки получаем в болте растягивающее его усилие F . Основу второй конструкции (рис. 1.3б) составляет стержень 1, который на одном конце имеет коническую головку A , на другом — крюк B . Элементы A и B сформированы из этого же стержня путем пластического деформирования в кузнице. Деталь 1 своей головкой A входит в соответствующее отверстие в неподвижной детали 2, что позволяет удерживать на крюке силу F . Эта сила растягивает стержневую часть детали 1. Детали, обозначенные на рис. 1.3а и б цифрой 1, имеют существенно различающиеся способы приложения к ним внешней нагрузки. Несмотря на это, им обеим обычно сопоставляют одну и ту же модель растягиваемого стержня, т. е. расчетную схему на рис. 1.3в. Практика показывает, что использование на стадии проектирования весьма простой расчетной схемы на рис. 1.3в дает возможность в большинстве случаев правильно прогнозировать долговечность таких изделий.

В инженерных конструкциях типа узла машины, фрагмента здания и т. п. проблема выбора расчетной схемы становится неоднозначной. Используются простые и сложные модели. У тех и у других имеются свои достоинства и недостатки, оценивать которые следует по возможным последствиям в эксплуатации готового изделия. Эта оценка должна рассматривать две взаимно противоречивые стороны проблемы — безопасность и экономичность конструкции в период всего планируемого срока службы. Выбор расчетной схемы нередко является искусством, а результат технико-экономического прогноза зависит от знаний, опыта и таланта инженера. Тем не менее во многих случаях можно указать научно обоснованные процедуры при выборе расчетной схемы с перечислением минимума факторов, подлежащих учету.

Прежде всего, это отнесение конструкции к пространственной, двумерной или одномерной модели. Ответ на этот вопрос в значительной степени предопределяет чисто математические, а точнее вычислительные трудности при анализе расчетной схемы. Недаром среди инженеров-расчетчиков популярен термин «проклятье размерности», ибо с повышением размерности задачи на единицу вычислительные трудности возрастают на несколько порядков, заметно увеличивается и стоимость проектных работ.

Рассмотрим, например, шпиндель современного крупного токарного станка. Эта весьма сложная деталь изготавливается на металлорежущих станках из заготовки, представляющей собой цилиндрическую трубу. Надежность этой детали оценивают на стадии эскизного проектирования по расчетной схеме стержня постоянного сечения. Окончательный расчет шпинделя на безотказность обычно осуществляют по более сложной расчетной схеме стержня, сечение которого изменяется ступенями. Переход к такой расчетной схеме позволяет выявить избыточные объемы материала, практически не влияющие на безотказность конструкции при заданных внешних воздействиях. Удаление лишнего материала дает возможность уменьшить материалоемкость конструкции, снизить за счет этого продажную цену изделия, повышая тем самым его конкурентоспособность на рынке.

Весьма существенным фактором, входящим в понятие расчетной схемы, является нагрузка. При этом важным является не только верхнее предельное значение нагрузки, но и ее характер: постоянная и непостоянная, циклическая, ударная и т. д., включая различные комбинации. В качестве примеров, для которых эта проблема весьма сложна, укажем на высотные строительные сооружения в ветроопасных и сейсмоопасных районах и на корабли океанического плавания.

Следующий учитываемый фактор определяется механическими свойствами конструкционного материала. Здесь инженер-расчетчик должен определиться, можно ли считать материал абсолютно упругим или следует использовать модель материала, допускающую возможность возникновения остаточных деформаций наряду с упругими. В свою очередь, современная справочная литература предоставляет инженеру на выбор десятки моделей материалов, описывающих остаточные деформации различных видов.

Богатейший опыт проектирования, изготовления и эксплуатации инженерных конструкций позволяет, несмотря на все их разнообразие, выделить некоторые типовые расчетные схемы. Число таких схем относительно велико. В сопоставлении материалов анализируются достаточно простые расчетные схемы, а более сложные рассматриваются далее, в специальных курсах.

§ 1.6. ДЕФОРМАЦИЯ СТЕРЖНЯ

Понятие о деформации твердых тел как о способности изменять свои размеры, форму и даже объем известно читателю из курса физики. Подробнее этот вопрос будет затрагиваться в последующих главах, а пока рассмотрим виды деформаций стержня.

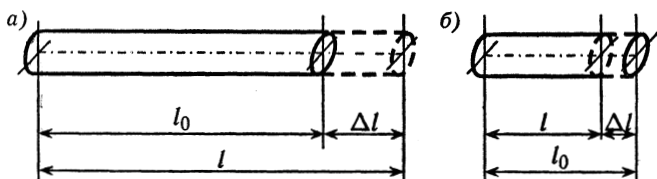


Рис. 1.4

Под действием внешних сил прямолинейный стержень может несколько увеличить свою первоначальную длину l_0 , оставаясь прямым. Разность между текущей l и начальной длиной l_0 обозначим через Δl и назовем *деформацией удлинения* или *деформацией растяжения* стержня, рис. 1.4а. По аналогии вводится понятие *деформации укорочения* или *деформации сжатия* стержня, рис. 1.4б.

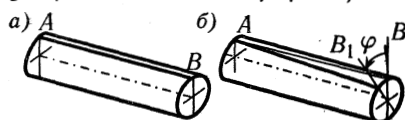


Рис. 1.5

В некоторых случаях стержни деформируются так, что поперечные сечения, оставаясь параллельными, поворачиваются на некоторый угол относительно друг друга вокруг продольной оси. Например, в соответствии со схемами на рис. 1.5а и 1.5б сечение B стержня AB поворачивается относительно сечения A на угол φ . В этом случае говорят о *деформации кручения* стержня, а угол φ называется *углом закручивания*.

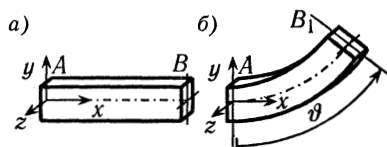


Рис. 1.6

При деформации изгиба первоначально прямой стержень искривляется, а поперечные сечения поворачиваются вокруг осей, перпендикулярных продольной оси стержня, рис. 1.6а и 1.6б. На последнем через ϑ обозначен угол поворота одного концевое сечения относительно другого вокруг

При деформации изгиба первоначально прямой стержень искривляется, а поперечные сечения поворачиваются вокруг осей, перпендикулярных продольной оси

поперечной оси z . Добавим, что изгибаемые стержни нередко называют *балками*.

Нередко встречается комбинация изгиба с кручением, а также с растяжением или сжатием стержня.

§ 1.7. ВНЕШНИЕ СИЛОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Внешние силовые воздействия или, как чаще говорят, нагрузки на конструкцию могут быть самыми разнообразными. В сопротивлении материалов, как впрочем и в курсе физики, принято использовать понятия нагрузок, распределенных по объему тела, по его поверхности, и нагрузок сосредоточенных.

В качестве объемных рассматривают силы веса, магнитные силы и т. д. Примером распределенной нагрузки является давление жидкости или газа на поверхность конструкционного элемента. Это давление направлено по нормали к поверхности и характеризуется *интенсивностью*, т. е. *удельным давлением*. Удельное давление имеет размерность силы, деленной на площадь, и измеряется в паскалях. Напомним, что $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Чаще используют более крупную единицу — мегапаскаль, $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$. Применяется и внесистемная единица — техническая атмосфера, при этом $1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 0,0981 \text{ МПа} \approx 0,1 \text{ МПа}$.

В общем случае удельное давление изменяется по поверхности тела. Например, удельное давление воды на обшивку судна прямо пропорционально глубине. Однако во многих случаях интенсивность внешней нагрузки можно считать постоянной.

Рассмотрим в качестве примера плоскую, горизонтальную, прямоугольную в плане кровлю промышленного здания. Кровля нагружена равномерным снеговым покровом и поддерживается снизу одинаковыми прямыми стержнями (брусьями), которые обычно расположены параллельно друг другу на равных расстояниях и опираются концами на продольные стены здания. В этом случае имеем равномерно распределенную нагрузку по длине стержня. Вводят понятие интенсивности такой нагрузки, имеющей размерность силы, деленной на длину (Н/м или кгН/м). Эту интенсивность нередко называют *погонной нагрузкой*.

Известные читателю понятия сосредоточенной силы и сосредоточенного момента используются и в сопротивлении

материалов. Однако надо помнить, что переход от распределенной к сосредоточенной силе предполагает одновременно и переход к исчезающе малой площади A ее приложения, т. е. к предельному случаю $A \rightarrow 0$. В этой ситуации неизбежно получаем бесконечно большую интенсивность q нагрузки, распределенной по упомянутой площади A . Однако реальные материалы обладают конечной прочностью, что в принципе не допускает случая $q \rightarrow \infty$. Таким образом, понятие сосредоточенной силы (как и понятие сосредоточенного момента) представляет собой идеализированную модель, имеющую ограниченное применение, скажем, в уравнениях равновесия.

Силы измеряют в ньютонах (H), килоньютонах ($кН$). Используются также внесистемные единицы — килограмм силы и тонна силы, причем $1 кгс = 9,81 H \cong 10 H$, а $1 тс = 1000 кгс$.

Рассмотренные здесь нагрузки предполагались постоянными во времени. Такое нагружение характерно в элементах строительных конструкций. Детали машин чаще находятся под действием переменных во времени (циклических) нагрузок, которые, как правило, более опасны.

§ 1.8. ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ В СТЕРЖНЕ. МЕТОД СЕЧЕНИЙ

Положим, что для некоторой конструкции выбрана расчетная схема в виде стержня. Как показано выше, стержень может быть прямым, кривым, коленчатым, может иметь постоянное по длине сечение, а может — переменное. Пусть известна также внешняя нагрузка на стержень, включая активные (заданные) силы и реактивные силы, т. е. реакции в связях (опорных закреплениях).

Из курса физики известно, что целостность и неизменность размеров твердого тела, т. е. его прочность определяются силами межмолекулярного взаимодействия (внутренними силами).

Разрушение или даже просто выход из строя конструкционного элемента возможны лишь при возрастании внутренних усилий и при переходе их через некоторый предельный барьер. Высоту этого барьера удобно отсчитывать от того уровня, который отвечает отсутствию внешних сил. По существу нужно принять во внимание лишь дополнительные внутренние усилия, возникающие только при наличии внешних сил. Эти

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru