

**ЕН.Ф.06 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА
МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Учебное пособие

В учебном пособии даны необходимые сведения о специальности «Механика», и ее основных дисциплинах – теоретической механике, аэро-гидромеханике и механике деформируемого твердого тела. Приведены основные понятия и свойства материальных тел, принципы и методы изучения движения и взаимодействия тел, находящихся в различных состояниях. Рассмотрена история развития науки о механике от древности до наших дней. Особое внимание уделено современным проблемам всех составных частей механики.

Предназначено для студентов механико-математических факультетов университетов (специальности «Механика», «Прикладная математика») и может быть полезным для специалистов в области математического моделирования процессов механики.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Все предметы материального мира существуют по законам природы и по своим собственным, присущим только данным предметам, закономерностям. Но в этом богатстве жизни живого и неживого мира есть одно свойство, общее для всех существ и объектов. Это прочность. Под прочностью материала принято понимать его способность сохраняться длительное время, не поддаваясь разрушению. В русском языке это слово "прок", т.е. это качество, которое всякий предмет должен иметь как бы "про запас".

Когда мы говорим о прочном материале в житейском смысле (прочная обувь, прочная семья), то понимаем под этим надежность, устойчивость вещей и отношений. Но если иметь в виду техническую терминологию, то здесь надежность и прочность понимаются не одинаково. Надежность подразумевает способность вещи более или менее долго служить, не меняя своих заданных функций; прочность – это способность сопротивляться различным механическим силам. Эти силы могут проявляться по-разному. Они могут быть следствием воздействия температуры, электрических полей, влажности, химических веществ, солнечной радиации и многоного другого. Однако любое воздействие в конечном итоге приводит к механическим процессам в материале. Сопротивление этим процессам и является предметом науки о прочности материалов и конструкций. Эта наука внешне мало эффектна, в ней нет таких захватывающих идей и впечатляющих открытий, которые поражают воображение каждого. Когда на воздушной трассе появляется новый реактивный самолет, когда на Луну или одну из планет отправляется космический корабль, это понятно и интересно всем, но мало кто представляет себе, что великолепные технические достижения последних лет в значительной мере связаны с преодолением основной трудности – сделать конструкцию достаточно прочной. Это относится не только к новой технике. Человечество было вынуждено решать проблему прочности во все времена своего существования, но делалось это на ощупь, эмпирически. Опыт строительства прочных сооружений накапливался веками и очень дорогой ценой. Это накопление опытных знаний на базе интуитивных представлений людей о прочности постепенно переходило на научную основу, что привело впоследствии к формированию и развитию теории сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, механики разрушения, теории сооружений и т.д.

1. ВВЕДЕНИЕ В МЕХАНИКУ ДЕФОРМИРУЕМОГО

ТВЕРДОГО ТЕЛА

1.1. Основные понятия о прочности материалов

В настоящее время учение о прочности – это большая разветвленная наука о свойствах материалов и принципах их создания, с одной стороны, и о рациональном использовании материала в конструкции, с другой. Эти две стороны неразрывно связаны между собой, и сейчас ясно, что для дальнейшего прогресса в создании прочных материалов и прочных конструкций необходимо объединение ученых разных специальностей – химиков, физиков, механиков. Необходимо соединение высокого теоретического уровня с пониманием реальных задач и четкой прикладной направленностью исследований.

Одним из основных направлений науки о прочности является разработка новых материалов – материалов будущего, сочетающих в себе высокую прочность и пластичность, небольшой удельный вес и небольшую стоимость. Новые материалы жизненно необходимы для человечества, поиск этих новых материалов и новых принципов конструирования – увлекательная и благородная задача. В настоящее время нашей промышленностью уже выпускаются непрерывные высокопрочные волокна бора и углерода, но они пока еще очень дороги. По оценке многих специалистов, при усовершенствовании технологии стоимость массового производства угольных волокон будет существенно снижена. Уже сейчас из углепластиков изготавливают части самолетов и реактивных двигателей. По научным прогнозам за счет применения углепластиков вес транспортного самолета может быть снижен за первые 4-6 лет на 20%, а за последующие 10-15 лет – на 50%. В авиации и реактивной технике снижение веса особенно необходимо и достигается любой ценой. Известны случаи, когда в угоду снижению веса конструкции идут даже на уменьшение её надежности (например, катастрофа с "Челенджером"), что уже недопустимо, так как сопряжено с риском для жизни людей. Но с расширением производства стоимость новых материалов будет снижаться, и они с успехом найдут применение не только в воздухе, но также на земле и на воде, в конструкциях автомобилей, судов, в аппаратуре.

О прочности материала можно говорить на всех уровнях. Различают прочность атомных связей, прочность молекулы, кристалла, элемента, конструкции, сооружения, небесного тела. Прочностью обладают вода и стекло, металлическая балка и железобетонная труба, стебель растения и кирпичная колонна, кровеносный сосуд и стальной канат, ядро атома и наша планета. Прочность – необходимое и единое для всего живого и неживого условие существования.

Трудно сказать, когда человеку впервые пришла мысль о прочности окружающих его вещей, но нет сомнения, что произошло это в доистори-

ческие времена. Первобытный человек сталкивался с разрушением своих жилищ, орудий труда, предметов обихода, оружия, и вся его борьба с живой и неживой природой всегда была связана с представлениями о прочности. Познание человеком прочности начиналось с окружающих его предметов в двух направлениях – в микро- и макромир. Человек держал в руке копье, палку или камень и задумывался о тайне материала, о том, что делает камень крепче дерева, а железо крепче камня. Соединение отдельных элементов между собой давало ему возможность строить сначала простые конструкции, а затем все более и более сложные сооружения. Веками продолжалось познание человеком тайн прочности в обоих направлениях. И если в микромир человек углубился до мельчайших частиц атома, то по пути в макромир он уже задумывается о прочности планет, галактик, Вселенной в целом.

Конечно, познание – процесс диалектический. Вначале был опыт, затем теория, затем все более совершенствующийся опыт и усложняющаяся теория. И пределов познания нет. На первых порах поиск человеком прочности был интуитивным. Вначале люди учились у природы, создавая свои конструкции по аналогии с ее творениями, копируя их. Со временем знания накапливались – люди учились на опыте прошлых поколений и на своем собственном. Учитывались удачи, ошибки, просчеты – это было время накопления эмпирического знания. И только два последних столетия составляют экспериментальный период в познании прочности. Лишь с появлением техники стала развиваться теория материалов и сооружений.

Что же такое материаловедение? Прочность даже самого крупного сооружения в какой-то мере зависит от химических и физических процессов, которые происходят на молекулярном уровне. Поэтому, говоря о материалах, приходится оперировать физическими величинами, огромными и совершенно ничтожными, переходить от химических представлений к чисто техническим, совершая скачки из одной области науки в другую; материаловедение, выражаясь современным языком, находится на стыке наук. Твердые тела сохраняют свою форму благодаря химическим и физическим связям, существующим между их атомами и молекулами. Любое тело можно вывести из строя несколькими различными путями – механическим разрушением, плавлением или воздействием химическими реагентами. Так как в каждом случае должны быть разорваны какие-то внутренние связи одного типа, можно было бы предположить, что существует некая простая связь между названными формами разрушений. Сегодня, когда о природе межатомных взаимодействий химики и физики знают довольно много, им не так уж трудно дать объяснение прочности и другим механическим свойствам материалов. Дальнейшие исследования показали, что прочность действительно связана с химическими взаимодействиями, но связь эта косвенная и обнаружить ее средствами классической химии или физики невозможно. Оказалось, что специалисты не только нуждались в интерпрета-

ции результатов этих наук средствами классической теории упругости, но необходимо было ввести еще и такие новые и очень важные понятия, как дислокация и концентрация напряжений. В последние два века уместились высшие достижения человеческого гения, величайшие открытия законов природы, создание и развитие различных отраслей механики, занимающихся исследованием прочности: сопротивление материалов, теория упругости и пластичности, строительная механика, теория сооружений и др.

Благодаря познанию тайн прочности человек не только стал строить надежнее, с неизмеримо меньшим количеством аварий в машинах, механизмах, зданиях, сооружениях, но и сумел проникнуть в структуру материала и найти в нем новые резервы. Достаточно сказать, что за прошедшие 50 лет прочность такого металла, как сталь, например, возросла более чем в 10 раз. Однако металлам не принадлежит монополия на прочность. Лучшими сочетаниями удельного веса и прочности обладают не металлы, а самые прочные из известных веществ – волокна бора и углерода. Резерв прочности материалов огромен, а степень освоения его зависит от уровня развития технологии и от уровней развития науки о прочности. В настоящее время уже достигнуты огромные успехи, свидетельство чему – уникальные конструкции телебашен, космических ракет, подводных кораблей, буровых установок и т.п. Но жизнь ставит новые задачи, рождаются и новые технические потребности. Нужны новые научные результаты, новые теории. Теория и практика в познании прочности идут вперед.

1.2. История развития механики деформируемого твердого тела

История цивилизации – это история проникновения человека в тайны природы. Век за веком, тысячелетие за тысячелетием люди постигали одну тайну за другой. Несчетное количество поколений сменилось, пока человек научился добывать огонь, строить жилища, ткать одежду. При помощи огня человек стал выплавлять железо, а из железа делать орудия труда, чтобы они были прочнее, надежнее, долговечнее деревянных и каменных. И при изготовлении каждого устройства, каждой вещи неизбежно возникали проблемы прочности, причем наиболее остро они вставали в строительном деле. И всегда, во все века один общий вопрос занимал умы учёных: "Почему любое твердое тело вообще способно сопротивляться приложенной к нему нагрузке?" Ответ на него представляет собой наглядный пример того, как без применения изощренных приборов может быть теоретически решена научная проблема (исключая, конечно, ее молекулярный аспект). Это говорит о сложности предмета о прочности. Ведь недаром первый существенный вклад в решение проблемы механики деформируемого твердого тела внесли такие выдающиеся умы, как Галилей и Гук. Нужно сказать, что именно они впервые четко сформулировали задачу.

История хранит много примеров уникальных строительных сооружений, выполненных человеческими руками. В Египте на Ниле была воздвигнута Асуанская ирригационная система с плотинами, водохранилищами, каналами. В Китае в VI веке до н.э. реки Хуанхэ и Янцзы были соединены Великим каналом протяженностью свыше 1000 км. Три тысячи лет назад человек строил крепости, дворцы, дороги, храмы, театры, стадионы.

Искусство античных зодчих достигало совершенства. Как венец творения человеческих рук возвысились над древним миром семь чудес света: статуя Зевса в Олимпии, висячие сады Вавилона, мавзолей в Галикарнасе, Колoss Родосский, маяк в Александрии, храм Артемиды в Эфесе и египетские пирамиды. Античная строительная техника достигла больших высот. В IV веке до н.э. уже применялся известковый раствор, в III веке до н.э. – пущолановый раствор из измельченной породы вулканического происхождения. На основе этого раствора вскоре появился бетон. В Китае с IV века до н.э. начала строиться Великая Китайская стена протяженностью 4000 км и шириной 10 м, по верху которой передвигались колонны войск с повозками.

Создания зодчих Древнего Востока поражают не только размерами и гармонией, но и сочетанием архитектурного решения сооружения с его функциональным назначением. Расцвет архитектурного искусства в Древней Греции, а затем в Риме привел к зарождению теории архитектуры и строительного искусства.

Одним из первых теоретиков строительства принято считать римского архитектора и инженера второй половины I века до н.э. Марка Витрувия. Его фундаментальный труд "Десять книг об архитектуре" представляет собой подлинную энциклопедию строительного дела. Очень многие рекомендации Витрувия и сейчас звучат в высшей степени современно. И все же, хотя проблема прочности существовала всегда, хотя человечество имело уже тысячелетний опыт строительства, теории строительной механики не существовало. Поиск прочности происходил пока еще интуитивно. Методом многочисленных проб и ошибок шел человек к познанию тайн материала. Это познание начиналось с анализа причин разрушения.

Восхищаясь сооружениями античных мастеров, нам следует помнить о том, что сроки строительства всегда были невероятно высоки. Возвведение одного храма или дворца длилось десятки, а иногда и сотни лет. При этом строительство обходилось очень дорого, с затратой огромного количества ценнейших материалов, при неограниченной эксплуатации рабского труда. Наконец, и это менее известно, строящиеся сооружения часто разрушались, и строители учились на уроках аварий. В этом плане поучительно разрушение амфитеатра в Фидене в 27 году н.э. Даже в самых современных сооружениях древних можно найти грубые сшибки, свидетельствующие о незнании ими основ сопротивления материалов, строительной механики и теории сооружений. Другая серьезная причина разрушений –

землетрясения. И храм Артемиды, и Галикарнасский мавзолей, и Родосский Коллесс простояли бы гораздо дольше, если бы строители наряду с гибким основанием обеспечили бы пространственную жесткость конструкций. Сооружения нужно было рассчитывать на ветровую нагрузку и устойчивость, в связи с чем фундаменты и основания выполнять с учетом работы их на опрокидывание в сочетании с сейсмическими условиями. Нужно отметить, что недостаток знаний о прочности в строительстве часто ограничивал зодчих в выборе архитектурных форм. Повальное увлечение античных архитекторов колоннадами возникло отнюдь не только из эстетических соображений, а еще и потому, что не было материалов, работающих на изгиб для перекрытия больших пролетов. Достаточно сказать, что самая длинная балка, перекрывающая вход в Акрополь, была длиной менее 4 м, а самая длинная плита – над усыпальницей в пирамиде Хеопса – немногим более 5 м. Поэтому и приходилось ставить колонны близко друг к другу. И лишь позже уже римляне изобрели такие конструкции, как арки и своды, в которых камень работает на сжатие, что позволило увеличить пролеты, а также изменить облик сооружений.

Аварии происходили не только в древние и средние века, они продолжались (конечно, в меньшем количестве) вплоть до нашего времени. Каждая авария возбуждала у специалистов потребность в новом поиске, ставила новые задачи, прибавляла новые знания. Когда же знаний не хватало, в инженерные расчеты вводили (и вводят сейчас) так называемый коэффициент запаса. Поначалу расчет производили весьма приближенно. Определяли нагрузку, которую должен был выдержать элемент при эксплуатации, и подбирали такие его размеры, которые позволили бы выдержать нагрузку, большую эксплуатационной, скажем, в 100 раз. Это значит, что у создаваемого элемента коэффициент запаса равен 100. По мере развития науки этот коэффициент уменьшается все больше, уступая место точным численным величинам, характеризующим то или иное открытое явление, тот или иной процесс в материале, элементе, конструкции, сооружении. Потребность уменьшить коэффициент запаса диктовалась многими факторами. Со временем исчезла дешевая рабочая сила, которую можно было эксплуатировать безгранично. Возникла необходимость экономить материальные средства и ресурсы. Чтобы строить дешевле, с меньшими трудовыми и материальными затратами, потребовались поиски резервов в материале, в формах конструкции, технологии строительства. В авиации и космонавтике большие запасы прочности связаны с большим весом летательных аппаратов, а, следовательно, с меньшей полезной нагрузкой. Следовательно, запасы прочности должны быть как можно меньшими, тогда строить можно будет быстрее, дешевле, с большей экономической отдачей. По сути дела, вся история науки о прочности была историей борьбы за уменьшение коэффициента запаса прочности. Сейчас этот ко-

эффициент стал весьма небольшой величиной (от полутора до трех). Но для этого понадобились века.

Полторы тысячи лет прошло со времени исчезновения с лица земли шести из семи чудес света, когда итальянский художник и ученый эпохи Возрождения Леонардо да Винчи (1452-1519) начал эксперименты по изучению прочности материалов. Леонардо да Винчи был не только замечательным художником, но и талантливым механиком, математиком и инженером, которому обязаны важными открытиями самые разнообразные отрасли науки и техники.

С опытов Леонардо начался экспериментальный период в развитии строительной механики. Леонардо был неутомимым экспериментатором. Производя многочисленные опыты, он фиксировал все в своих записных книжках. Вызывает удивление тщательность, с которой описывались условия и технология проведения экспериментов. Леонардо испытывал на изгиб балки на двух опорах, консольные балки, колонны. Он пришел к выводу, что "несколько малых опор, соединенных вместе, выдержат больший вес, чем, если они будут разделены". Леонардо да Винчи провел интересные опыты на растяжение металлических проволок, струн, различных волокон. Он сконструировал оригинальное приспособление для определения сопротивления железной проволоки разрыву. Конечно, не все выводы Леонардо правильны, есть в них противоречия, ошибки. Поэтому вряд ли можно говорить о значительной практической или теоретической ценности этих опытов. Однако они имеют немалое значение для истории механики, которое состоит в том, что впервые поиск прочности твердых деформируемых тел приобрел форму сознательного, специально заданного исследования.

Новый значительный шаг в развитии представлений о прочности через 120 лет после Леонардо да Винчи суждено было сделать еще одному титану эпохи Возрождения – Галилео Галилею (1564-1642). Великий итальянский физик, механик и астроном Галилей признан одним из основоположников естествознания. Известны его работы в области астрономии (борьба за учение Коперника, а затем отречение от него). Заслужили признания его работы в области динамики. А вот работы его в области сопротивления материалов менее известны. Между тем именно Галилей свел большой круг вопросов, связанных с прочностью и разрушением материалов, в одну область знания. Он впервые указал на необходимость построения собственной теории, создания собственной науки – сопротивления материалов. Из своих опытов Галилей сделал один важный вывод: "Если мы ... построим большую машину из того же самого материала и точно сохраним все пропорции меньшей, то в силу самого свойства материи мы получим машину, соответствующую меньшей во всех отношениях, кроме прочности и сопротивляемости внешнему воздействию: в этом отношении, чем больше будет она по размеру, тем менее будет она прочна". Это явле-

ние, названное впоследствии масштабным фактором, учитывается и сейчас в расчетах строительной механики. В действующих стандартах на испытание строительных материалов вводятся переводные коэффициенты для показателя прочности. Чем меньше лабораторный образец, тем больше уменьшающий коэффициент надо вводить, чтобы получить необходимую прочность промышленного элемента или конструкции.

Галилей предлагал использовать пустотельные элементы. Он заключает, что при сравнении сплошной и трубчатой балок, имеющих одинаковую площадь сечения, трубчатая будет во столько раз прочнее, во сколько раз диаметр трубы больше диаметра сплошной балки. Галилей изучал только два вида деформации – растяжение и изгиб на всевозможных элементах из различных материалов, объясняя причины их прочности и разрушения. Нужно отметить, что Галилей во всех случаях изучал состояние материалов в момент разрушения. Прочность, по Галилею, была связана с критическим, предельным состоянием балки. Ученый пытался понять, почему колонна или балка разрушается, какая сила вызывает это разрушение. Поведение же нагруженного элемента в нормальном рабочем состоянии, физико-механические процессы, происходящие при обычных нагрузках, были Галилею неведомы. Галилей пытался выйти за рамки умозрительных рассуждений и прийти к теоретическому обобщению. Но для этого ему не хватало математического аппарата и данных теоретической механики. Поэтому нельзя сказать, что он построил теорию, но он подготовил почву, на которой в дальнейшем выросла первая теория прочности.

Немногим позднее вопросами прочности твердых тел занимался французский ученый Эдм Мариотт (1620-1684). При проектировании Версальского дворца он проводит большие эксперименты по растяжению и изгибу самых различных материалов. Мариотт, изучая прочность деревянных и стеклянных балок, проверил результаты Галилея и убедился в их справедливости. Испытывая балки, заделанные жестко двумя концами, он обнаружил, что прочность таких балок увеличивалась вдвое по сравнению со свободно опертыми балками. Опытами Мариотта заканчивается первый, экспериментальный период изучения сопротивления материалов. Результаты научных поисков этого периода принесли огромную пользу и не утратили своего значения до сих пор.

Наука набирала темпы, росло число учёных, возникла потребность в общении их друг с другом, в обсуждении научных проблем. В разных странах Европы организуются научные общества: в Италии, Англии, Франции, позже России и Германии. В 1662 году в Лондоне было официально открыто знаменитое Королевское общество, в число членов которого (по рекомендации известного английского физика и химика Роберта Бойля) был принят Роберт Гук (1635-1703).

Гук был талантливым механиком, он создал немало приборов, механизмов, приспособлений. Его исследования были настолько разносторонни

и многогранны, что неизбежно вторгались в сферы деятельности других ученых, работавших на передовых рубежах науки. Поэтому часты были случаи споров Гука за свой приоритет, например с И. Ньютоном. И только один закон по праву носит его имя и принадлежит ему без всякой конкуренции. Это закон упругости материальных тел, известный под названием закона Гука. Суть его можно выразить в трех словах:

"Деформация пропорциональна нагрузке", или, как записал Гук в своей криптограмме: "Каково удлинение, такова и сила". Этот закон был выведен Гуком в 1676 году после проведения ряда экспериментов, а именно: а) удлинения железной проволоки; б) растяжения винтовой пружины; в) сокращения спиральной часовой пружины; г) изгиба балки, закрепленной одним концом и нагруженной на другом конце. Убедившись во всех опытах в действии своего закона, Гук признал его всеобщим.

Чтобы понять сущность закона Гука, обратим внимание на исследования Ньютона, который так сформулировал его в качестве основного (третьего) закона механики: действие равно противодействию по величине и противоположно ему по направлению. Это означает, что каждая сила, действующая на тело, должна быть сбалансирована точно такой же по величине силой противоположного направления. При этом природа сил не имеет никакого значения. Задача любой механической конструкции состоит в сохранении её целостности, для ее выполнения в конструкции должны каким-то образом возникать силы, которые могли бы уравновесить внешние нагрузки, действующие на нее. Причем прежде чем начать сопротивляться внешним нагрузкам, в твердых телах должны возникнуть какие-то смещения, то есть, чтобы оказать какое-либо сопротивление, они должны в большей или меньшей степени поддаваться нагрузке. Под смещением понимается не перемещение тела как целого, без изменения его формы, а именно геометрические искажения самого тела, т.е. тело в целом или отдельные его части становятся короче или длиннее вследствие растяжения или сжатия внутри самого тела. В природе не существует абсолютно жесткого материала, все тела в той или иной мере обладают податливостью. Ветки деревьев под тяжестью прогибаются на значительную величину, а прогиб мостов под тяжестью передвигающихся по ним грузов настолько мал, что незамечен невооруженным глазом. Но как смещения ветвей, так и отклонения моста могут быть охарактеризованы количественно. Пока смещения, вызванные внешними нагрузками, не слишком велики и не мешают конструкции выполнять свои задачи, они определяют обязательные характеристики конструкции. Кто летал самолетом, может быть замечал, как смещаются вверх-вниз концы его крыльев. Конструктор специально наделил при проектировании крыла его такими свойствами. Ясно, что смещения, будь они малыми или большими, создают силы сопротивления. Эти силы определяют жесткость твердого тела, его способность сопротивляться внешним нагрузкам. Другими словами, в твердом

теле возникают именно такие смещения, которые как раз достаточны, чтобы уравновесить приложенные внешние нагрузки. Это происходит совершенно автоматически.

Как же возникают эти силы? Дело в том, что в любом теле атомы химически связаны между собой. Эти связи условно можно представить в виде пружинок, хотя, конечно, ничего "твёрдого" в обычном смысле этого слова в промежутках между атомами не существует (рис. 1).

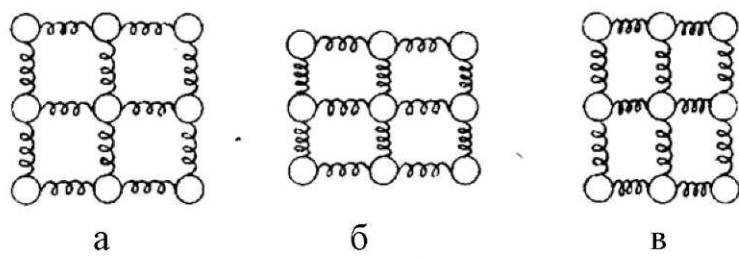


Рис. 1

Те же силы, которые делают тело твердым, определяют и его химические свойства. Разрушение химических связей освобождает энергию пороха и бензина, те же связи делают резинку и сталь упругими и прочными. Когда твердое тело полностью свободно от механических нагрузок (что бывает, строго говоря, очень редко), химические связи, или пружины в нашей модели, находятся в нейтральном положении (рис.1,а).

Любая попытка сблизить атомы (это мы называем сжатием) или оттянуть их друг от друга (что обычно называется растяжением) сопровождается небольшим укорочением или удлинением межатомных пружин во всем объеме металла (рис. 1, б, в). При этом ядра атомов считаются жесткими, кроме того, в твердом теле атомы обычно не обмениваются местами, по крайней мере при умеренных, или "безопасных" нагрузках. Таким образом, податливость твердого тела определяется межатомными связями. Жесткость этих связей может изменяться в широких пределах, но для большинства веществ она намного выше, чем у тех металлических пружин, с которыми мы встречаемся в повседневной жизни. Очень часто величины межатомных сил весьма и весьма велики, что и следует ожидать, если вспомнить о силах, которые могут быть получены при разрыве химических связей горючих или взрывчатых веществ. Хотя абсолютно жестких тел, т.е. таких, которые под действием внешних сил совершенно не изменяют своей формы, в природе не бывает, смещения во многих предметах часто оказываются очень малыми. Так, например, высота обычного строительного кирпича под нагрузкой 80 кг уменьшается примерно на $0,5 \cdot 10^{-4}$ см. При этом два любых соседних атома в кирпиче станут ближе один к другому на расстояние $2 \cdot 10^{-14}$ см или $0,2 \cdot 10^{-5}$ Å (один ангстрем $\text{Å} = 10^{-8}$ см). Величина эта невероятно мала, но она соответствует совершенно реальным перемещениям атомов. Конечно, в крупных конструкциях перемещения элемен-

тов не всегда малы. Канаты, на которых висит мост через залив Форт (Шотландия), все время растянуты примерно на 0,1%, что при их общей длине почти 3 км составляет около 3 м. В этом случае атомы железа, расстояние между которыми в ненапряженном состоянии около 2 \AA , удаляются на величину $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ \AA}$. Опыты показали, что смещения атомов в металлах, например, строго пропорциональны величине, на которую удлиняется (или укорачивается) весь кусок металла. В этих экспериментах наблюдались изменения межатомных расстояний примерно до 1%.

Все эти рассуждения подводят нас к понятиям "напряжение" и "деформация".

Напряжение – это нагрузка, отнесенная к единице площади, т.е.

$$\sigma = P/F,$$

где σ – напряжение, P – нагрузка, F – площадь. Если обратиться к примеру о строительном кирпиче с поперечным сечением 25×12 см под нагрузкой 80 кг, то сжимающее напряжение в нем будет $\sigma = 80/300 \approx 0,27 \text{ кг/см}^2$. Точно такое же напряжение вызовет в кирпичной опоре моста (сечение 10×6 м) проезжающий по нему локомотив весом 160 т. Следовательно, с полной определенностью можно сказать, что в обоих случаях напряжения в кирпиче примерно одинаковы, и если один кирпич не разрушился под тяжестью в 80 кг, то и опора моста не разрушится под весом локомотива в 160 т.

Напряжение выражается в kgs/mm^2 , kgs/cm^2 , H/m^2 , Па и т.д.

Деформация – это величина удлинения стержня под нагрузкой, отнесенная к начальной длине. Очевидно, что отрезки различной длины при одной и той же нагрузке получают в конструкциях различное удлинение. Если обозначить деформацию через ϵ , то

$$\epsilon = \Delta\ell/\ell,$$

где $\Delta\ell$ – полное удлинение, а ℓ – начальная длина. Так, если стержень длиною 100 см под нагрузкой удлиняется на 1 см, то его деформация составляет 1%. Такая же деформация будет у стержня длиной 50 см, растянутого на 0,5 см и т.д. Деформация, так же как и напряжение, не зависит от размеров образца. Деформация есть отношение удлинения к начальной длине и, следовательно, она безразмерна. Роберт Гук был первым, кого осенила догадка о том, что происходит при нагружении твердого тела. Он подробно изучал поведение часовых пружин и маятников. Ничего не зная, конечно, о химических и электрических межатомных связях, Гук понял, что часовая пружина всего лишь частный случай поведения любого твердого тела, что в природе нет абсолютно жестких тел, а упругость является свойством всякой конструкции, всякого твердого тела. Тогда Гук и заявил: "Каково удлинение, такова и сила". Иными словами, напряжение пропорционально деформации, и наоборот. Так, если упругое тело, например струна, удлиняется на 1 см под нагрузкой 100 кгс, то под нагрузкой 200 кгс

удлинение составит 2 см и т.д. Это утверждение и стало известно как закон Гука. Оно является краеугольным камнем всей техники.

При очень больших деформациях (скажем 5-10%) от пропорциональности между напряжением и деформациями не остается и следа. Но обычно деформации не превышают 1%, а в этом диапазоне зависимость между напряжениями и деформациями линейна. Более того, для малых деформаций процесс нагрузки и разгрузки обратим, т.е. кусок материала можно нагружать и снимать с него нагрузку тысячи и миллионы раз с одним и тем же результатом. Наглядный пример этому – пружинка балансира в часах, которая повторяет один и тот же процесс (напряжение и снятие нагрузки) 18 тысяч раз в час. Такой тип поведения твердого тела под нагрузкой называется упругим. В 1678 г. Гук писал: "Сила всякой пружины пропорциональна ее растяжению, т.е., если сила растянет или согнет пружину на некоторую величину, то две силы согнут её вдвое больше, три силы согнут втрое больше, и так далее". В том же 1678 г. вышла из печати работа Гука "О восстановительной способности или об упругости", содержащая описание ряда опытов с упругими телами. Это была первая книга по теории упругости, где Гук отмечает, что независимо от вида нагрузки (растяжения или сжатия) – изменения размеров тела пропорциональны приложенной силе. Гук проводил много опытов и с деревянными балками. Изготовив балку из дерева, он измерял ее прогиб под действием в различных частях балки различных весов. При этом он, например, пришел и к такому великому выводу о том, что на выпуклой поверхности балки волокна при изгибе растягиваются, а на вогнутой – сжимаются. Прошло очень много времени, пока инженерам стало ясно значение этого, как теперь представляется, очевидного свойства материала.

Итак, деформация пропорциональна нагрузке, и наоборот. Гук считал, что его закон действует всегда – при любых нагрузках и в любых материалах. И здесь, в полном соответствии со своим увлеченным характером, он не довел это исследование до конца и допустил неточность. Но об этом потом. Современники его не опровергали: главное, что был сделан очень важный шаг. Был найден основной закон сопротивления материалов. Рассуждения Леонардо да Винчи и Галилео Галилея постепенно становились на научную основу, благодаря которой со временем они будут описаны математическими формами.

Гук установил, что удлинения, укорочения, прогибы как пружин, так и других упругих тел пропорциональны приложенным к ним напряжениям. Они зависят, конечно, от геометрических размеров и формы конструкции, а также от того, из какого материала она сделана. Мы не знаем, понимал ли Гук, в чем разница между упругостью как свойством материала и упругостью как функцией формы и размеров конструкции. Дело в том, что можно получить сходные кривые "нагрузка - удлинение" и для куска резинового шнура и для стальной пружины (а ведь это материалы с

различными прочностными свойствами). Это сходство явилось источником бесконечных заблуждений. Примерно столетие после Гука существовала эта путаница: не всем была ясна разница между двумя понятиями упругости. И это длилось до тех пор, пока в 1800 г. английский ученый Томас Юнг (1773-1829 гг.) не пришел к выводу, что если пользоваться не абсолютными значениями сил и смещений в конструкциях, а напряжениями и деформациями, то закон Гука можно записать в следующем виде: напряжение/деформация = $\sigma/\epsilon \sim \text{const}$. Юнг заключил, что эта константа является неотъемлемой характеристикой каждого химического вещества и представляет его жесткость. Эта константа упругости называется теперь модулем Юнга $E=\sigma/\epsilon$. Следовательно, E описывает жесткость материала как такового. Жесткость любого заданного объекта зависит не только от модуля Юнга материала, но и от геометрической формы объекта.

Все встало на свои места, когда английский ученый Томас Юнг показал, что для каждого материала существует постоянная величина, характеризующая способность его сопротивляться действию силы. Эта величина и была названа модулем упругости, или модулем Юнга. Юнг заметил, что сжатие бруса всегда сопровождается его утолщением, а значит, увеличением площади его поперечного сечения. Растижение же делает брус или проволоку тоньше, следовательно, уменьшает площадь сечения.

Рассуждения Юнга начались с переосмысления закона Гука и его опытов. Если с удвоением нагрузки в проволоке или пружине удлинение удваивается, а с утроением – утраивается и т.д., то частное от деления силы на удлинение будет величиной постоянной. Для того чтобы абстрагироваться от размеров элемента и вида нагрузки, Юнг предложил использовать не абсолютные, а относительные значения силы и деформации (удлинения и укорочения). Действующую на элемент силу (растягивающую или сжимающую) он приводил к единице площади сечения. Немного позднее эта относительная величина была названа напряжением. Вместо же абсолютной деформации, например удлинения, Юнг вводит величину относительной деформации, представляющую собой отношение удлинения, максимально возможного для данного материала, к первоначальной длине. Другими словами, если относительная деформация равна единице или 100%, то это значит, что элемент до своего разрушения способен удлиниться вдвое. При этом имеется в виду, что закон Гука действует в материале до самого разрушения.

Модуль упругости характеризует важнейшее свойство конструкционного материала – его жесткость. Резина, дерево, стекло, сталь обладают различной жесткостью. Модуль упругости резины равен $70 \text{ кгс}/\text{см}^2$, для стекла он в 1000 раз больше. Дерево вдвое жестче стекла, а сталь в 14 раз жестче дерева. Кстати, значение модуля упругости для стали, равное $2 \cdot 10^6 \text{ кгс}/\text{см}^2$, также определил Юнг (правда, в других единицах – фунтах на дюйм). Физический смысл модуля упругости, который и сейчас не являет-

ся чем-то очевидным, во времена Юнга остался непонятным большинству современников. Да и сам Юнг дает этому понятию не совсем четкое определение. Это был не единственный случай, когда Юнг недостаточно точно выражал свои мысли. Очевидно, из-за этой своей черты он не добился больших успехов на педагогическом поприще, но личность его как ученого представляет большой интерес.

Громадная важность модуля упругости для техники объясняется двумя причинами. Во-первых, нам нужно точно знать возникающие под нагрузками смещения как в конструкции в целом, так и в различных ее частях (т.к. под действием рабочих нагрузок взаимодействие деталей в конструкции не должно нарушаться, а в таких расчетах и нужны в первую очередь величины E). Во-вторых, знать модули упругости необходимо не только для того, чтобы рассчитывать деформации конструкции, но и для того, чтобы деформации ее отдельных элементов были согласованными (тогда и напряжения между этими элементами будут распределяться так, как мы хотели этого, проектируя конструкцию).

Определяя модуль Юнга, мы разделили напряжение на безразмерное число – деформацию, следовательно, модуль имеет размерность напряжения. Если деформация равна 1 (100 %), то напряжение оказывается равным модулю упругости. Стало быть, модуль упругости можно считать также напряжением, которое удваивает длину упругого образца. Легко себе представить, что величина модуля упругости должна быть большой, обычно она по крайней мере в 100 раз больше разрушающего напряжения: ведь материалы, как правило, разрушаются, когда их упругая деформация превышает 1 %.

Если взглянуть на величины E , то нетрудно понять, почему огромное количество твердых химических соединений не может быть использовано в качестве конструкционных материалов. Мы хотим, чтобы наши конструкции были как можно жестче, ведь колебания сооружений (мостов, зданий, башен) и без того велики. Сталь – наиболее жесткий из сравнительно дешевых материалов, и в этом одна из причин ее широкого использования.

Увлечение Юнга сопротивлением материалов не ограничилось открытием модуля упругости. Он изучал кручение круглых стержней, изгиб консольных балок и дал много ценных рекомендаций. Он первым заявил, что закон Гука действует только до определенного предела, а затем упругая деформация не проявляется и становится необратимой. Юнг не определил, как развивается зависимость между нагрузкой и деформацией за пределами упругости, но он указал на существование этой области. Наконец, Юнг занимался изучением сложнейшего вида деформации тел – разрушения ударом. Так что это совсем неплохо для медика, увлекавшегося физикой и философией. И все-таки самым значительным открытием Юнга остается модуль упругости, без которого не обходится ни один инженерный расчет

элемента, конструкции, сооружения – от стола до железнодорожного моста, до космической ракеты.

Следует четко усвоить, что прочность и жесткость не одно и то же. Жесткость (модуль Юнга) показывает, насколько податливым является материал. Прочность характеризуется напряжением, необходимым для того, чтобы этот материал разрушить. Прежде всего существует прочность на разрыв. Это напряжение, необходимое для того, чтобы разорвать материал на части, разрушив все межатомные связи вдоль поверхности разрыва. Стержень из очень прочной стали может выдержать растягивающее напряжение до $300 \text{ кгс}/\text{мм}^2$. А вот обычный кирпич выдержит лишь $0,4\text{--}0,6 \text{ кгс}/\text{мм}^2$. Следовательно, прочность материалов, используемых в механике, может изменяться примерно в тысячу раз.

Говоря о прочности, имеют в виду прочность на разрыв, хотя материалы чаще работают на сжатие, чем на растяжение. Казалось бы, если мы пытаемся прижать атомы один к другому, это не должно вызывать разрушения. Однако разрушения происходят, хотя представляют собой явления более сложные, чем разрыв. Под действием сжимающей нагрузки материал может ломаться самым различным образом.

Как работает конструкция на растяжение и сжатие, понять довольно легко, но как те же самые растяжение и сжатие позволяют балкам выдерживать нагрузки – это далеко не очевидно. А между тем разного рода балки составляют значительную долю всех конструкций, с которыми мы повседневно сталкиваемся. Самая обычная половая доска, которая чуть изгибаясь, выдерживает значительный вес мебели и людей – наглядный пример балки. История расчета изгибающей балки – одного из наиболее распространенных элементов в технике – является наглядным примером попыток перейти от общих умозрительных рассуждений к решению практических задач.

Расчет балки на прочность при изгибе был сделан Кулоном в его знаменитом труде "О применении правил максимума и минимума к некоторым вопросам статики, имеющим отношение к архитектуре". Знаменитый французский ученый Шарль Огюстэн Кулон (1736-1806) широко известен прежде всего как создатель основного закона электростатики, выражавшего зависимость силы взаимодействия двух неподвижных точечных электрических зарядов от расстояния между ними. Имя Кулона носит не только этот закон, но и единица электрического заряда. Но Кулон и в строительную механику внес такой вклад, которого было бы достаточно для того, чтобы обеспечить ему бессмертие, даже если бы он не открыл закон электростатики. Имея большой инженерный опыт и талант исследователя, Кулон после долгих лет практической работы по строительству различных сооружений написал научную работу, содержащую, кроме расчета изгибающей балки, методы расчета подпорных стен и сводов. Созданные Кулоном более двухсот лет назад, эти методы применяются в практике до сих пор.

тике проектирования до сих пор почти без изменения. Кулон построил собственную стройную теорию сводов, которая заняла достойное место в строительной механике. Кулон занимался изучением сложного вида деформации – кручения. Его формулы по кручению для стержней малого диаметра также применяются до сих пор. Наконец, Кулон, изучив разрушение сжатых элементов, приходит к выводу, что главной причиной разрушения является сдвиг. Такое предположение стало основой для утверждения нового взгляда, названного впоследствии третьей теорией прочности.

Блестящие работы Галилея, Гука, Мариотта, Кулона, других ученых XVII - XVIII вв. подготовили почву для возникновения инженерной науки. Особенно бурно она развивается во Франции. На первое место из всех отраслей техники вырывается военная. Поэтому инженерное дело в своей основе было прежде всего делом военных специалистов. Основные технические термины также имеют "военное" происхождение. Так, слово "машина" вначале употреблялось в значении орудие, снаряд, военное приспособление, а слово "инженер" означало изобретатель пушек. В 1729 г. для учебных заведений по подготовке специалистов фортификационных и других военных сооружений французский ученый Белидор издал учебник "Инженерная наука". Это был первый в мире учебник по инженерному делу, посвященный строительству и архитектуре. Он переиздавался в течение 102 лет! Последнее издание вышло в 1830 г. почти без изменений. Такую невиданную популярность можно объяснить фундаментальностью построения, а также широким охватом как теоретических, так и практических вопросов строительства. Содержал учебник и сведения по сопротивлению материалов. Белидор приводит расчеты сводов, подпорных стен, балок, таблицы прочности материалов, применяющихся в строительстве. В 1798 г. инженером мостов и дорог Жираром издается первый учебник по сопротивлению материалов – "Аналитический трактат о сопротивлении твердых тел". В 1794 г. в Париже открывается знаменитая Политехническая школа, основоположником которой является знаменитый математик Гаспар Монж (1746 - 1818). Первыми педагогами в ней были крупнейшие французские ученые – Лагранж, Монж, Пуассон и другие. Надо сказать, что правительство Наполеона Бонапарта поощряло развитие науки и техники. Сам Наполеон, по свидетельству современников, серьезно увлекался математикой и обладал большими способностями в этой области.

Первое потрясение основ галилеевской науки о прочности связывают с именем знаменитого французского инженера и ученого Луи Мари Анри Навье (1785-1836). Получив образование в Школе мостов и дорог, он начал работать инженером-строителем. Очень скоро обнаруживаются большие теоретические способности молодого инженера, его талант исследователя-теоретика. Навье публикует ряд своих разработок, которые обобщает затем в курсе лекций, созданном в 1826 г. К этому времени он был уже академи-

ком. Книга Навье стала важной вехой в истории строительной механики. Было положено начало теории упругости. Вместо принципа расчета по предельному, разрушающему состоянию материала утверждался принцип рабочего состояния.

Область нагрузок, где закон Гука действует безукоризненно, называют упругой стадией работы материала. Затем при возрастании нагрузки в материале начинается пластическая деформация, пропорциональность между силой и деформацией исчезает, возникают более сложные явления, которые в XIX в. невозможно было описать математически. В основу новой теории Навье – теории упругости – было положено полное принятие закона Гука. Навье вводит понятие напряжения, т.е. силы, действующей на единицу площади сечения элемента, к которому эта сила приложена. Напряжение – это, таким образом, удельное давление ($\text{кгс}/\text{см}^2$). Если на колонну размером 20×20 см нагружено, например, 40 т груза, то это значит, что напряжение сжатия в колонне составит $100 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Навье предлагал установить расчетные допускаемые напряжения, при которых конструкция может работать надежно, и на эти напряжения вести расчет. Естественно, допускаемые напряжения должны быть значительно меньше разрушающих. Если стальная балка разрушается при напряжении $4000 \text{ кгс}/\text{см}^2$, то Навье предлагает при изгибе принимать допустимое напряжение равным $1300 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Размеры балки при расчете принимают такими, чтобы во время эксплуатации она имела напряжение не выше допустимого. Расчет по допускаемым напряжениям господствовал в строительной механике более века, а в некоторых сооружениях применяется до сих пор.

Уравнения равновесия твердого тела, выведенные Навье, это уравнения равновесия между внешними силами, действующими на тело, и внутренними силами между частицами этого тела. Навье считал, что на любое сечение при деформации действует система молекулярных сил, каждая из которых действует на бесконечно малую площадку. Для того чтобы элемент работал нормально, эта система сил должна находиться в равновесии.

Теорию упругости Навье развил французский ученый Огюстен Луи Коши (1789 - 1857). Если Навье выводил свои уравнения равновесия из представлений о молекулярной структуре и силах межатомного взаимодействия, то Коши использовал более очевидное представление о давлении воды на плоскость. Коши принадлежит гипотеза о том, что давление на любую поверхность твердого тела не обязательно должно быть перпендикулярным. А затем он уже выводит те уравнения, с которых в современных высших учебных заведениях во всем мире начинается изучение теории упругости.

Коши изучает маленький кусочек вещества, вырезанный из любого участка твердого тела, например, изгибаемой балки. Поскольку вырезанный кусочек в теле был связан со всех сторон силами, то при обрыве этих связей он должен изменить форму и размеры. Чтобы этого не произошло,

т.е. чтобы сохранилось равновесие, мы должны ко всем граням этого тела приложить такие силы, которые бы в точности восстановили его прежнюю форму в теле так, как будто разрезов и не было. Приведя в порядок силы на гранях элементарного объема, т.е. разлагая их на нормальные, перпендикулярные, и сдвигающие, действующие в плоскости грани, можно получить уравнения, связывающие напряжения на разных гранях друг с другом. Изучая напряженное состояние элементарного кусочка балки математическими методами, Коши открыл законы, по которым сила передается с одних граней на другие. Это очень важный момент в познании законов, по которым можно определить сжатые и растянутые, перегруженные и ненагруженные места в элементе. Для описания поведения тела Коши вводит много новых терминов, отражающих определенные явления. Им устанавливается точное число разного вида напряжений, которое необходимо для полной характеристики механического состояния любой напряженной внутри тела плоской поверхности. Коши показывает, что в теле всегда можно выделить такие площади, в которых будут действовать только нормальные, т.е. перпендикулярные к сечению силы – он их назвал главными напряжениями, а их направления – главными направлениями. Соответственно деформации, которые вызваны главными напряжениями, названы им главными деформациями. В конечном счете Коши выводит полную систему из трех уравнений для решения задач теории упругости.

Немногим позже уравнениями равновесия занялся современник Навье и Коши, их соотечественник Пуассон (1781 - 1840). Он доказал, что эти три уравнения не только необходимы, но и достаточны для того, чтобы расчитывать напряженное состояние твердого тела. Симеон Дени Пуассон главным образом занимался физикой и решил много сложнейших задач. В механике же, кроме уравнений равновесия, колебаний и прогиба стержней, изгиба круглых пластинок и других задач, Пуассон оставил память о себе тем, что ввел коэффициент, получивший его имя. Еще Юнг отметил, что при сжатии стержня поперечное сечение элемента увеличивается, а при растяжении – уменьшается. Так вот, отношение упругого уменьшения или увеличения поперечного размера элемента к его продольному удлинению или укорочению является величиной, постоянной для каждого материала. Пуассон исходил из того, что объем элемента до приложения нагрузки и после этого не изменяется. Изменяется лишь форма. В частности, при сжатии стержня увеличивается его площадь сечения и уменьшается высота. При растяжении, наоборот, уменьшается площадь сечения и увеличивается высота. При таком подходе влияние материала не учитывалось, считалось, что он не играет роли. Поэтому коэффициент Пуассона был величиной постоянной для любого материала, равной 0,25. В дальнейшем величина и универсальность коэффициента Пуассона подверглись сомнению. Английский исследователь Джордж Грин, решая уравнения теории упругости из условия сохранения энергии, теоретически приходит к тому, что коэффи-

циент Пуассона не может быть постоянной величиной для всех материалов. Опыты показали, что коэффициент Пуассона, как и модуль Юнга, отражает особенности атомных взаимодействий. Объем деформированного тела, как оказалось, может изменяться за счет перераспределения атомных связей в пространственной структуре вещества. Поэтому для некоторых материалов коэффициент Пуассона может быть даже близок к нулю. Например, для металла бериллия измерения дают величину 0,03, для алмаза – 0,07. Значит, эти материалы, растягиваясь в длину, почти не сокращают межатомных расстояний в поперечном направлении, настолько эти связи жестки при сближении. Теперь существует таблица значений коэффициента Пуассона для различных материалов. Важная константа Пуассона вошла во все уравнения теории упругости, и без нее не обходится ни один инженерный расчет.

После исследований Навье, Коши и Пуассона главные уравнения теории упругости стали классическими, чуть ли не идеальными. Однако неизысканность принятых теорий прочности во второй половине XIX в. значительно пошатнулась. И связано это было опять-таки с развитием техники, которая задавала науке все более сложные задачи. Накопив довольно обширный материал по растяжению и сжатию, теория упругости еще плохо справлялась с таким видом деформации, как кручение. В этой области значительные результаты получил французский ученый Адемар Жан Клод Барре Сен-Венан (1797-1886), которому было суждено оставить заметный след в истории теории упругости. Сен-Венаном написано огромное число работ в самых различных областях механики твердого тела. Ему, кстати, принадлежит оригинальный способ публикации своих идей. Так, он издает курс лекций глубоко почитаемого им Навье со своими примечаниями в виде книги (в 1864 г.), в которой 1/10 места была занята лекциями, а 9/10 – примечаниями к ней. Но наибольшую известность получили два его мемуара (о кручении и об изгибе призм), не утратившие своего значения до наших дней. В советском издании 1961 г. они заняли объем в 500 страниц! Сен-Венан разрабатывает теорию пластичности для двумерных задач. Им найдена весьма важная область распространения напряжений – зона действия внешних сил, и открыт принцип, получивший его имя.

1.3. Механика деформируемого твердого тела в XX веке

Итак, XIX век был наиболее плодотворным из всех предыдущих для науки о прочности. После тысячелетий интуитивного и опытного познания прочности, после экспериментального изучения материалов XVII и XVIII веков в XIX веке усилиями ученых и инженеров была создана теория сопротивления материалов, которая рассматривала элемент как сплошное идеальное упругое тело без дефектов. Классические законы механики твердого тела, облеченные в строгую мантию математических формул,

действовали безукоризненно. Казалось, что инженерам уже все ясно. Но, однако, это было далеко не так.

В 1850 г. во Франции разрушился мост, по которому шли в ногу 487 солдат (226 погибли). В 1879 г. в Англии при сильной буре обрушился 13-пролетный мост, по которому в этот момент шел поезд (погибли 70 человек). В Северной Америке за 12 лет (с 1876 по 1888 гг.) разрушился 251 мост. Перечень аварий, приведенных из старого учебника по сопротивлению материалов, можно было бы значительно расширить. Разрушались не только здания и сооружения. Ломались многочисленные машины и механизмы. Лопались паровые котлы, летели болты и заклепки, трещали массивные металлические валы. На одном из заседаний Британской ассоциации инженеров в 80-х гг. XIX в. говорилось, что за 3 года (с 1882 по 1885 гг.) произошло 228 случаев поломок валов на крупных английских пароходах. В чем же дело? Почему из нескольких изготовленных в схожих условиях единой технологии элементов один разрушается, а другой выдерживает нагрузку? Столкнувшись с этими начальными явлениями, инженеры начали испытывать элементы и конструкции в натуральную величину. Но и эти меры не исключали аварий и разрушений. Зимой 1938 г. в Хасалте (Бельгия) неожиданно разрушается цельносварной автодорожный мост через канал Альберта в тот момент, когда по нему никто не передвигался. С 1943 по 1958 гг. Американским комитетом по судостроению регистрируется 319 аварий и крупных разрушений нефтеналивных и других грузовых судов. Между 1942 и 1965 гг. описано 28 случаев переламывания судов на две части. В 1962 г. обрушился Королевский мост в Мельбурне (Австралия). Тяжелая авария с трагическими последствиями произошла в 1934 г. на строительстве Аризонского турбогенератора. Во время балансировочных испытаний цилиндрический корпус генератора длиной около 6 м и диаметром 2 м, изготовленный из высокопрочной стали, внезапно разлетелся на куски. Анализ показал, что корпус генератора разрушился от нагрузок, значительно меньших, чем расчетные. Почему?

Еще в начале 40-х гг. XIX в. в период активного изучения английскими инженерами причин поломок железнодорожных осей Уильям Джон Рэнкин (1820-1872) на основании длительных исследований пришел к такому заключению: "Возникновение разрушения начинается с появления гладкой, имеющей правильную форму мельчайшей трещины, которая затем опоясывает шейку вала и проникает вглубь ее в среднем на высоту 12-13 мм. В дальнейшем трещины постепенно распространяются от поверхности к центру оси до тех пор, пока толщина неповрежденного металла в центре станет недостаточной, чтобы выдержать удары, которым она подвергается". Через столетие уже при анализе разрушения упомянутого Аризонаского генератора эксперты также пришли к выводу, что в материале была внутренняя трещина, которая во время испытаний стала увеличиваться и привела к разрушению. Были и другие свидетельства того, что

первопричиной крупнейших аварий явилась мельчайшая трещина в материале. Какие же свойства материала приводят к тому, что мельчайшая трещинка развивается до опасных размеров, приводящих к аварийному исходу? Плиний старший (23-79 гг. н.э.) в своей весьма путаной "Естественной истории" указывает способ, с помощью которого можно отличить поддельный алмаз. Он советует положить предполагаемый алмаз на наковальню и ударить по нему тяжелым молотом. Если камень не выдержит, он не настоящий алмаз. Надо думать – было уничтожено немало драгоценных камней, ведь Плиний путает здесь твердость и вязкость. Алмаз – самый твердый из всех веществ, и его твердость очень полезна в тех случаях, когда необходимо резать, царапать или шлифовать – в этом и состоит его главное применение в технике. Но алмаз, как и другие твердые драгоценные камни, довольно хрупок, и если бы его даже добывали большими кусками и в больших количествах, все равно широко распространенным конструкционным материалам он бы не был.

Английский профессор Д. Гордон отмечал: "Самый тяжкий грех конструкционного материала – не недостаток прочности или жесткости, которые, конечно, совершенно необходимы, а недостаток вязкости, иными словами – недостаточное сопротивление распространению трещин". Можно примириться с недостатком прочности или жесткости и учесть их в процессе конструирования, но бороться с трещинами, которые оказываются очень опасными, застигая инженера врасплох, намного труднее. Большинство металлов и пород дерева, резина, стеклопластики – вязкие. Большинство материалов – стекло, посудная керамика, бетон – хрупки. Не так-то просто выявить то, что делает одни вещества вязкими, а другие – хрупкими. В то же время различие между хрупкостью и вязкостью очень осязаемо. Обожженная глина и кусок жести имеют примерно одинаковую прочность на разрыв. Но если вы уроните на пол глиняный горшок, он разлетится вдребезги, а с упавшей консервной банкой ничего не случится – в худшем случае на ней появится небольшая вмятина. Прочность на разрыв обычных стекол и керамик может быть довольно большой, но никому не придет в голову делать из них автомобиль. Причина ясна – очень уж они хрупки. Независимо от того, медленно или быстро прикладывается сила к хрупкому телу, стоит только начаться разрушению – трещины будут распространяться в нем очень и очень быстро – обычно со скоростью несколько тысяч километров в час. Именно поэтому разрушение кажется нам мгновенным. Энергия деформации упругого тела накапливается в натянутых химических связях, при разрушении тела эта энергия освобождается.

Но установить, что разрушение материала начинается с трещины – еще не означало решить задачу. Надо было проникнуть в природу сил, вызывающих в сплошном материале структурные дефекты в виде трещин. Советский ученый академик Н.Н. Давыденков обратил особое внимание на остаточные внутренние напряжения в деталях, т.е. на механические усилия

растяжения и сжатия, остающиеся внутри элемента после его изготовления. Остаточные напряжения сжатия – растяжения, уравновешивающие себя в пределах детали или ее части, были названы внутренними напряжениями первого рода. Оказалось, что подобные напряжения возникают при изготовлении деталей столь часто и оказывают такое серьезное влияние при эксплуатации изделия, что без познания их закономерностей невозможно создать прочное устройство. Хрупкое стекло, например, удается сделать весьма прочным только благодаря искусственному созданию внутренних напряжений, при которых во внешних слоях материала возникают напряжения сжатия, а внутренние слои оказываются растянутыми. Для того чтобы сломать такое стеклянное изделие, необходимо приложить к нему силу, которая разгрузила бы верхние слои от сжатия, а затем еще добавить к ней силу, которая бы растянула эти слои до предельного напряжения разрушения. Напряжения сжатия мешают поверхностной трещине раскрыться, "прорости" и разрушить стержень. Но при нарушении технологических режимов внутренние остаточные напряжения возникают неконтролируемо. Тогда на поверхности изделия могут образоваться остаточные напряжения растяжения, причем подчас такой величины, что это вызывает образование микроскопических трещин, которые впоследствии могут развиваться и вызвать разрушение. Иногда можно наблюдать, как на конвейере стекольного завода движущаяся после отжига бутылка внезапно взрывается, мгновенно превращаясь в горстку мельчайших остатков. Такая вещь может произойти и даже со стальным изделием при операции закалки – резком охлаждении стали. Эта операция в принципе позволяет управлять свойствами материала на молекулярном уровне, когда хотят закрепить выгодную структуру атомов в молекуле (так как при медленном остывании диффузионные процессы меняют структуру нежелательным образом). Однако резкая скорость остывания внешних и внутренних слоев приводит иногда к возникновению внутренних сил, от которых даже стальная деталь рассыпается или становится хрупкой, как стекло (в подобных случаях говорят, что деталь *перекалили*).

Кроме внутренних сил первого рода при эксплуатации изделий в действие приходят также и другие внутренние силы, названные напряжениями второго рода. Это не менее коварные, но еще более трудноразличимые силы. Выяснение их природы невозможно без изучения микроструктуры. Рассмотрение металла под микроскопом показывает, что он состоит из зерен – маленьких кристалликов, которые назвали кристаллитами. Каждый кристаллит представляет собой правильно расположенные ряды атомов, имеющие главную ось симметрии. Именно вдоль этой оси кристаллиты некоторых материалов при сжатии или растяжении показывают максимальные отклонения от первоначальных размеров. Своими главными осями зерна по-разному ориентированы в пространстве и плотно соединены между собой. Поэтому при изменении внешних условий, например темпе-

ратуры, между соседними зернами возникает несогласованность. Если с одной стороны границы какое-то зерно стремится сократиться, то соседние будут препятствовать этому. В зерне, которое стремилось сократиться, возникают силы растяжения, а зерно, которое сопротивлялось, окажется сжатым. Такие явления происходят на всех границах между зернами – кристаллитами. И чем больше перепад температур при резком остывании детали, тем больше будут эти силы. Это и есть напряжения второго рода. В некоторых материалах они так велики, что детали растрескиваются или взрываются, причем растрескивание может произойти не сразу, а со временем.

Но если в начале и не произошло видимого растрескивания, то все равно в структуре материала в растянутых зернах могут тайно возникнуть микроскопические трещины, которые в дальнейшем при эксплуатации вызовут преждевременное разрушение. Печальный опыт столкновения с напряжениями первого и второго рода, этим коварным внутренним врагом материала, заставляет тратить массу энергии и средств на борьбу с ними. Одним из основных методов является так называемый отжиг, т.е. долгий прогрев детали при такой температуре, когда материал все еще проявляет пластичность на макроуровне, но уже возникают диффузационные эффекты атомарного уровня. При этом происходит уменьшение внутренних сил за счет перераспределения атомов в пространстве.

Наконец, в материале существуют и внутренние напряжения третьего рода, которые возникают на атомарном уровне. Дефекты, вызываемые напряжениями третьего рода, настолько малы, что на протяжении десятков расстояний между атомами они уже затухают.

Таким образом, в любом реальном материале могут существовать как многочисленные несовершенства структуры – поры, трещины, микротрещины, внедренные атомы примесей, так и остаточные внутренние напряжения первого, второго и третьего рода. Внутренние напряжения всех видов существуют совместно друг с другом, суммируются, достигая на некоторых участках критической величины, которая и приводит к разрушению.

Итак, в технологическом процессе изготовления любого материала всегда возникают различные несовершенства микроструктуры. При воздействии внешней нагрузки они реализуются в виде трещин, с появлением и развитием которых начинается разрушение.

Описать природу сил, вызывающих внутренние напряжения в материале, которые приводят к разрушению, это было уже немало, однако далеко не все. Нужна была серьезная теория, способная определить объективные законы разрушения, описывающая процессы разрушения языком математических формул, нужна была специальная теория, рассматривавшая элемент не как сплошное идеальное тело, а как реальный деформируемый материал с реальными дефектами. Нужен был новый шаг вперед

от классической теории сопротивления материалов, новая ступень в познании прочности.

Анализ многочисленных разрушений громадных пароходов и военных кораблей, проделанный британскими учеными и кораблестроителями в начале XX в., помог установить, что деформация корпуса происходила от внезапного удара волны или от неравномерной нагрузки трюма. При этом разрушающая трещина возникала и начинала развиваться возле люков и всяких других отверстий и вырезов в корпусе судна. Конечно, инженеры принимали во внимание ослабление сечения в местах отверстий и усиливали эти места, но этогоказалось мало. Тут скрывалось какое-то неразгаданное явление, которое исследовал английский ученый, профессор К. Инглис. Увеличение напряжения в местах отверстий он назвал концентрацией напряжений. Напряжение, как известно было еще со времен Навье, равняется силе, деленной на площадь сечения. Если в пластинке вырезать такое, например, отверстие, которое уменьшит площадь ее сечения вдвое, то при той же силе напряжение возрастет тоже вдвое. Так рассуждали инженеры до Инглиса и соответственно этому усиливали места вокруг отверстий, например, судовых люков. Но Инглис в своей статье (1913 г.) доказал, что в этом случае с пластинкой напряжение у края отверстия возрастает не вдвое, как следовало ожидать, а во много раз больше. Отношение максимального напряжения у края отверстия к среднему для всего сечения пластинки получило название коэффициента концентрации напряжений. Величина его зависит от формы отверстия и свойств материала. Чем резче, острее переходы в сечении, чем сложнее форма отверстия, чем более хрупок материал, тем коэффициент концентрации больше. Инглис математически решил задачу о концентрации напряжений для эллиптических отверстий, квадратных люков в палубе, а также для отверстий в виде полуэллипса. Значение выводов Инглиса состояло в том, что они обобщались на отверстия любой вытянутой формы, вплоть до щели или трещины. В конечную формулу оценки напряжения в кончике трещины входили только две геометрические величины: длина трещины и радиус ее кончика. Это позволило использовать выводы Инглиса как для сомкнутой трещины, так и для царапины. Итак, Инглисом был сделан первый шаг на пути создания теории трещин.

Очень важно отметить, что каковы бы ни были размеры надрезов - концентраторов, сама концентрация напряжений всегда играет огромную роль. Как показал Инглис, всякое отверстие, либо острый надрез в материале создает в нем местное повышение напряжений. Этот местный всплеск напряжения, величину которого можно рассчитывать, зависит только от формы отверстия и никак не связан с его размерами. Все инженеры знают о существовании концентрации напряжений, но далеко не все воспринимают, почему крохотное отверстие ослабляет материал в той же степени, что и большая дыра, настолько это противоречит привычным

представлениям. Там, где есть малые отверстия и надрезы, материал начинает разрушаться от усталости очень скоро, но и при обычном статическом нагружении, т.е. под действием постоянных нагрузок, такие отверстия и надрезы делают свое дело. Когда стекольщик режет стекло, он не старается прорезать его на всю толщину листа, а делает лишь неглубокий надрез на поверхности, после чего по такой царапине стекло легко разламывается. Ослабляющее действие царапины практически не зависит от ее глубины: мелкая царапина действует ничуть не слабее глубокой, поскольку степень повышения напряжений зависит лишь от остроты ее кромки.

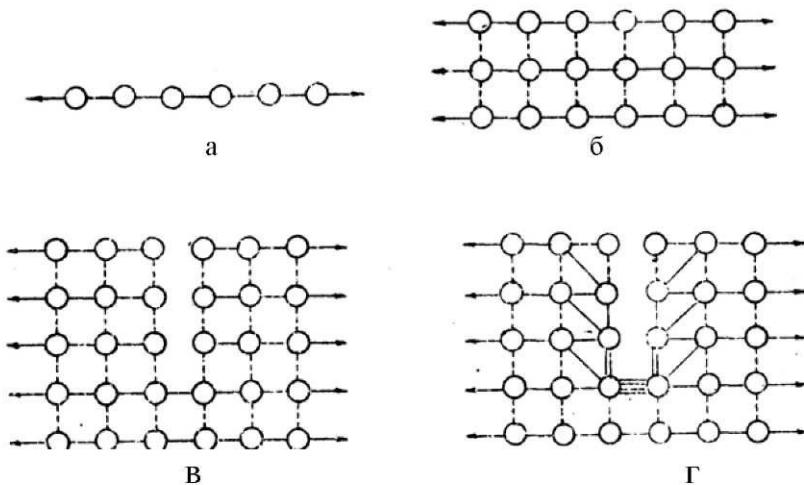


Рис. 2. Возникновение концентрации напряжений
у кончика трещины

Нетрудно нарисовать физическую картину того, что же в действительности происходит у таких надрезов, как трещины, особенно, если рассматривать существование дела на атомарном уровне. На рис.2, а видно, что при растяжении одиночная цепочка атомов испытывает равномерное напряжение, поэтому она обладает теоретической прочностью. Взяв еще несколько таких же цепочек и расположив их так, чтобы они образовали кристалл (рис. 2, б) мы увидим, что пока еще никто не мешает каждой цепочке в отдельности нести ее полное теоретическое напряжение. Предположим, что мы перерезали несколько соседних межатомных связей, т.е. создали трещину (рис. 2, в). Разумеется, разорванные цепочки уже не смогут, как прежде, нести нагрузку, передавая ее от атома к атому. Теперь эту работу должны взять на себя оставшиеся цепочки. И сила как бы обходит трещину по самому ее краю. Таким образом, почти вся нагрузка, которую несли разрезанные атомные цепочки, падает теперь на единственную атомную связь у самого кончика трещины (рис. 2, г). Ясно, что при подобных обстоятельствах перегруженная связь оборвется раньше всех других. Когда же такое перегруженное звено лопнет, положение только ухудшится, т.к. на долю соседнего звена добавится не только нагрузка перерезанных с самого начала цепочек (при создании трещины), но еще и та доля нагрузки,

которая приходилась на только что лопнувшую цепочку. Таким образом, трещина в кристалле оказывается инструментом, с помощью которого приложенная извне слабая сила рвет поочередно одну за другой прочнейшие межатомные связи. Так трещина и бежит по материалу, пока не разрушит его до конца.

Инглис вычислил коэффициенты концентрации напряжений, показывающие, во сколько раз местное напряжение больше среднего для вырезов различной формы (прямоугольных, круглых и цилиндрических отверстий). Сильно вытянутое эллиптическое отверстие можно считать трещиной. Для нее коэффициент концентрации напряжений будет выражаться формулой

$$1 + 2\sqrt{L/R},$$

где L – полудлина трещины, R - радиус кривизны ее кончика. Оказалось, что эта формула справедлива не только для эллипса: у всякого острого надреза коэффициент концентрации напряжений имеет почти такую же величину. Кстати сказать, у круглого отверстия местное напряжение втрое превышает среднее. Рассмотрим микротрещину длиной, скажем, 2 мм с радиусом кривизны ее кончика 1 \AA ($1 \text{ ангстрем} = 10^{-10} \text{ м}$). Такая трещина слишком мала, чтобы ее удалось увидеть с помощью оптического микроскопа, ее трудно увидеть даже с помощью электронного микроскопа. (Дело в том, что в оптическом микроскопе увидеть объект по размерам намного меньше, чем длина волны освещдающего их света, принципиально невозможно. В лучшем случае он позволит видеть предметы размером около полумикрона ($1 \text{ микрон} = 1 \text{ мк} = 10^{-6} \text{ м}$). А вот в электронном микроскопе изображение создается электронами с длиной волны около $1/25 \text{ \AA}$, в то время как взаимный свет имеет длину волны около 4000 \AA). И вот такая микротрещина повышает напряжение у своего кончика примерно в 200 раз!

Самый значительный вклад в теорию трещин и вообще в механику разрушения было суждено сделать английскому исследователю, сотруднику авиационного центра А.А. Гриффитсу (1893 - 1963). Его больше всего интересовали причины потери прочности различных материальных тел. Поэтому Гриффитс, в частности, занялся изучением непостоянства прочности стекла. Стекло – один из древнейших материалов на Земле. Несколько тысяч лет назад человек открыл технологию производства стекла. Стеклянными бокалами гордился еще римский император Нерон, а мастера его времени могли создавать из стекла даже портретные скульптуры. И сейчас вызывает восхищение изображение головы Цезаря Августа, выполненное из стекла. Теперь стекло вошло в нашу жизнь тысячами разных вещей. Как конструкционный материал стекло занимает третье место после металла и дерева. В то же время стекло находится на первом месте среди этих материалов по количеству загадок и секретов, не познанных до сих пор. Одной из таких тайн является тайна его прочности. Ни один материал не имеет такого разброса свойств по прочности, как стекло. В одной

его партии могут оказаться образцы и прочнее стали, и слабее льда. Гриффитс начал опыты со стеклом. Он сам плавил его, вытягивая из расплава тонкие нити и испытывая их на прочность при растяжении. Результаты поразили ученого. Прочность свежевытянутых волокон намного превосходила прочность лучших сталей того времени. Самые высокие показатели удавалось получить только на тонких, буквально волосяных волокнах. Чутье подсказывало Гриффитсу, что он стоит на пороге распознания интереснейшей тайны материала. Он заметил, как резко падает прочность стекла, если в процессе его изготовления в нем возникают царапины. Вероятно, в период этих экспериментов у Гриффитса зародился план исследования влияния трещин на величину разрушающей силы. Поскольку стекло упруго деформировалось вплоть до разрушения, это позволило применить к нему без особых погрешностей аппарат теории упругости, а результаты исследований распространить на любой упругий материал. Трудно предположить сейчас, насколько бы задержалось развитие механики разрушения, выбери Гриффитс для своих опытов иной материал. Другим важным подспорьем в исследованиях Гриффитса явились разработки теоретиков о концентрации напряжений. Главная заслуга Гриффитса заключается в том, что он впервые связал причины возникновения и развития трещин в твердом теле с энергией деформации. Суть его рассуждений сводилась к следующему: допустим, перед нами какой-то элемент, например, стержень. Прикладывая к стержню силу, мы заставляем его удлиняться. Чем больше сила, тем больше удлиняется стержень. Если удлинение стержня происходит в пределах его упругих свойств, то мы, совершая над ним работу, равную половине произведения силы на удлинение, тем самым "накачиваем" в него потенциальную энергию. Стоит нам только снять нагрузку, как эта энергия превратится в кинетическую, и стержень сократится до прежних размеров. Удобно рассчитывать удельную энергию, запасаемую упругим стержнем, т.е. энергию на единицу объема твердого тела. Несложные преобразования показывают, что удельная энергия, накапливаемая в упругом растягиваемом теле, равна половине произведения относительной деформации на напряжение, вызвавшее эту деформацию.

Используя подобное представление об энергии деформированного тела, Гриффитс сформулировал свою гипотезу: трещина в твердом теле возникнет и начнет развиваться, если занесенная и оставшаяся в нем в процессе деформации упругая энергия будет больше энергии, необходимой для образования трещины. Гриффитс предположил, а затем доказал, что для образования единицы поверхности трещины (например, 1 см²) требуется определенное количество энергии, постоянное для каждого материала.

Гриффитс ввел понятие удельной энергии трещинообразования, которая стала называться "константой Гриффитса". Как только энергия деформации в теле превзойдет эту величину, то либо начнут возникать новые

трещины, либо существовавшие ранее, до приложения силы, хотя и небольшие трещины, станут лавинообразно развиваться. По результатам своих тонких, оригинальных экспериментов Гриффитс построил график зависимости прочности от длины трещины, из которого следовало, что чем меньше размер трещины, тем больше прочность. Кривая обрывалась на минимальных, полученных экспериментально размерах трещин. У Гриффитса возникло естественное для исследователя желание определить крайние оценки прочности. То, что для бесконечной трещины прочность должна быть равна нулю, очевидно. Просто тело разделяется на две части. А что, если уменьшить размер трещин до размера в одно межатомное расстояние? Соблюдая тот же геометрический закон изгиба кривой, Гриффитс продолжает ее до величины трещин в одно межатомное расстояние, т.е. производит экстраполяцию. Таким образом, была получена теоретическая прочность.

Итак, английский ученый А.А.Гриффитс в начале 20-х гг. открыл новое направление в обширной науке о прочности. Тысячи инженеров и научных работали над тем, чтобы сделать тела прочнее, Гриффитс же задумался над тем, почему они разрушаются. В поисках прочности он пошел от обратного. И будучи уверенным в том, что виной разрушения являются трещины, исследовал их природу. Он нашел энергетический закон, которому подчиняется разрушение в твердых телах и вывел свою константу – удельную энергию трещинообразования. Например, для алмаза она равна $5400 \text{ эрг}/\text{см}^2$. Это значит, что для того, чтобы создать в алмазе трещину площадью 1 см^2 - нужно приложить такую силу, которая вызовет энергию в 5400 эрг ($1 \text{ эрг}=10^{-7} \text{ Дж}$). Наконец, Гриффитс вывел формулу зависимости прочности от размера трещины и построил график этой зависимости для стекла.

Большое практическое значение имели опыты Гриффитса по определению теоретической (максимальной) прочности стеклянных стержней. Вначале Гриффитс испытал стеклянные стержни толщиной 1 мм и на разрывной машине получил их прочность, равную $2000 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Затем он последовательно уменьшал диаметр стеклянных нитей и для волокон диаметром 2,5 мк получил огромную практическую прочность на разрыв – $60000 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Только техника не позволяла получить теоретическую прочность в эксперименте. Гриффитс задумался, если материал по своей природе обладает такой громадной прочностью, то куда она девается в реальных телах? Почему нормальные, осязаемые стеклянные стержни оказываются в 30-40 раз слабее тонких волокон, вытянутых из расплава? Гриффитс предположил, что в каждом материале имеется тонкий поверхностный слой, значительно более прочный, чем внутренние слои. Причем этот слой имеет постоянную толщину, не зависящую от диаметра стержня или нити. При таком предположении получается, что с уменьшением диаметра испытываемой на разрыв нити площадь сечения поверхностного слоя по

отношению ко всему поперечному сечению будет возрастать. А так как этот слой и более прочен, то и прочность всего стержня будет возрастать с уменьшением его диаметра.

Однако, эксперименты крупнейшего советского физика А.Ф.Иоффе противоречили предположению Гриффитса о роли поверхностного слоя в масштабном факторе. На стержнях диаметром до 4 мм Иоффе растворял поверхностный слой толщиной до 60 мк. Оказалось, что прочность нити не только не уменьшается, но даже намного возрастает. Для того чтобы объяснить результаты опытов Гриффитса и Иоффе, оставалось допустить только одно: в снижении прочности повинны поверхностные трещины. Иоффе растворял слой с поверхностными трещинами, и их влияние исчезло, а прочность резко возрасала, приближаясь к теоретической. Гриффитс испытывал волокна с трещинами, и их влияние было тем больше, чем толще волокно. Следовательно, трещины были, но только поверхностные. По формуле Гриффитса можно было даже оценить их длину, если считать возможной теоретическую прочность. Длина этих трещин по расчету получалась очень малой – доли микрона, а по раскрытию – меньше длины волны света, поэтому увидеть их в обычный оптический микроскоп было невозможно (это оказалось возможным значительно позднее с изобретением электронного микроскопа). Вот этим-то трещинам, уменьшающим прочность в тысячу раз, и дали название "гриффитсовых трещин". А явление увеличения прочности хрупких тел за счет растворения дефектного поверхностного слоя получило название "эффекта Иоффе".

Фундаментальные исследования К. Инглиса, А.А. Гриффитса, А.Ф. Иоффе и других ученых заложили надежное основание для создания новой отрасли науки о прочности – механики разрушения. Эта наука опиралась на результаты развития физики твердого тела в первой четверти XX века. К этому времени уже сложились взгляды на характер разрушения в твердых телах, представления о теоретической и практической прочности, и утвердилась довольно стройная теория трещин Гриффитса. Но откуда же все-таки берутся трещины Гриффитса? Советский физик А.В.Степанов, ученик и последователь Иоффе, изучая причины появления трещин в хрупких телах, пришел к выводу, что начальные, зародышевые трещины являются результатом пластической деформации. Степанов утверждал, что в процессе нагружения в хрупком материале появляется очаг разрушения именно от пластической деформации, которая всегда предшествует появлению трещин. Это противоречило существовавшему тогда мнению, что пластическая деформация делает материал (например, металл) более прочным. В 1933 г. Степанов столкнулся с одним явлением, что в дальнейшем привело к открытию им многих закономерностей. Состояло оно в следующем. Ученый обнаружил, что даже слабые прикосновения к отдельным точкам поверхности кристалла вызывают огромные удельные нагрузки, соизмеряемые с теоретической прочностью. Представьте себе лежащую на

поверхности стекла пылинку в виде шарика диаметром всего 2 мк. Если к ней прикоснуться пальцем с силой всего 0,2 г, то шарик в точке касания надавит на стекло с той же силой, но на очень малом участке площади касания. При этом возникнут напряжения в 100000 кгс/см^2 . Как видно, это уже соизмеримо с теоретической прочностью. Кроме того, если такое незаметное для глаза повреждение совпадает с определенными плоскостями атомных слоев кристалла, то при дальнейшем растяжении его сдвиг начинается именно от этих повреждений. Такое явление Степанов назвал "зародышевым сдвигом". Этот зародышевый сдвиг и является началом пластической деформации в кристалле.

Уже к началу 20-х гг. были известны опыты, показывающие, что на первом этапе пластического деформирования порядок атомов нарушается. Более того, как показало рентгеновское облучение, кристаллы при этом немного разрыхляются. Определяя, куда уходит энергия при пластическом деформировании, Дж. Тейлор обнаружил, что примерно десятая часть ее сохраняется в материале в виде запасенной упругой энергии, выделяющейся в образце после его освобождения от внешних сил. Для объяснения природы пластичности необходимо было проникнуть в тайны взаимодействия между атомами. Уже в 30-х гг. было известно, что даже самые лучшие материалы в смысле структуры далеки от идеала. Английский физик Дж. Тейлор и решил привлечь представления о дефектности для объяснения расхождения между теоретическими и действительными оценками сил сдвига. Тейлор допустил, что есть какие-то области кристалла, очень малые, где правильный порядок атомов нарушен, ряды их смяты, смешены. Именно английским словом "дислокация", т.е. смещение, он и назвал это нарушение. Со временем под этим словом – дислокация – стали понимать не само смещение, а участок материала с нарушенным порядком. Эта теория, рожденная вначале лишь с целью объяснения механических процессов деформирования и разрушения, повлияла на трактовку многих физических явлений.

При деформировании материала дислокаций становится все больше и больше; двигаясь по кристаллу, они начинают мешать друг другу, переплетаясь, словно спутанные нитки. В результате материал упрочняется, и, если продолжать его деформировать, он станет хрупким. Каждому знаком жизненный пример: если надо сломать проволоку, то следует ее несколько раз согнуть взад-вперед. Сначала металл деформируется легко, затем немного упрочняется и, наконец, ломается хрупким образом. Металл, упрочненный деформацией, может быть возвращен в исходное мягкое состояние путем отжига, т.е. нагревом его до полной или частичной перекристаллизации. При этом большинство избыточных дислокаций исчезает.

Многочисленные исследования в области пластичности привели к созданию нового раздела теории упругости, которая стала называться те-

рией упругости и пластичности. Но теория дислокаций значительно расширилась и ушла за пределы объяснения механизма пластичности.

Только спустя 20 лет после исследований А.В.Степанова была открыта дислокационная природа его "зародышей". Дж.Гилманом в 1956 г. было установлено, что "зародыши" Степанова являются "клубком" дислокаций. Теперь точно известно, что "зародыши" трещин Степанова возникают как при различных воздействиях на тело – царапинах, уколах, влияниях газовой среды, так и в процессе изготовления материала. Сейчас принято считать, что в идеальной решетке атомов невозможно образование устойчивых трещин. Однако проверить это экспериментально почти невозможно, т.к. невозможно получить на практике кусок материала с идеальной решеткой. В любом монокристалле существуют дислокации, которые при растяжении, например, начинают двигаться по удобным для этого плоскостям и выходить на поверхность, образуя ступеньки. Эти плоскости называют плоскостями скольжения, а пачка таких плоскостей, близких друг к другу, представляет уже полосу скольжения, которую можно различить под микроскопом. Если на кристалл воздействовать силой, вызывающей сдвиг его частей по плоскостям, в которых лежат дислокации, они начнут сдвигаться, не сликаясь. Если при этом дислокация встретит какое-то препятствие, то она остановится, и к ней будут приближаться остальные дислокации одного знака. Внешняя сила может настолько возрасти, что дислокации выстроются в ряд у препятствия, и образуется трещина. Это и есть один из наиболее наглядных механизмов образования трещины. Его впервые заметил Зинер в 1948 г., а другой ученый Стро в 50-х гг. количественно описал это явление и нашел формулы для определения механических напряжений вокруг такого скопления дислокаций. В дальнейшем для разных условий, кристаллических структур и веществ этот механизм зарождения трещин математически осмысливали многие ученые – механики, и сейчас этот механизм называют моделью Зинера – Стро. Мы рассмотрели один из самых типичных механизмов образования трещин. При многих других механизмах наблюдаются те же этапы: рождение дислокаций, их движение, возникновение препятствий перед ними, скопление дислокаций у препятствий и, наконец, возникновение трещины от больших, соизмеримых с теоретическими, напряжений.

Итак, трещина родилась. После рождения у микротрещин выделяют два периода, из-за которых сами трещины получили название докритических и критических. Для того чтобы маленькой трещине дорasti до критической, т.е. той самой трещины Гриффита, с которой уже считаются конструкторы, она должна питаться. При докритическом периоде жизни трещина активно питается пустотой, т.е. теми же дислокациями, которые толпами к ней прилипают. Когда трещина по тем или иным причинам выросла до размеров трещины Гриффита, т.е. такой, которая при растяжении, например стекла, сможет увеличиться и разделить стержень на две части,

процессы, сопровождавшие ее движение, обретают особый характер. Сейчас ученые убеждены, что движение любой трещины должно сопровождаться пластической деформацией, хотя и очень малой, только в ее кончике. Немецкие исследователи Кранц и Шадрин в 1929 г. впервые обнаружили, что время движения трещины распадается на два этапа: в течение первого этапа трещина разгоняется, на протяжении второго – летит с постоянной скоростью, мало зависящей от размеров тела. Измерения этих ученых показали, что трещина в стекле летит примерно вдвое быстрее пистолетной пули, т.е. около 1,5 км/с. В начале 60-х гг. Дж.Филд установил (безжалостно коля прекрасные алмазы), что трещина в алмазе летит уже с космической скоростью – почти 8 км/с. Это самая высокая измеренная экспериментально скорость трещины. Почему же такая скорость возникает именно в алмазе? Многочисленные исследования показали, что предельная скорость трещины зависит от упругих характеристик материала, в том числе и от скорости распространения в нем звука. Она составляет обычно 0,6 – 0,7 от скорости звука, а в алмазе поперечные упругие волны распространяются со скоростью 12 км/с. А какова минимальная скорость развития критических трещин? Если говорить о естественно развивающихся под нагрузкой трещинах, то скорости их тем меньше, чем пластичней, вязче материал. Например, в кремниевой резине предельная скорость развития трещины оказалась равной всего 3 м/с.

Одним из эффективных методов борьбы с трещинообразованием является создание в материале на пути трещины сжимающих напряжений. Трещина, развивающаяся в растянутых слоях, задерживалась в сжатых слоях. Этот способ можно осуществлять как для массивных изделий, так и на уровне размеров зерен в поликристалле. Так, например, идея создания остаточных механических напряжений сжатия в зонах возможного развития трещин стала преобладающей в технологии изготовления орудий стволов и получила различные технические воплощения. Чем глубже человек проникал внутрь структуры, тем становилось яснее, что с трещиной надо бороться в самом ее зародыше. В этом плане трещиной можно считать и дислокацию. Эксперименты показали, что остановка движения дислокаций в материале повышает его прочность. Перед учеными встало задача поиска методов остановки, задержки дислокаций. Эти способы, оказывается, уже применяли стихийно, без осознания процессов, происходящих в материале. Например, легирование сталей и других металлов, создание легко зернистой структуры и т.п. порождало препятствие для движения дислокаций и их скопления в микротрещине. Даже наклеп, самый древний способ упрочнения металла, есть одновременно и самый древний способ борьбы с движением дислокаций, этих "молекул" трещины. При наклете порождается столько дислокаций, что они мешают сами друг другу двигаться. Что касается трещины Гриффитса, то результаты опытов Иоффе подсказали простой путь борьбы с ними. Их надо просто уничтожить, растворяя по-

верхностный слой. И в самом деле, этот путь привел к увеличению прочности стеклянных волокон в 50-100 раз. Чтобы затем ликвидировать условия, которые порождают новые трещины Гриффитса, стекло после растворения верхнего слоя необходимо покрыть специальными пленками, как препятствующими проникновению воды, так и смягчающими локальные нагрузки, порождающие "зародыши", обнаруженные Степановым.

Интересным оказалось техническое решение тормозить трещины трещинами. Эффект тут заключается в том, что острые трещины развиваются из-за высоких концентраций напряжения в ее кончике. Если эта трещина начнет расти и кончиком войдет в круглую пору или в специально сделанное отверстие, то острый кончик исчезнет, и концентрация напряжений в такой трещине резко падает, это и останавливает ее. Другой способ остановки трещины – создание на их пути более прочных препятствий. Это уже путь к составным, или композиционным материалам. По-научному это называется дисперсионное упрочнение. Наконец, еще одним эффективным способом борьбы с трещиной является создание на ее пути текущих, пластичных частиц или слоев. Трещина, войдя в них, сильно притупится, уменьшит остроту своего кончика, ослабит концентрацию напряжений в нем и сможет развиваться дальше только при значительном увеличении внешней силы.

Задолго до познания природы возникновения трещин мастера интуитивно искали пути создания прочных изделий. Так, например, русские кинжалы создавались трехслойными. Средняя, прочная, но хрупкая полоса обкладывалась с двух сторон вязкими железными полосами, которые в горячем состоянии проковывались до сварки. Одним из способов остановки трещин, например в металлических сосудах, является создание в определенных местах таких температур, которые делают металл значительно более вязким и останавливают за счет этого проникшую в эту зону трещину. Температурный метод остановки трещины сейчас активно разрабатывается, т.к. многие сосуды работают именно в условиях повышенных температур изнутри или снаружи.

В последнее время советскими учеными разработан новый эффективный метод борьбы с трещинами в трубопроводах, суть которого состоит в следующем: когда трещина возникает, то она, как уже известно, полетит со скоростью пули. Как ее догнать и остановить? Оказывается, для этих целей в металлических трубах можно использовать электрический ток, для которого острый кончик трещины – такой же концентратор, каким он является для механических напряжений. Если к различным краям трещины подвесить мощный электрический ток, то в кончике летящей трещины образуется электрическое напряжение, которое расплавит этот кончик. На месте его возникнет раковина, участок металла вокруг нее станет мягким, пластичным от нагрева. Это и остановит трещину. Таким образом, успех борьбы с трещинами будет зависеть от способности предсказать время и место их

зарождения. Это оказалось самым трудным, особенно для хрупких материалов. Наиболее перспективным методом здесь может быть улавливание "голоса" зарождающейся и летящей трещины. Излучение шумов при механическом деформировании материалов называют акустической эмиссией. Шумит только пластиически деформируемый материал или "берега" раскрывающейся трещины. Металл больше всего шумит перед самым разрушением и при повторном нагружении "смолкает" до тех пор, пока не будет достигнуто предыдущее усиление. Методы акустической эмиссии активно разрабатываются в настоящее время во многих странах для предсказания опасного состояния корпусов самолетов, атомных реакторов, котлов, ракет, сосудов высокого давления, труб и т.д. Но и в наши дни из-за трещин происходят катастрофы и аварии, борьба с трещинами продолжается.

Наше время – период бурного развития техники, невиданной за всю историю человечества научно-технической революции. Огромных успехов достигли различные отрасли промышленности – горное дело, машиностроение, металлургия, авиация и космонавтика. Мощные темпы развития современной техники стимулируют развитие научных исследований. Недаром Ф.Энгельс сказал, что если у общества появляется техническая потребность, это продвигает науку вперед больше, чем десяток университетов. Именно эта техническая потребность задает в наши дни ученым все новые, более сложные задачи. Так, например, применение даже обычных конструкций в новых условиях – при очень высоких и очень низких температурах, при больших скоростях, под действием облучения и т.п. – привело к необходимости тщательного изучения физических процессов, происходящих в теле под нагрузкой.

Вся предшествующая нашему времени история науки о прочности представляет собой возникновение и развитие двух подходов к проблеме прочности – макро- и микроскопического. В течение двух столетий на основе макроскопического представления о материале как сплошной среде учёные построили классическое здание науки о сопротивлении материалов и теории упругости. Затем начали развиваться атомистические взгляды на прочность, которые в течение нескольких десятилетий сформировали механику разрушения. И вот уже в последние несколько лет учёные пытаются найти связь между этими двумя подходами и создать обобщенную теорию микро- и макроразрушения. Исследователи в своем подходе приближаются к жизни реального материала, в котором неизбежно сочетаются микродефекты (дислокации и микротрещины) и макроскопические нарушения (например, трещины, поры).

Радикальный пересмотр представлений о механическом разрушении в твердых телах осуществил советский физик Серафим Николаевич Бурков. Он стал одним из основателей новой кинетической теории разрушения. Согласно этой теории первопричиной разрушения в твердом теле являются

тепловые флуктуации, т.е. хаотические колебания атомов, в результате которых в теле накапливается энергия.

Все существовавшие ранее теории прочности связывали представления о разрушении твердого тела с понятием предела прочности, который считался для данного материала постоянной величиной. Такой механический подход предполагал, что тело разрушается только при критической нагрузке, равной или превосходящей предел прочности материала, а сила, меньшая критической, разрушения не вызывает. Понятие о пределе прочности в дальнейшем не изменялось и было перенесено на атомистическое представление о прочности. Тогда тот же предел прочности стали связывать с разрывом межатомных связей. Однако многочисленные испытания материалов под нагрузкой показали, что прочность тела зависит не только от механической силы, но и от времени ее воздействия. В частности, разрушение тела может возникнуть при любой нагрузке, но чем она меньше критической, тем момент разрушения в теле наступает позже. При увеличении силы время разрушения сокращается, становясь в конечном итоге весьма малой величиной. Поэтому предел прочности не может быть постоянным критерием прочности материала. В напряженном теле происходят сложные процессы, природу которых удалось познать лишь в результате многочисленных исследований долговечности разных материалов при различных температурах. Эксперименты показали, что для каждого материала прочность образца зависела от времени, а не от постоянного значения предела прочности. Даже при малой нагрузке образец в конце концов разрушался, хотя ждать этого момента зачастую приходилось довольно долго. Влияние времени на разрушение материала сохранялось и при изменении температуры тела, только темпы снижения долговечности при возрастании нагрузки для высоких температур по сравнению с более низкими неуклонно снижались. В результате исследований, выполненных с позиций кинетической тепловой теории, советские физики вывели кинетическое уравнение прочности, установив при этом весьма важное явление. Частота колебаний атомов практически для любых материалов приблизительно равна 10^{13} Гц, т.е. время одного атомного колебания равно 10^{-13} с. И вот оказалось, что время, в течение которого образец "живет" при максимальной нагрузке, совпадает с этой величиной. На основании этих экспериментов и теории теплового движения атомов сотрудниками физико-технологического института АН СССР были выведены зависимости энергии атомных колебаний от механических характеристик материала, в том числе от прочности. Это еще один новый подход к проблеме прочности твердого тела.

Но можно ли сказать, что теория и практика в познании прочности приближаются к пределу? Безусловно, нет. Жизнь ставит новые задачи, порождаются новые технические потребности. Например, дальность телевизионных передач напрямую зависит от высоты антенны передающей станции. Однако строительство телевизионных мачт высотой 2-3 км и вы-

ше невозможно ввиду отсутствия на сегодняшний день материалов, способных выдержать возникшие при эксплуатации такой мачты нагрузки. Для авиации и космонавтики нужны материалы прочнее стали и легче воздуха. Нужен материал тверже алмаза, но при этом легкоплавкий, чтобы из него можно было изготовить обрабатывающий инструмент (сверла, резцы, долота и т.п.). Нужна спецодежда для работы человека в кратере действующего вулкана. Но сегодня эти и многие другие потребности остаются неудовлетворенными и не только из-за технологии производства. Не хватает еще многих научных результатов, нужны новые теории. Поэтому самое интересное в познании механики деформируемого твердого тела - впереди!

1.4. Основные проблемы механики деформируемого твердого тела

Значительная часть в механике сплошной среды посвящена исследованию движений и равновесию твердых деформируемых тел. В настоящее время приобретают все большее значение разделы механики, посвященные изучению усложненных упругих свойств тел и учету неупругих эффектов в твердых телах, таких как пластичность, связанная с появлением остаточных деформаций, и ползучесть, связанная с постепенным нарастанием деформаций при неизменных внешних нагрузках (явление ползучести проявляется при долговременной работе различных конструкций, а при повышенных температурах – и в короткие промежутки времени).

Проблема определения остаточных деформаций в конструкциях является очень трудной. Помимо сложности, возникающей уже при рассмотрении задач для упругих конструкций, находящихся под действием переходной нагрузки, усложняющими обстоятельствами служат: диссиляция энергии, переходящей в пластическую работу, упругая разгрузка из пластических состояний, упрочнение, зависимость предела текучести от скорости деформации, влияние геометрических изменений и различные иные нелинейные эффекты.

Успехи в данной области тесно связаны с запросами современной техники, например, с применением импульсного нагружения во многих технологических процессах (формовке, сварке, упрочнении и резке механических заготовок и т.д.).

Большое значение имеют изучения различных видов усталости материалов, учет явлений наследственности в процессах движения и равновесия тел.

Разработка и внедрение новых классов композиционных материалов и постоянное расширение сварки, использование композитов стимулирует развитие исследований по прогнозированию их свойств методом расчета оптимизации конструкций из них.

Развитие новейшей техники, эксплуатация которой протекает в сложных условиях нагружения при взаимодействии различных физических факторов, стимулировало создание и разработку теории со пряженных полей.

Проблема взаимодействия физических полей в деформированном теле приобретает особенно важное значение при анализе прочности и надежности элементов конструкций и сооружений, находящихся под действием высоких температур, давлений и сильных электромагнитных полей.

В последнее время в связи с быстрым развитием авиационной и космической техники, судостроения, точного машиностроения значительно усилился интерес к исследованиям в области оптимального проектирования. На основе оптимального проектирования достигается значительно снижение веса летательных аппаратов, улучшение механических характеристик конструкций.

Наконец, большое значение имеют работы, посвященные общей задаче о прочности и о разрушении конструкций из различных материалов. Эта важнейшая практическая задача до сих пор еще не имеет ясного удовлетворительного решения. Долговечность конструкций приходится оценивать во многих случаях в условиях нестационарных силовых и температурных режимов нагревания, при этом могут протекать различные процессы длительного разрушения. К таким обычно относят статическую усталость, возникающую в результате выдержки конструкционных элементов во времени под действием усилий, мало- и многоцикловую усталость, связанную с циклическими сменами усилий безотносительно ко времени выдержки, а также процессы поверхностных разрушений при действии напряжений и агрессивных сред. Длительному разрушению подвержены не только традиционные металлические, но и различные новые неметаллические материалы – полимеры, керамика, стекло и различные композиты, причем многие неметаллические материалы обнаруживают как циклическую, так и указанную статическую усталость практически в любых тем-

пературных условиях, ввиду чего проектирование изделий из этих материалов неизбежно наталкивается на необходимость их расчетов на длительную прочность.

Важные новые современные теории, в которых исследуются проблемы взаимодействия мощных лазерных лучей с различными телами.

В последнее время проводится очень много исследований в области биологической механики, которая будет очень активно развиваться в XXI веке.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УТВЕЖДАЮ

Заместитель Министра образования Российской Федерации

В.Д.Шадриков

15 марта 2000 г.

Номер государственной регистрации 415 ЕН /СП

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ СТАНДАРТ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Специальность 010500 - Механика

Квалификация - Механик

Вводится с момента утверждения

Москва 2000

5. СРОКИ ОСВОЕНИЯ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВЫПУСКНИКА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 010500 Механика.

Срок освоения основной образовательной программы подготовки механика при очной форме обучения составляет 260 недель, в том числе:

теоретическое обучение, включая научно-исследовательскую работу студентов и практикумы (в том числе лабораторные работы) 155 недель

* Экзаменационные сессии не менее 35 недель

* практики (учебная и/или производственная) не менее 16 недель

* Итоговая государственная аттестация, включая подготовку и защиту выпускной квалификационной работы не менее 12 недель

* Каникулы (включая 8 недель последипломного отпуска) не менее 42 недель

5.2. Для лиц, имеющих среднее (полное) общее образование, сроки освоения основной образовательной программы подготовки механика по очно-заочной (вечерней) и заочной формам обучения, а также в случае сочетания различных форм обучения увеличиваются вузом до одного года относительно нормативного срока, устанавливаемого п.1.2 настоящего Государственного образовательного стандарта.

5.3. Максимальный объем учебной нагрузки студента устанавливается 54 часа в неделю, включая все виды его аудиторной и внеаудиторной (самостоятельной) учебной работы.

5.4. Объем аудиторных занятий студента при очной форме обучения не должен превышать в среднем за период теоретического обучения 32 часа в неделю. В указанный объем не входят обязательные занятия по физической культуре, иностранному языку и факультативным дисциплинам. Объем обязательных аудиторных занятий по блоку общепрофессиональных дисциплин должен составлять не менее 2/3 от общего объема часов, указанных в настоящем стандарте.

5.5. При очно-заочной (вечерней) форме обучения объем аудиторных занятий должен быть не менее 10 часов в неделю.

5.6. При заочной форме обучения студенту должна быть обеспечена возможность занятий с преподавателем в объеме не менее 160 часов в год.

5.7. Общий объем каникулярного времени в учебном году должен составлять 7-10 недель, в том числе не менее двух недель в зимний период.

6. ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ И УСЛОВИЯМ РЕАЛИЗАЦИИ ОСНОВНОЙ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ПОДГОТОВКИ ВЫПУСКНИКА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 010500
Механика.

Подготовку по специальности 010500 Механика, могут осуществлять только высшие учебные заведения, получившие лицензию Министерства образования РФ на основе положительного экспертного заключения Отделения (Научно-методического совета) по математике и механике УМО университетов России.

6.1. Требования к разработке основной образовательной программы подготовки механика

6.1.1. Высшее учебное заведение самостоятельно разрабатывает и утверждает основную образовательную программу вуза для подготовки механика на основе настоящего Государственного образовательного стандарта. Дисциплины по выбору студента являются обязательными, а факультативные дис-

циплины, предусматриваемые учебным планом высшего учебного заведения, не являются обязательными для изучения студентом.

Курсовые работы являются важным элементом учебно-исследовательской работы студентов. Количество и трудоемкость курсовых работ определяются факультетом в соответствии с рекомендациями НМС по математике и механике УМО университетов России.

Контрольные работы являются необходимым элементом освоения дисциплин общепрофессионального цикла. Контрольные работы планируются по каждой дисциплине общепрофессионального цикла, по которой предусмотрены практические или лабораторные занятия. На каждые сто часов общего объема часов планируется не менее одной контрольной работы. Количество контрольных работ по дисциплинам определяется факультетом.

По всем дисциплинам, включенными в учебный план высшего учебного заведения, должна выставляться итоговая оценка (отлично, хорошо, удовлетворительно, неудовлетворительно или зачтено, незачтено).

6.1.2. При реализации основной образовательной программы высшее учебное заведение имеет право:

- Изменять объем часов, отводимых на освоение учебного материала, для циклов дисциплин и дисциплин, входящих в цикл, в пределах 10% без превышения максимального недельного объема нагрузки на студентов и при выполнении требований к содержанию.

- * Объединять, разделять общепрофессиональные дисциплины направления при условии сохранения объема часов и реализации минимума содержания дисциплин.

- * Формировать цикл гуманитарных и социально-экономических дисциплин, который должен включать не менее пяти обязательных дисциплин из одиннадцати, приведенных в настоящем Государственном образовательном стандарте. При этом в перечень выбранных вузом дисциплин должны входить дисциплины «Иностранный язык» в объеме не менее 340 часов и «Физическая культура» в объеме не менее 480 часов, «Отечественная история» и «Философия». Объем часов по каждой из последних дисциплин предусматривается не менее 136. Если вуз выбирает более пяти дисциплин, объем часов по отдельным из них может быть сокращен.

- * Занятия по дисциплине «Физическая культура» при очно-заочной (вечерней), заочной формах обучения и экстернате могут предусматриваться с учетом пожелания студентов. Осуществлять преподавание гуманитарных и социально-экономических дисциплин в форме авторских лекционных курсов и разнообразных видов коллективных и индивидуальных практических занятий, заданий и семинаров по программам, разработанным в самом вузе и учитывающим региональную, национально-этническую, профессиональную специфику, а также научно-исследовательские предпочтения преподавателей, обеспечивающих квалифицированное освещение тематики дисциплин цикла.

- * Устанавливать необходимую глубину преподавания отдельных разделов дисциплин, входящих в циклы гуманитарных и социально-экономических, в соответствии с профилем цикла дисциплин специализации.

- * Устанавливать наименование специализаций по специальности высшего профессионального образования, наименование дисциплин специализаций, их объем и содержание сверх установленного настоящим Государственным образовательным стандартом, а также форму контроля за их освоением студентами.

- * Реализовывать основную образовательную программу подготовки бакалавра математики в сокращенные сроки для студентов высшего учебного заведения, имеющих среднее профессиональное образование соответствующего профиля или высшее профессиональное образование. Сокращение сроков проводится на основе имеющихся знаний, умений и навыков студентов, полученных на предыдущем этапе профессионального образования. Продолжительность обучения при этом должна составлять не менее трех лет. Обучение в сокращенные сроки допускается также для лиц, уровень образования или способности которых являются для этого достаточным основанием.

6.2. Требования к кадровому обеспечению учебного процесса

Преподаватели должны иметь высшее образование, соответствующее профилю преподаваемых дисциплин, подтвержденное дипломом специалиста или магистра. При этом не менее 60% преподавателей (кроме преподавателей иностранного языка) должны иметь научную степень или ученое звание по научной специальности, соответствующей профилю дисциплин, устанавливаемых настоящим стандартом, и не менее 10% преподавательского состава должны быть докторами наук.

6.3. Требования к учебно-методическому обеспечению учебного процесса

Все дисциплины должны быть обеспечены учебно-методической документацией, включающей в себя примерные и рабочие программы учебных дисциплин, учебные планы, перечень контрольных и индивидуальных заданий, программы текущего и итогового контроля, научную и учебно-методическую

литературу по всем видам занятий в количествах, необходимых для реализации учебного процесса. В учебном процессе должны использоваться номинации, имеющие гриф Минобразования России или УМО университетов в количестве не менее 50 экз. на 100 студентов.

6.4. Требования к материально-техническому обеспечению учебного процесса

Высшее учебное заведение, реализующее основную образовательную программу подготовки бакалавра механики, должно располагать материально-технической базой, соответствующей действующим санитарно-техническим нормам и обеспечивающей проведение всех видов лабораторной, практической, дисциплинарной и междисциплинарной подготовки, предусмотренных примерным учебным планом и научно-исследовательской работы студентов.

7. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ПОДГОТОВКИ ВЫПУСКНИКА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 010500 - Механика

7.1. Требования к профессиональной подготовленности механика

Выпускник должен уметь решать задачи, соответствующие его степени, указанной в п.1.2. настоящего Государственного стандарта. Механик отвечает следующим требованиям:

-знаком с основными учениями в области гуманитарных и социально-экономических наук, способен научно анализировать социально-значимые проблемы и процессы, умеет использовать на практике методы этих наук в различных видах профессиональной и социальной деятельности.

- знает этические и правовые нормы, регулирующие отношение человека к человеку, обществу, окружающей среде, умеет учитывать их при разработке экологических и социальных проектов;

- имеет целостное представление о процессах и явлениях, происходящих в неживой и живой природе, понимает возможности современных научных методов познания природы и владеет ими на уровне, необходимом для решения задач, имеющих естественнонаучное содержание и возникающих при выполнении профессиональных функций;

- способен продолжить обучение в магистратуре и по специальности в соответствии с п.1.3., вести профессиональную деятельность в иноязычной среде (требование рассчитано на реализацию в полном объеме через 10 лет);

- имеет научное представление о здоровом образе жизни, владеет умениями и навыками физического самосовершенствования;

- владеет культурой мышления, знает его общие законы, способен в письменной и устной речи правильно (логически) оформить сго результаты;

- умеет на научной основе организовать свой труд, владеет компьютерными методами сбора, хранения и обработки (редактирования) информации, применяемыми в сфере его профессиональной деятельности;

- способен в условиях развития науки и изменяющейся социальной практики к пересценке накопленного опыта, анализу своих возможностей, умеет приобретать новые знания, обучаться в магистратуре, использовать другие формы обучения, включая самостоятельные и информационно-образовательные технологии;

- понимает сущность и социальную значимость своей будущей профессии, основные проблемы дисциплин, определяющих конкретную область его деятельности, видит их взаимосвязь в целостной системе знаний;

- способен к проектной деятельности в профессиональной сфере на основе системного подхода, умеет строить и использовать модели для описания и прогнозирования различных явлений, осуществлять их качественный и количественный анализ;

- способен поставить цель и сформулировать задачи, связанные с реализацией профессиональных функций, умеет использовать для их решения методы изученных им наук;

- готов к кооперации с коллегами и работе в коллективе, знаком с методами управления, умеет организовать работу исполнителей, находить и принимать управленческие решения в условиях различных мнений, знает основы педагогической деятельности;

- методически и психологически готов к изменению вида и характера своей профессиональной деятельности, работе над междисциплинарными проектами;

- способен к совершенствованию своей профессиональной деятельности в области математики.

7.2. Требования к итоговой государственной аттестации механика

7.2.1. Общие требования к государственной итоговой аттестации

Итоговая государственная аттестация механика включает защиту выпускной квалификационной работы и государственный экзамен, позволяющий выявить теоретическую подготовку к решению профессиональных задач.

Итоговые аттестационные испытания предназначены для определения практической и теоретической подготовленности специалиста Государственным образовательным стандартом и продолжения образования в аспирантуре.

Аттестационные испытания, входящие в состав итоговой государственной аттестации выпускника, должны полностью соответствовать основной образовательной программе высшего профессионального образования, которую он освоил за время обучения.

7.2.2. Требования к квалификационной работе механика

Требования к содержанию, объему и структуре выпускной работе определяются высшим учебным заведением на основании Положения об итоговой государственной аттестации выпускников высших учебных заведений, утвержденном Минобразованием России, Государственного образовательного стандарта по специальности 010500 - Механика и методических рекомендаций НМС по математике и механике УМО университетов.

Время, отводимое на выполнение и защиту квалификационной работы, составляет для бакалавра не менее шести недель.

Основной целью квалификационной работы являются закрепление и углубление теоретических знаний по специальным дисциплинам и приобретение навыков в научно-исследовательской и практической деятельности.

Квалификационная работа может быть реализована в одной из следующих форм:

самостоятельное научное исследование;

научный реферат:

работа прикладного характера, содержащая математическую модель, алгоритм решения и программную реализацию;

работа методического характера, связанная с преподаванием математических дисциплин.

7.2.3. Требования к государственному экзамену по механике

Порядок проведения и программа государственного экзамена по специальности 010500 - Механика определяются вузом на основании методических рекомендаций и соответствующей примерной программы, разработанных НМС по математике и механике УМО университетов, Положения об итоговой Государственной аттестации выпускников высших учебных заведений, утвержденном Минобразованием России, и Государственного образовательного стандарта по специальности 010500 - Механика.

СОСТАВИТЕЛИ:

Научно-методический совет по математике и механике учебно-методического объединения университетов РФ

Председатель НМС по математике и механике УМО университетов РФ О.Б. Лупанов

Председатель КМС по математике и механике УМФУ И.М. Лаврентьев
Заместитель председателя

СОГЛАСОВАНО:

Управление образовательных программ и стандартов высшего и среднего профессионального образования

Начальник Управления

ГК Шестаков

**Начальник управления
Заместитель начальника У**

Г.Р. Ше

Заместитель начальника Главный специалист

нашено
Н.Р.Сенаторова

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Литература для изучения курса теоретической механики.

1. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики, Ч. 1,2. М.: Наука, 1972.
2. Бутчинин Н.В., Лунин Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. Т. 1,2. М.: Наука, 1979.
3. Лойцинский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. Т. 1,2. М.: Наука, 1983.
4. Мещерский И.В. Сборник задач по теоретической механике. М.: Наука, 1986.
5. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975.
6. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. В 3 т. М.: Наука, 1990.
7. Тарг М.С. Краткий курс теоретической механики. М: Наука, 1995.
8. Маркесев А.П. Теоретическая механика. М.: Наука, 1990.
9. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М.: Наука, 1995.
10. Голубев Ю.Ф. Основы теоретической механики. М.: МГУ, 1992.
11. Загузов И.С., Федечев А.Ф., Калабухов В.Н., Поляков К.А. Математические модели в теоретической механике. Учебное пособие. Самара. Изд-во СамГУ, 2000 г.

Литература для изучения курса механики жидкости и газа

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды. В 2 т. М.: Наука, 1984, 1995.
2. Лойцинский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973, 1987.
3. Механика сплошных сред в задачах: В 2 т. / Под ред. М. Эглит. М.: Московский лицей, 1996.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Мир, 1969.
5. Загузов И.С., Поляков К.А. Математические модели в аэрогидромеханике: Учебное пособие. Самара. Изд-во СамГУ, 2001.
6. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977.
7. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1992.

Литература для изучения курса механики деформируемого твердого тела

1. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988.
2. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974.
3. Победря Б.Е. Механика композитных материалов. М.: Изд-во МГУ, 1984.
4. Клюшников В.Д. Математическая теория пластичности. М.: Изд-во МГУ, 1970.
5. Седов Л.И. Механика сплошной среды: В 2 т. М.:Наука, 1984, 1995.
6. Механика сплошных сред в задачах: В 2 т. /Под ред. М. Эглит. М.: Московский лицей, 1996.

Литература по истории механики

1. Боголюбов А.Н. Математики. Механики: Библиографический справочник. Кисв: Наукова думка, 1983.
2. Всесоловский И.Н. очерки по истории теоретической механики. М: Наука, 1974.
3. Григорьян А.Т. Механика в России. М: Наука, 1978.
4. Григорьян А.Т. Механика от античности до наших дней. М: Наука, 1971.
5. Гордон Дж. Почему мы не проваливаемся сквозь пол? М.: Мир, 1971.
6. Зацаринный В.П., Акопов А.И. Атланты держат небо. М.: Знание, 1979.
7. Ишлинский А.К. Очерки по истории механики. М: Наука, 1955.
8. Клаус Е.М. Поиски и открытия. М: Наука, 1986.
9. Космодемьянский А.А. Очерки по истории механики. М: Наука, 1982.
10. Космодемьянский А.А. Теоретическая механика и современная техника. М: Просвещение, 1969.
11. Лишевский В.П. Рассказы об ученых. М: Наука, 1986.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ВВЕДЕНИЕ в механику деформируемого твердого тела	4
1.1. Основные понятия о прочности материалов	4
1.2. История развития механики деформируемого твердого тела ...	6
1.3. Механика деформируемого твердого тела в XX веке	22
1.4. Основные проблемы механики деформируемого твердого тела	39
ПРИЛОЖЕНИЕ. Государственный образовательный стандарт специальности 010500 – Механика. Требования к уровню подготовки выпускника	41
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	48