

J. Gordon

**THE NEW SCIENCE OF STRONG MATERIALS
or
WHY YOU DONT FALL THROUGH THE FLOOR**



Перевод с английского С.Т. Милейко
Издательство "Мир", Москва, 1971

VIVOS VOCO!

Июнь 2004

Ю.Н. Работнов. Предисловие

Введение. Новая наука о прочных материалах, или как задавать трудные вопросы

Часть I. Упругость и теория прочности

Глава 1. Напряжения и деформации, или почему мы не проваливаемся сквозь пол

Глава 2. Внутреннее сцепление, или насколько прочными должны быть материалы

Глава 3. Трещины и дислокации, или почему столь мала фактическая прочность материалов

Часть II. Неметаллы

Глава 4. Торможение трещины, или как обеспечить вязкость

Глава 5. Древесина и целлюлоза, или о деревянных кораблях и железных людях

Глава 6. Клей и фанера, или слюда в планерах

Глава 7. Композиционные материалы, или как делать кирпичи с соломой

Часть III. Металлы

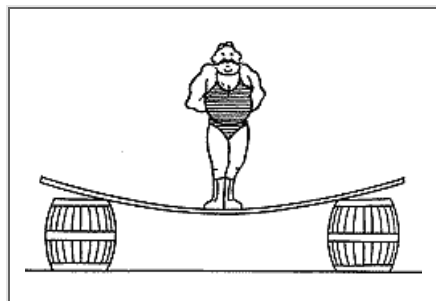
Глава 8. Пластичность металлов, или интимная жизнь дислокаций

Глава 9. Железо и сталь, или Гёфест среди чертовых мельниц

Глава 10. Материалы будущего, или как ошибаться в догадках

Приложение I. О различных типах твердого тела, или кое-что о патоке

Приложение II. Простые формулы теории балок, или как сделать расчет на прочность



Дж. Гордон

Почему мы не проваливаемся СКВОЗЬ ПОЛ

*Перевод с английского С.Т. Милейко
Опубликовано издательством "Мир", Москва, 1971*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая советскому читателю книга профессора Гордона, пожалуй, единственная в своем роде.

Она написана совершенно популярно, для самого широкого круга читателей, но ее прочтет с интересом и специалист, во всяком случае автор предисловия читал ее, как роман, не отрываясь.

Написать популярную книгу о прочности материалов и конструкций очень трудно, эта область науки мало эффективна, 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 в течение всей истории своего существования, но делалось это на ощупь, эмпирически. Если библейское предание о вавилонской башне не лишено исторической достоверности, неуспеху древних строителей способствовало совсем не смешение языков, просто слишком высокое сооружение развалилось в процессе постройки под действием собственного веса.

Опыт строительства прочных сооружений накапливался веками, притом дорогой ценой. Шедевры архитектуры прошлых эпох восхищают нас и сейчас как памятники человеческого гения, но история не сохранила памяти о бесчисленных неудачах. В наше время учение о прочности - это большая и 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 мы отчетливо понимаем, что для дальнейшего прогресса в создании прочных материалов и прочных конструкций необходимо объединение ученых разных специальностей: химиков, физиков и механиков. Необходима общая точка зрения, объединяющая взгляды представителей различных областей науки.

Следует отметить, что британская научная школа внесла большой вклад как в теорию прочности материалов и конструкций, так и в практику их создания. Британские физики сумели соединить высокий теоретический уровень с пониманием реальных задач и четкой прикладной направленностью исследований.

Профессор Гордон - крупный ученый, воспитанный в традициях этой школы. Он был одним из пионеров применения пластиков в авиастроении, много и успешно работал над созданием высокопрочных нитевидных кристаллов-усов. Книга в значительной мере отражает личные взгляды и пристрастия автора, о чем он предупреждает в предисловии. Она субъективна в лучшем смысле этого слова, при чтении книги у специалиста возникает желание спорить с профессором Гордоном по многим вопросам, но в предисловии к переводу этого делать нельзя: всякая дискуссия предусматривает продолжение диалога.

В английском издании книги имеется краткая биографическая справка, в ней сообщаются сведения об авторе, которые, казалось бы, не имеют непосредственного отношения к делу. В частности, там говорится, что в свободное время Дж. Гордон занимается управлением яхтой (это традиционно), фотографией, лыжами и греческим языком (совсем нетрадиционно). Последнее увлечение наложило отпечаток и на предлагаемую книгу: профессор Гордон свободно оперирует знаниями мифологии и античной истории, но главное состоит в том, что за страницами книги виден живой и мыслящий человек с широким кругом идей и интересов. Причем обсуждение чисто специальных вопросов чередуется у него с размышлениями общего характера.

Последняя глава книги названа «Материалы будущего». За три года, прошедшие со дня появления английского издания, произошло многое. Нитевидные кристаллы по существу не вышли за стены лабораторий, пока еще не удалось найти способов промышленного производства усов в достаточных количествах и реализация их высокой прочности по-прежнему встречает трудности. Зато непрерывные высокопрочные и высокомодульные волокна, а именно волокна бора и углерода, уже выпускаются промышленностью. Пока они еще очень дороги, стоимость волокон бора и углерода примерно одинакова, но по оценке большинства специалистов при усовершенствовании технологии стоимость массового производства угольных волокон будет существенно снижена.

Уже сейчас из углепластиков изготавливаются части самолетов и реактивных двигателей. По прогнозам зарубежной печати за счет применения углепластиков вес транспортного самолета может быть уменьшен за 4-5 лет на 20% и за 10-15 лет на 50%.

В авиации и реактивной технике снижение веса особенно необходимо и покупается любой ценой. Но с расширением производства стоимость новых материалов будет снижаться и они найдут применение не только в воздухе, но также на земле и на воде, в конструкциях автомобилей, судов, в химической аппаратуре, в строительстве.

Энтузиасты утверждают, что мы стоим на пороге новой технической революции того же масштаба, что и промышленная революция начала прошлого столетия, так красочно описанная Гордоном. Скептики предпочитают термин «эволюция» и дают более скромную оценку открывающимся перспективам. Жизнь покажет, сколь глубоко будут технические, а возможно, и социальные последствия появления новых высокопрочных материалов, но ясно одно: новые материалы жизненно необходимы для человечества, поиски этих новых материалов и новых принципов конструирования — увлекательная и благородная задача, которой стоит посвятить жизнь. Хочется надеяться, что эта книга поможет некоторым молодым людям определить свой жизненный путь.

Академик Ю. Работнов

Ю.Н. Работнов. Предисловие

Введение. Новая наука о прочных материалах, или как задавать трудные вопросы

Часть I. упругость и теория прочности

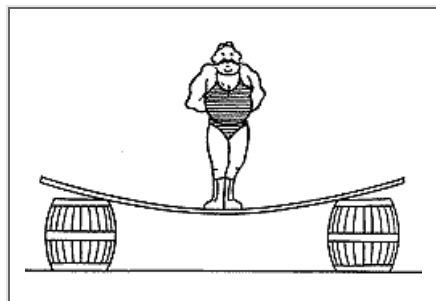
Часть II. Неметаллы

Часть III. Металлы

Приложение I. О различных типах твердого тела, или кое-что о патоке

Приложение II. Простые формулы теории балок, или как сделать расчет на прочность

Сетевая публикация подготовлена учениками московской гимназии № 1543 Олегом Борисенко и Дмитрием Бегизовым



Дж. Гордон

Почему мы не проваливаемся СКВОЗЬ ПОЛ

Перевод с английского С.Т. Милейко
Опубликовано издательством "Мир", Москва, 1971

ВВЕДЕНИЕ

Металлы и неметаллы
Что такое материаловедение
Сувениры и ремесленничество
Атомы, химия, единицы измерения

Кто бы ни взялся писать книгу, посвященную столь обширной области знаний, как наука о прочности материалов, он всегда будет чувствовать, что специалисты найдут в такой книге много ошибок, упрощений и просто невежества. Такая книга непременно явится отражением авторской индивидуальности, и в первую очередь это коснется отбора материала.

Я писал о том, что интересовало меня в то или иное время. Надеюсь, меня за это не осудят. Ведь не мог я писать о легированных сталях, например, или о титане: есть люди, которые сделают это гораздо лучше меня.

Наука о материалах и теория упругости считаются довольно математизированными дисциплинами. Однако я опустил всю математику, за исключением совершенно элементарной алгебры, которая доступна каждому.

Дж. Гордон

НОВАЯ НАУКА О ПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ, или КАК ЗАДАВАТЬ ТРУДНЫЕ ВОПРОСЫ

*Какую пищу нашему уму дает созерцание сил сцепления! Как много новых явлений открывается здесь! Именно эти силы обеспечивают прочность всего того, что сооружаем мы на земле, используя железо, камень и другие прочные материалы. И только подумайте, что все наши конструкции - взять хотя бы "Грейт Истерн" *, размеры которого и мощь, кажется, лежат за пределами человеческого воображения, - существуют постольку, поскольку существуют силы сцепления.*

М. Фарадей
"О различных силах природы" **

Почему ломаются вещи? Почему вообще материалы обладают прочностью? Почему одни твердые тела прочнее других? Почему сталь вязкая, а стекло - хрупкое? Почему древесина расщепляется? Что означают такие понятия, как прочность, вязкость, хрупкость? Используются ли все резервы прочности, скрытые в материалах? Можно ли улучшить существующие типы материалов и создать совершенно новые, отличные от них, которые были бы намного прочнее? Если да, то каким образом это сделать и как они будут выглядеть? Если мы в самом деле будем располагать лучшими материалами, то как и где их следует применять?

* "Грейт Истерн" - судно, построенное знаменитым английским инженером Брюнелем в середине XIX века. Во времена Фарадея оно было непревзойденным по своим размерам (водоизмещение 27000 т). - *Прим. перев.*

** Эпиграф взят из работы М. Фарадея "On the various forces of Nature", которая была издана на русском языке под названием "Силы материи и их взаимоотношения" (М., Государственное антирелигиозное издательство, 1940). Настоящий перевод отличается от изданного. - *Прим. перев.*

Фарадея в последние годы его жизни стали занимать некоторые из этих вопросов, но ответить на них он не смог, да, признаться, и мы лишь совсем недавно оказались в состоянии это сделать. Однако уже самой постановкой вопроса

Фарадей значительно опередил свое время; впоследствии еще долгое время исследования прочности и сил сцепления не были в чести у ученых. Эта книга рассказывает о том, как мы пришли к пониманию природы прочности материалов, как связаны между собой прочностные свойства металлов, древесины, керамики, стекла, костей, как эти материалы ведут себя в различных конструкциях - станках, кораблях, самолетах, зданиях, мостах.

Новая наука о материалах очень важна, потому что все наши технические достижения всегда были ограничены недостаточной прочностью материалов. И если еще совсем недавно человек принимал материалы как нечто ниспосланное свыше, то сегодня мы можем не только понять характер поведения материалов, но и найти способы улучшения их свойств. Уже видны пути получения несравненно лучших материалов, не похожих на существующие. Они откроют инженерам совершенно новые возможности.

Металлы и неметаллы

В технике всегда существовало деление на металлы и неметаллы, и, хотя такие мастера, как Брюнель, одинаково умело использовали и те и другие, большинство инженеров по традиции становились "металлистами" или "неметаллистами". Причина такого деления лежит в резком различии свойств металлов и неметаллов - мы скоро увидим, в чем здесь дело, - и, следовательно, путей их использования. Однако я склонен думать, что определенную роль в выборе "своего" материала играют характеры людей: металлисты представляются мне людьми практичными, земными, они не выносят того, что им кажется бессмысленным, а неметаллисты, вероятно, более лиричны, богаче наделены воображением.

Возможно, мы не должны делать особых выводов из самого факта такого разделения, но оно так или иначе проходит через всю историю техники. В нашей книге мы проследим развитие этих двух традиционных направлений в свете современной науки о материалах и попытаемся выделить проблемы, которые в свое время требовали решения. Мы постараемся понять, почему произошли эти перемены.

На протяжении XIX века цены на железо и сталь снизились в 10 раз, что одновременно с улучшением их качества явилось весьма важным событием в развитии техники, а может быть, даже наиболее важным историческим событием. Во всяком случае, железо и сталь пришлось особенно по душе мастерам времен королевы Виктории, да и наша современная техника зиждется в основном на металлах. Однако металлам не принадлежит монополия на прочность. Порой лучшими сочетаниями удельного веса и прочности обладают не металлы, а самые прочные из известных веществ - недавно полученные нитевидные кристаллы (усы) углерода и окиси алюминия.

Тенденции развития материаловедения сейчас таковы, что, весьма вероятно, скоро мы будем располагать конструкционными материалами, которые по своей структуре гораздо больше напоминают древесину или кость, чем металлы и сплавы, хорошо известные нашим инженерам *. Это не значит, что мы вернемся к царству резьбы по дереву и плотничьего мастерства или что металлы будут вытеснены какими-то другими материалами в ближайшем будущем. Конечно, нет. Я хочу подчеркнуть лишь, что это делает уместным изучение всей истории применения прочных материалов, как металлических, так и неметаллических. Хотя новые технологические процессы во многом будут довольно сложными, мы, быть может, вернемся к терпеливой скромности корпеющего над своим материалом ремесленника, которая ныне на наших предприятиях вовсе забыта. Это привело бы к большей занятости и, возможно, к-то компенсировало бы разного рода индустриальные уродства. Если так случится, то человечество окажется только в выигрыше.

* См., например, книгу *A. Kelly, Strong Solids, Oxford, 1966*, а также гл. 10 настоящей книги.

Отправной точкой, которая поможет нам разобраться в истории и некоторых областях применения конструкционных материалов, кажущихся наиболее важными в социальном и техническом отношениях, послужат современные представления о прочности материалов. Выбор объектов исследования будет в известных пределах произвольным. Я не касался некоторых важных материалов, например, алюминия, если они не иллюстрировали какого-либо интересного принципа - *l'art d'ennuyer consiste a tout dire* *.

* Искусство наводить скуку состоит в стремлении рассказать обо всем (*франц.*).

Что 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, нам придется оперировать физическими величинами, огромными и совершенно ничтожными, переходить от химических представлений к чисто техническим, совершать скачки из одной области науки в другую: материаловедение, выражаясь современным языком, находится на стыке наук.

Стоит лишь задуматься о механических свойствах твердого тела, как становится ясным, что какие-то представления о поведении материалов есть у каждого из нас, но далеко не всегда мы можем понять, почему материалы ведут себя именно так, а не иначе. Правда, на вопрос "почему" ответить всегда сложнее. Однако, прежде чем доискиваться до причин какого-либо явления, его следует описать - точно и объективно. Это дело инженеров. Если дилетант может довольствоваться смутными представлениями о том, как деформируются и разрушаются твердые тела, то инженер обязан быть точным, и немало поколений инженеров совершенствовало это описание, стремясь сделать его предельно

объективным. Конечно, инженеры часто не отдавали себе отчета в том, почему кусок стали ведет себя так, а кусок бетона - иначе, но и в том, и в другом случаях они проводили измерения и описывали все это в трудночитаемых книгах. Вооруженные знаниями "свойств" материалов, они обычно могут предсказать поведение сложных конструкций хотя и у них случаются ошибки, и тогда мосты летят в реки, корабли тонут, самолеты разбиваются. Вся эта премудрость воплощена в теории упругости, определяющей условия, при которых конструкционные материалы воспринимают и передают нагрузки, сопротивляются им. Некоторое понимание всего этого необходимо и для того, чтобы разобраться в проблеме прочности материала. Если отбросить всю математику, основные принципы упругости на первый взгляд, право же, очень просты, но для истинного понимания они на удивление трудны. Причина этого, я думаю, кроется в том, что все мы воспитаны на некоторых инстинктивных знаниях о прочности - не будь этого, мы ломали бы вещи и травмировались гораздо чаще, чем сейчас. И в результате нам кажется, что такого подсознательного понимания вполне достаточно. В конце концов все это оборачивается трудностями, связанными не столько с изучением элементарной теории упругости, сколько с собственными предубеждениями.

Кто сомневается во всем этом, пусть попробует объективно описать разницу между механическими свойствами, например, мела и сыра*. Как правило, инженеру под силу такая задача. Более того, если бы мы захотели построить некое сооружение, используя один из этих материалов, он смог бы предсказать характер его разрушения. Однако объяснить разницу между сыром и мелом нам могут только представители определенных областей науки.

* Для воспитанного на идиомах английского читателя мел и сыр представляют собой образцовый пример совершенно различных веществ: в английском языке существует выражение *as different as chalk is from cheese*. - *Прим. перев.*

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 химически активных реагентов. Так как в каждом случае должны быть разорваны какие-то внутренние связи одного типа, можно было бы предположить, что существует некая простая связь между всеми названными формами разрушения, и сегодня, когда о природе межатомных взаимодействий химики и физики знают довольно много, им не так уж трудно дать объяснение и прочности, и другим механическим свойствам материалов, так что, по существу, изучение разрушения материалов должно бы стать разделом химии.

В дальнейшем мы увидим, что прочность связана - как этого, конечно, и следовало ожидать - с химическими взаимодействиями, но связь эта косвенная, и обнаружить ее средствами классической химии или физики невозможно. Оказывается, мы не только нуждаемся в интерпретации результатов этих наук средствами классической теории упругости, но нам необходимо ввести еще и такие сравнительно новые и очень важные понятия, как дислокации и концентрация напряжений.

В свое время их введению сопротивлялись многие ортодоксы. До недавних пор наука о прочности материалов несомненно отставала от других дисциплин, которые на первый взгляд кажутся и более трудными и более эффективными. В течение долгого времени мы гораздо лучше были осведомлены о радио или о внутреннем строении звезд, чем о том, что происходит в куске стали. По-моему, причина здесь не столько в крайней сложности предмета, сколько в трудностях, связанных с объединением достаточного числа людей, занятых в различных областях науки, для совместной работы над одной общей проблемой.

Химики, естественно, предпочитают объяснять все свойства веществ на языке химии, но когда они, наконец, раздельно с трудностями, порожденными использованием инженерами иных единиц измерения (например, для энергии), то часто обнаруживают, что рассчитанные ими параметры прочности не только отличаются от истинных на несколько порядков, но даже качественно не имеют ничего общего с результатами экспериментов. После этого они склонны забросить все, утверждая, что предмет и не интересен, и не важен. Отношение физиков к этой проблеме несколько иное, но очень многие из них в течение долгого времени гнались за другим зайцем: надо было разбираться в том, что происходит внутри атома.

Бесспорно, в наши дни совместными усилиями физиков и металлургов удается в удивительных подробностях разгадать происходящие в металлах процессы, но классическое металловедение слишком долго оставалось чисто описательной наукой. Металловеды знали, что, добавив тот или иной элемент к сплаву, они как-то изменяют его свойства. Еще они знали, что нагрев, охлаждение,ковка меняют механические свойства металлов. С помощью оптического микроскопа они могли наблюдать лишь сравнительно грубые различия в микроструктуре. Но, несмотря на то что наблюдаемые структуры как-то определяли механические свойства металлов, эта связь сама по себе не могла считаться убедительным научным объяснением механического поведения металлов и сплавов.

Суеверия и ремесленничество

Если наука о материалах оказалась тяжела даже для ученых, вряд ли можно предположить, что наши предки вполне осознанно обрабатывали и использовали материалы. И в самом деле, ни одна из технических дисциплин не изобилует суевериями в такой степени. Можно было бы (а быть может, и должно) написать объемистую полную ужасов книгу о предрассудках, связанных с получением материалов. Так, в древнем Вавилоне при изготовлении стекла использовались человеческие эмбрионы; японцы закаливали мечи, погружая их докрасна раскаленными в тела живых пленников.

Обычными были случаи погребения жертв в основаниях зданий и мостов, лишь в древнем Риме людей заменили чучелами. Подобные обычаи связаны с примитивной философией, которая каждую конструкцию наделяла собственной духовной жизнью.

Со временем человек стал менее жестоким, но не менее суеверным. Во всяком случае, некоторые пережитки иррационального чувствуются даже в нашем сегодняшнем отношении к материалам. Так, зачастую весьма бурно обсуждаются вопросы о применении старых и новых, натуральных и синтетических материалов, причем бушующие на такого рода дискуссиях эмоции далеко не всегда основываются на реальных знаниях или экспериментальных доказательствах. Эти предубеждения наиболее сильны в быту ("Может ли что-нибудь сравниться с шерстью?" или "Нет ничего, подобного коже!"), но иногда они проникают и в область проектирования серьезных конструкций.

Издавна человеку казалось удобным видеть в материалах некую жизненную силу, от которой якобы зависит их работоспособность. Например, говорили, что вещи ломаются потому, что их покидает некая сила. Во время войны я имел дело с поставками бамбука, который шел на изготовление азростатов заграждения. Как-то один импортер бамбука жаловался мне на трудности хранения прутьев необходимой нам длины: для них требовалось слишком много места, поскольку их нужно было складывать горизонтально. На мое предложение хранить бамбук в вертикальном положении собеседник заявил, что это невозможно, так как сила бамбука вылетит из него через обращенный кверху конец. В прошлом при выборе материала и проектировании конструкции полагались лишь на инстинкт и опыт. Среди лучших ремесленников, работавших по сложившимся традициям, встречались иногда блестящие мастера. Однако было бы ошибкой преувеличивать возможности традиций, мастерство ремесленника могло быть великолепным, но инженерное решение его изделий, как правило, в лучшем случае было посредственным, а иногда оказывалось удивительно плохим. Повозки теряли колеса, потому что каретных дел мастерам не хватало смекалки крепить их подобающим образом. Точно так же деревянные корабли в плавании почти всегда имели злосчастные течи, потому что кораблестроители тех дней не понимали природы касательных напряжений, которые, боюсь, и сегодня для многих остаются загадкой.

Экскурс в такие далекие для нашего предмета времена может показаться неуместным в книге, посвященной современной науке о материалах, однако следует помнить, что наука эта, подобно медицине, должна была прокладывать свой путь наперекор традиционной практике и суевериям. Не дать представления о тех глубинах антизнания, из которых должно было подняться современное материаловедение, значило бы в чем-то погрешить против истины.

Атомы, химия, единицы измерения

Несмотря на то что не всегда просто установить прямые связи между прочностью материалов и законами классической физики и химии, в конечном счете именно эти науки составляют фундамент материаловедения. Поэтому для тех, кто мог позабыть кое-что из школьной программы, в конце книги имеется приложение, где кратко изложены основные сведения, без знания которых трудно следить за дальнейшими рассуждениями. Однако для понимания материаловедения не в меньшей степени, чем знание законов химии и физики, необходимо правильное представление о размерах и масштабе. Иными словами, законы науки дают правила игры, но размеры шахматной доски, то есть те масштабы, в которых разыгрываются игры в природе и технике, постоянно и почти невообразимо изменяются. Поэтому остановимся, хотя бы кратко, на вопросе о масштабах и единицах измерения.

Кельвин не раз повторял, что наука начинается с измерений. Но для того, чтобы измерять, нужны единицы измерения. Для измерения сравнительно больших величин мы будем использовать сантиметры и миллиметры, тонны, килограммы и граммы. Опирируя очень малыми величинами, мы обычно становимся более рациональны ми и обращаемся к малым единицам. А поскольку материаловедение часто имеет дело именно с малыми величинами, которые не используются в повседневной жизни, об этих малых единицах следует рассказать подробнее. Микрон (мкм) - $1/10000$ см, то есть $1/1000$ мм. Размер самой маленькой точки, которую можно увидеть невооруженным глазом, - около $1/10$ мм, то есть 100 мкм. А самый малый предмет, видимый с помощью обычного оптического микроскопа, как правило, меньше 0,5 мкм. На практике возможность видеть предмет в значительной степени зависит от условий освещения: так, в сильном луче света, проникающем в темную комнату, можно видеть невооруженным глазом частицы пыли размером в 10 мкм или даже меньше. Так как предел разрешения оптического микроскопа примерно равен одному микрону, микрон стал излюбленной единицей тех, кто в основном работает с этим микроскопом, в частности биологов.

Ангстрем (А) - $1/10000$ мкм, или $1/100000000$ см. Эта единица пользуется уважением тех, кто работает с электронным микроскопом, ее применяют для измерения атомов и молекул. С помощью современного электронного микроскопа можно рассмотреть (обычно в виде неясных пятен) частицы размером около 5 А. Это примерно в тысячу раз меньше того, что можно увидеть в лучшем оптическом микроскопе. Но и в этом случае разрешение сильно зависит от условий эксперимента.

Вероятно, здесь следует немного поговорить об атоме. Атомы - это то, из чего построены все вещества. Сами атомы состоят из очень малых и тяжелых ядер, окруженных облаком обращающихся вокруг них электронов, которые являются волнами, частицами или отрицательными зарядами электричества. Электроны несравненно меньше ядер атомов. Массы и размеры атомов различных веществ могут быть очень разными. Атомы можно представить себе в виде шариков с негладкой поверхностью диаметром, грубо говоря, около 2 А. По обыденным понятиям, это невообразимо малый размер, мы никогда не сможем увидеть отдельный атом с помощью обычного видимого света, хотя в массе своей атомы, конечно, являются перед нами в виде любого тела.

Здесь полезно напомнить, что наименьшая частица, которую можно видеть невооруженным глазом, содержит примерно 500000 атомов в поперечнике, а с помощью оптического микроскопа нам удастся рассмотреть частичку с 2000 атомов в поперечнике. Электронный микроскоп позволяет увидеть расположение атомов в кристалле, которое напоминает построение солдат на параде; с помощью устройства, называемого ионным проектором, можно рассмотреть даже отдельные атомы - по крайней мере некие их туманные очертания. Однако даже при значительно лучшей разрешающей способности микроскопа (а со временем таковая, возможно, и будет достигнута) вряд ли нам удастся увидеть что-нибудь очень конкретное.

Ю.Н. Работнов. Предисловие

Введение. Новая наука о прочных материалах, или как задавать трудные вопросы

Часть I. Упругость и теория прочности

Глава 1. Напряжения и деформации, или почему мы не проваливаемся сквозь пол

Глава 2. Внутреннее сцепление, или насколько прочными должны быть материалы

Глава 3. Трещины и дислокации, или почему столь мала фактическая прочность материалов

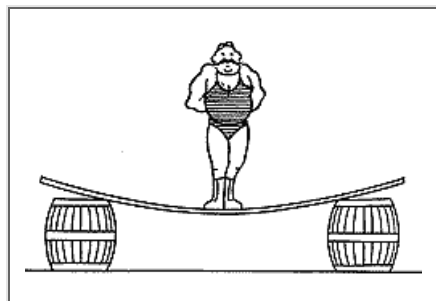
Часть II. Неметаллы

Часть III. Металлы

Приложение I. О различных типах твердого тела, или кое-что о патоке

Приложение II. Простые формулы теории балок, или как сделать расчет на прочность

Сетевая публикация подготовлена учениками московской гимназии № 1543 Олегом Борисенко и Дмитрием Бегизовым



Дж. Гордон

Почему мы не проваливаемся сквозь пол

Перевод с английского С.Т. Милейко
Опубликовано издательством "Мир", Москва, 1971

Часть I. УПРУГОСТЬ И ТЕОРИЯ ПРОЧНОСТИ

Глава 1. Напряжения и деформации, или почему мы не проваливаемся сквозь пол

Напряжения и деформации, что это?

Закон Гука

Модуль Юнга

Прочность

Растяжение и сжатие в конструкциях

Балки и изгиб

Глава 2. Внутреннее сцепление, или насколько прочными должны быть материалы

Гриффитс и энергия

Глава 3. Трещины и дислокации, или почему столь мала фактическая прочность материалов

Концентрация напряжений

Гриффитсовы трещины

Дислокации и пластичность

Глава 1.

НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ, или ПОЧЕМУ МЫ НЕ ПРОВАЛИВАЕМСЯ СКВОЗЬ ПОЛ

Он имел обыкновение каждый вечер втягивать Вану в философскую дискуссию и в этих спорах всегда подчеркивал разницу между системой Ка-пина, в которой Земля висит на мощных канатах, и системой Тай-у, считавшего, что Земля опирается на громадный бамбуковый столб. Самобытный и проницательный ум Аи-шу уже давно обнаружил слабость обеих теорий в самой их основе.

Эрнст Брама.

"Кай Лун расстилает свою циновку"

Мы действительно не проваливаемся сквозь пол, и это для нас настолько обычно, что мы над этим никогда не задумываемся. Но более общий вопрос, почему любое твердое тело вообще способно сопротивляться приложенной к нему нагрузке, издавна занимал умы ученых. 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 отнюдь не говорит о бесхитростности предмета. Ведь недаром первый существенный вклад в решение проблемы внесли такие выдающиеся умы, как Галилей (1564–1642) и Гук (1635–1702). Нужно сказать, что именно они впервые четко сформулировали задачу.

Правда, эта задача оказалась за пределами возможностей XVII века. Более того, на протяжении еще двухсот лет не было достаточно полного представления о том, что же на самом деле происходит в конструкциях; даже в XIX веке круг людей, понимавших что-то в этой области, ограничивался несколькими не очень признанными в те времена теоретиками. Инженеры-практики все еще продолжали делать свои расчеты, что называется, на пальцах. Нужно было пройти долгий путь, полный сомнений и катастроф (вроде случая с мостом через реку Тэй*), чтобы они убедились в пользе обоснованных расчетов на прочность**. Вместе с тем обнаружилось, что правильный расчет может удешевить конструкцию, так как позволяет экономить материалы более безопасным путем. В наши дни суть разницы между квалифицированным инженером, с одной стороны, и слесарем или просто самоучкой-любителем - с другой, заключается не столько в изобретательности или степени мастерства, сколько в теоретической подготовке.

* Железнодорожный мост через реку Тэй в ее устье (длиною почти 3 км) был построен Т. Баушем в 1879 г. Его считали одним из величайших технических достижений своего времени. Однако через несколько месяцев после открытия, зимней ночью мост не выдержал тяжести пассажирского поезда. Все пассажиры утонули. Расследование установило серьезные дефекты использованных материалов, ошибки в проекте и небрежности при постройке. Драматические обстоятельства катастрофы и число погибших сделали это событие печально знаменитым в английской истории. - *Прим. автора к русск. изд.*

** Было время, когда в США ежегодно рушилось около 25 мостов.

Давайте начнем с самого начала, с Ньютона (1642–1727), который сформулировал основной закон механики: действие равно противодействию по величине и противоположно ему по направлению. Это означает, что каждая сила должна быть сбалансирована точно такой же по величине силой противоположного направления. При этом природа сил не имеет никакого значения. На пример, сила может быть создана каким-либо неподвижным грузом. Предположим, я стою на полу, мой вес 75 кг. Следовательно, мои подошвы давят на пол с силой 75 кг, которая направлена вниз; это дело моих ступней. В то же самое время пол должен давить на мои подошвы с той же силой 75 кг, направленной вверх; эта сила исходит от пола. Если доски пола окажутся подгнившими и не смогут обеспечить силу 75 кг, я неминуемо провалюсь. Но если каким-то чудом пол сообщит мне силу, большую, чем та, которую требовал мой вес, скажем, 75,5 кг, то я - ни много ни мало - взлечу. Те же рассуждения применимы к любому грузу: если стул весит, например, 20 кг, то, чтобы он оставался на привычном для нас месте, пол должен действовать на него с такой же силой. Однако в законе Ньютона совсем не обязательно сила связана лишь с каким-либо неподвижным грузом. Если я направлю свой автомобиль в стену, то она отреагирует на мои действия с силой, в точности равной той, которая необходима, чтобы остановить автомобиль, даже если при этом погибает водитель. И еще один пример: ветер оказывает давление на дымовую трубу, пытаюсь ее опрокинуть, но точно с такой же силой труба действует на воздух - именно поэтому она не опрокидывается.

Все это лишь частные проявления третьего закона Ньютона, который, грубо говоря, утверждает, что для сохранения статус-кво совокупность сил, действующих на тело, должна быть уравновешенной. Правда, закон ничего не говорит о том, откуда берутся все эти силы. Что касается внешних нагрузок на тело, то обычно их обнаружить легче: вес груза возникает из-за гравитационного воздействия Земли на массу груза (земное притяжение); в случае торможения движущейся нагрузки (будь то твердое тело, жидкость или газ) возникающие силы таковы, что вызывают необходимое замедление движущейся массы (второй закон Ньютона). Задача любой механической конструкции состоит в сохранении и поддержании статус-кво, для ее выполнения в конструкции должны каким-то образом возникать силы, которые могли бы уравновесить внешние нагрузки, действующие на нее. Кажется, теперь мы можем понять, как груз давит на пол, но как пол давит на груз?

Ответ на этот вопрос далеко не очевиден. Во времена Галилея и Гука, на заре научной мысли, проблема была еще более неразрешимой. Ее решение усугублялось человеческой склонностью осмысливать непонятное, отталкиваясь от самих себя, от процессов, которые кажутся знакомыми по своему собственному внутреннему опыту. Но такой "антропометрический" подход и биологические аналогии могут лишь запутать дело. Животное имеет два механизма сопротивления нагрузкам. Его инертные части - кости, зубы, волосы - воспринимают механическую нагрузку точно так же, как и любое неживое твердое тело. Но живой организм как целое ведет себя совершенно иным образом. Люди и животные способны активно сопротивляться приложенным силам: они напрягают свои мышцы и в зависимости от того, чего требует сложившаяся ситуация, отталкивают или тянут что-то. Если вы поставите мне на ладонь какой-либо груз (допустим, кружку пива), то, чтобы удержать эту нагрузку, я должен увеличить натяжение в определенных мышцах.

Благодаря сложному и совершенному биологическому механизму наши мышцы непрерывно подстраиваются под внешнюю нагрузку, что позволяет удерживать кружку в вытянутой руке. Однако сохранение биологического напряжения мышц требует непрерывного расходования энергии (подобно тому как упершийся в стену автомобиль, оборудованный гидравлической передачей, продолжает сжигать бензин в своем двигателе, оказывая давление на стену, но ни машина, ни стена при этом не движутся). Расход энергии приводит к усталости мышц руки, и, чтобы снять с них нагрузку, я рано или поздно должен буду выпить пиво.

В отличие от неодушевленных предметов человек всегда, даже когда стоит неподвижно, производит направленные, хотя, возможно, и неосознанные, подстроечные операции в мышцах тела. Со временем он устает и, если обморок или смерть прерывают мышечные процессы, падает. В неодушевленных телах подобные биологические процессы отсутствуют. Конструкционные материалы пассивны, так что они не "устают" в обычном смысле этого слова. Прежде чем начать сопротивляться внешним нагрузкам, в них должны возникнуть какие-то смещения, то есть, чтобы оказать какое-либо сопротивление, они должны в большей или меньшей степени поддаться нагрузке. Под смещением мы понимаем не перемещение тела как целого, без изменения его формы, а именно геометрические искажения самого тела, то есть тело в целом или отдельные его части становятся короче или длиннее вследствие растяжения или сжатия внутри самого тела.

В природе не существует и не может существовать абсолютно жесткого материала. Все тела в той или иной мере обладают податливостью. Если вы взбираетесь на дерево, то ветки прогибаются под вами, и это сразу становится заметным. Однако, когда вы идете по мосту, его прогиб настолько мал что вы его не ощущаете. 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, их нельзя считать ошибками проекта, они определяют как бы врожденные, обязательные характеристики конструкции. (Ниже мы дадим им более подробное определение.)

Между прочим, вспомните, что, летая самолетом, вы, быть может, замечали, как смещаются вверх-вниз кончики его крыла. Конструктор, проектируя крыло, наделил его такими свойствами. Вероятно, вам уже 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 (Приложение 1). Эти связи условно можно представить в виде пружинок, хотя, конечно, ничего "твердого" в обычном вульгарном смысле этого слова в промежутках между атомами не существует (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 резину и сталь упругими и прочными.

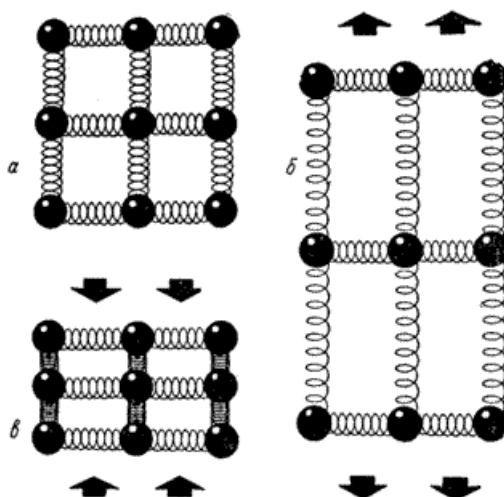


Рис. 1. Наглядная модель химических связей в твердом теле

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 (рис. 1, б) или удлинением (рис. 1, в) межатомных пружин во всем объеме материала. 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. Этого и следовало ожидать, если вспомнить о силах, которые могут быть получены при разрыве химических связей горючих или взрывчатых веществ.

Хотя абсолютно жестких тел, то есть таких, которые под действием внешних сил совершенно не изменяют своей формы, в природе не бывает, смещения во многих предметах часто оказываются очень малыми. Например, если я наступлю на обычный строительный кирпич, то его высота уменьшится примерно на $1/20000$ см. А два любых соседних атома в кирпиче станут ближе один к другому на расстояние $\sim 1/5000000$ А ($2 \cdot 10^{-14}$ см). Величина эта невероятно мала, но она соответствует совершенно реальным перемещениям атомов. Конечно, в крупных конструкциях перемещения элементов 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 не нагруженном состоянии около 2 А, удаляются на величину $\sim 2/1000$ А.

Тот факт, что расстояние между атомами действительно изменяется под нагрузкой, был многократно проверен путем постановки самых различных экспериментов. Наиболее наглядные результаты дает стандартный метод измерения межатомных расстояний по отклонению пучка рентгеновских лучей при прохождении его через кристалл, основанный на явлении дифракции. Более чем полувекковая практика позволила довести этот метод до весьма высокой точности. 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%. На рис. 2 показаны результаты измерений на мягкой стали, в которой максимальные смещения атомов были около 0,5%.

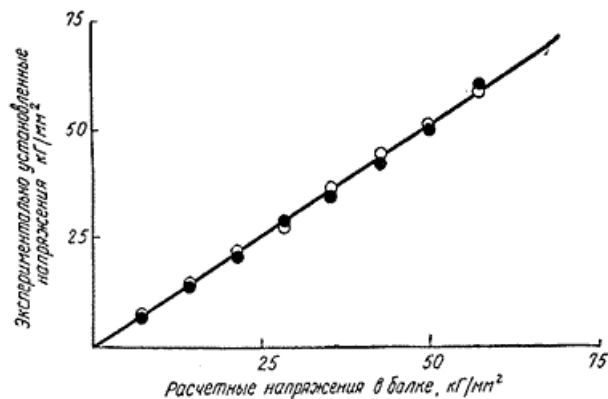


Рис. 2. Сравнение напряжений, установленных экспериментально с помощью дифракции рентгеновских лучей (методом двух экспозиций), с расчетными напряжениями, вычисленными по кривизне изогнутой балки (отожженная малоуглеродистая сталь). Белый кружок - данные экспериментатора А, черный - экспериментаторов В и С.

Напряжения и деформации, что это?

Все эти рассуждения подводят нас к понятиям "напряжение" и "деформация". Когда мы говорили о силах, то имели в виду полные величины сил, действующих на тело. Такой силой мог быть любой груз. Когда мы говорили о смещении под нагрузкой, то имели в виду полные смещения независимо от размеров объекта, будь он большим или малым. Однако все это не позволяет нам сравнивать большой объект под большой нагрузкой с малым объектом под меньшей нагрузкой. Например, если из стали одного сорта изготовить крошечную деталь пишущей машинки и корпус воздушного лайнера, то какие характеристики этого материала, работающего в столь различных условиях, можно было бы сравнивать? Без ответа на этот вопрос мы не можем продолжать разговор о материалах и конструкциях. Нужные нам величины называются напряжением и деформацией. Напряжение - это нагрузка, отнесенная к единице площади, то есть

$$s = P/F,$$

где s - напряжение, P - нагрузка, F - площадь. Приведенная формула также повседневно, как и привычные всем выражения "килограмм масла стоит 3 рубля" или "машина проходит 10 километров на одном литре бензина". Следовательно, если мы снова возьмем кирпич с поперечным сечением 25x12 см, то есть площадью сечения 300 см², и я наступлю на него, приложив к нему силу своего веса 75 кг, то сжимающее напряжение, которое я вызову в кирпиче, будет

$$s = P/F = 75/300 = 0,25 \text{ кг/см}^2$$

Точно так же, если кирпичная опора моста имеет поперечное сечение 10x5 м и на мост въезжает локомотив весом в 125 т, то сжимающее напряжение в кирпичной кладке будет около 0,25 кг/см². Теперь мы с полной определенностью можем сказать, что в обоих случаях напряжения в кирпиче примерно одинаковы, и если одна конструкция не разрушается, то, по-видимому, не разрушится и другая. Что касается кирпичей, то их молекулы поджимаются одна к другой одинаковыми силами, хотя вес локомотива и вес моего тела совершенно различны. Очевидно, что инженера должны интересовать именно такие величины.

Напряжение может быть выражено в килограммах на квадратный миллиметр (кг/мм²), килограммах на квадратный сантиметр (кг/см²), ньютонах на квадратный метр (Н/м²) или других подобных единицах.

* В 1969 году Международным комитетом мер и весов для измерения величины напряжения была принята единица "паскаль". (Па). Паскаль - давление, вызываемое силой 1Н (ньютон), равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м² - *Прим. перев.*

Разумеется, эти единицы применяются к любым поперечным сечениям и к любой точке, а не только к квадратным миллиметрам, квадратным сантиметрам и т.п. То, что цена одного килограмма масла 3 рубля, вовсе не означает, что ее используют лишь для веса в один килограмм. 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 e , то

$$e = Dl / l$$

где Dl - полное удлинение, а l - начальная длина. Так что, если стержень длиной 100 см под нагрузкой удлинится на 1 см, его деформация будет 1/100, или 1%. Такая же деформация будет у стержня длиной 50 см, растянутого на 1/2 см, и т.д. При этом толщина стержня роли не играет, не важно также, что вызвало удлинение.

В данном случае нас интересует лишь то, насколько изменилось взаимное положение атомов и молекул. Деформация, так же как и напряжение, не зависит от размера образца. Деформация есть отношение удлинения к начальной длине, и, следовательно, она безразмерна и не зависит от того, какой системой единиц мы пользуемся.

Закон Гука

Роберт Гук был первым, кого осенила догадка о том, что происходит при нагружении твердого тела. Он был не только физиком, но и известным архитектором и инженером. Ему нередко случалось беседовать со знаменитым часовых дел мастером Томасом Томпионом (1639–1719). Они толковали о поведении 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.

Свои претензии на приоритет Гук оговорил в работе "Десяток изобретений, которые я намерен опубликовать" (1676). Среди других проблем там была "Истинная теория упругости и жесткости". Под этим заголовком стояла лишь анаграмма *ceiinossttuu*, которую можно было понимать как угодно. Лишь тремя годами позже в трактате о пружинах "De potentia restitutiva" ("О восстанавливающей силе") Гук расшифровал ее латинской фразой "*Ut tensio sic vis*" - "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 кг, то под нагрузкой 200 кг удлинение составит 2 см и так далее, *pro rata* *. Это утверждение известно как закон Гука. Оно является краеугольным камнем всей техники.

* Пропорционально (лат.).

По существу, закон Гука является приближенным соотношением, которое вытекает из характера межатомных взаимодействий. Различные типы химических связей (Приложение I) в конечном счете дают зависимость действующей между двумя атомами силы от расстояния между атомами, как это схематически показано на рис. 3.

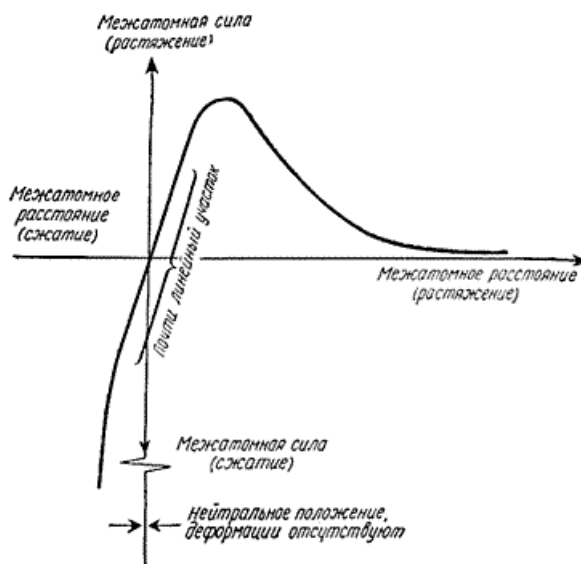


Рис. 3. Зависимость силы, действующей между двумя атомами, от расстояния между ними.

При очень больших деформациях - скажем 5–10% - от пропорциональности между напряжениями и деформациями не остается и следа. Но обычно деформации не превышают $\pm 1\%$, а в этом диапазоне зависимость между напряжениями и деформациями линейна. Кроме того, для малых деформаций процесс нагрузки и разгрузки обратим, то есть кусок материала можно нагрузить и снять с него нагрузку тысячи и миллионы раз с одним и тем же результатом. Наглядный пример этому - пружинка балансира в часах, которая повторяет этот процесс 18 000 раз в час. Такой тип поведения твердого тела под нагрузкой называется упругим. Упругое поведение свойственно большинству технических материалов, хотя существуют и материалы с пластическим поведением. Наиболее ярко пластичность проявляется у таких веществ, как пластилин, оконная замазка - эти материалы не подчиняются закону Гука: после снятия внешних нагрузок их форма и размеры не восстанавливаются.

Вообще говоря, наука об упругости изучает напряжения и деформации в твердых телах. Не только во времена Гука, но даже и совсем недавно мы мало знали об упругих свойствах материалов. В тех случаях, когда их деформации превышали примерно 1%, они либо разрушались, либо утрачивали упругие свойства. Поэтому кривая зависимости межатомной силы от расстояния при больших смещениях атомов из положения равновесия (рис. 3) представляла главным образом академический интерес, на практике больших напряжений достигнуть не удавалось. И лишь сравнительно недавно появилась возможность растянуть очень прочные нитевидные кристаллы - усы - до деформаций от 3 до 6%. Эти опыты подтвердили, что закон Гука не всегда верен. Зависимость напряжения от деформации на графике отклоняется от прямой линии и следует кривой межатомной силы, которая была рассчитана ранее физиками-теоретиками. На рис. 4 показана такая кривая для кремниевого уса, деформированного более чем на 3%.

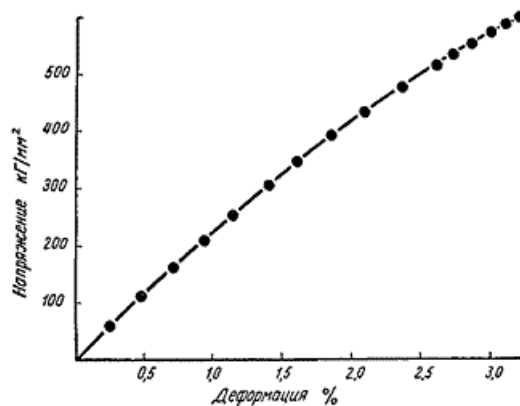


Рис. 4. Кривая напряжение-деформация очень кремниевого кремниевого уса, который был деформирован в испытательной машине до 3,6%. Поведение уса при больших деформациях не подчиняется закону Гука.

Модуль Юнга

Гук установил, что удлинения, укорочения, прогибы как пружин, так и других упругих тел пропорциональны приложенным к ним нагрузкам. 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 завитого куска стали, который мы называем пружиной, - это сходство явилось источником бесконечных заблуждений. Примерно столетие после Гука существовала эта путаница: не всем была ясна разница между двумя понятиями упругости.

Около 1800 года Томас Юнг (1773–1829) 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:

$$\text{Напряжение} / \text{Деформация} = s/e = \text{константа.}$$

Юнг заключил, что эта константа является неотъемлемой характеристикой каждого химического вещества и представляет его жесткость. Мы называем эту константу упругости модулем Юнга и обозначаем буквой E . Итак,

$$E = s/e$$

Следовательно, E описывает жесткость материала как такового. Жесткость любого заданного объекта зависит не только от модуля Юнга материала, но и от геометрической формы объекта. Между прочим, считают, что Юнг "был человеком великой учености, но, к сожалению, он никогда даже не подозревал, что возможности заурядного ума ограничены" *. Его идея о модуле упругости была изложена в не очень понятной статье, опубликованной в 1807 году. К этому времени Юнгу запретили читать лекции в Королевском институте, так как считали, что он слишком далек от практики. Так и случилось, что одно из самых распространенных ныне и полезных технических понятий не было принято и внедрено в инженерную практику при жизни автора.

* S.B. Hamilton, History of Technology, 4.

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. Разнообразие конструкций огромно - мосты, самолеты, коленчатые валы и т.д. Посмотрите, например, на деформированное крыло самолета (рис. 5). Под действием рабочих нагрузок взаимодействие деталей в конструкции не должно нарушаться **. В таких расчетах нам в первую очередь нужны величины E .

* Однажды я исследовал конструкцию вагона из пластика для Британских железных дорог. Двери, которые нормально открывались и закрывались, когда вагон был пуст, заклинивались, когда он был полон пассажиров в часы пик.

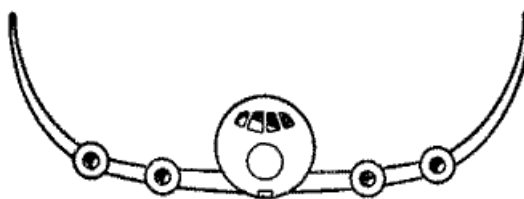


Рис. 5. Самолет, в котором деформация лонжеронов крыла составляет 1,6% (радиус кривизны балки = Толщина / [2 ЧДеформация])

Во-вторых, хотя неспециалисту и позволено думать, что жесткости всех конструкционных материалов практически одинаковы и говорить "Отлично, это вполне жестко! Не видно никаких смещений", такие суждения не соответствуют

действительному положению вещей. Нам необходимо знать модули упругости различных материалов (стали, древесины и т.д.) не только для того, чтобы рассчитать 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 должен иметь размерность напряжения (кг/мм^2 , Н/м^2 и т.п.). Если деформация равна 1 (100%), то напряжение оказывается равным модулю упругости. Стало быть, модуль упругости можно считать таким напряжением, которое удваивает длину упругого образца (конечно, если он прежде не разрушится). Легко себе представить, что величина модуля упругости должна быть большой, обычно она по крайней мере в 100 раз больше разрушающего напряжения: ведь мы упоминали уже, что материалы, как правило, разрушаются, когда их упругая деформация не превышает 1%. Модуль Юнга для стали, например, составляет около 20000 кг/мм^2 .

Как мы уже говорили, величина E может сильно из меняться от одного вещества к другому. Ниже приведены величины модуля для некоторых материалов*.

* Поскольку кривая межатомных сил плавно проходит через нулевую точку величина E для любого материала одинакова как в случае растяжения, так и в случае сжатия. Если бы этого не было, математическая теория упругости оказалась бы еще сложнее. Однако модули материалов, содержащих довольно большие внутренние поры, при растяжении и сжатии иногда бывают различными. При сжатии модуль больше благодаря тому, что поры и трещины смыкаются.

Материал	E , кг/мм^2
Резина	$0,00007410^4$ (т.е. 0,7)
Неармированные пластики	$0,015410^4$
Органические молекулярные кристаллы, фталоцианин	$0,015410^4$
Древесина	$0,15410^4$
Кость	$0,3410^4$
Магний	$0,4410^4$
Обычное стекло	$0,7410^4$
Алюминий	$0,8410^4$
Сталь	2410^4
Окись алюминия (сапфир)	4410^4
Алмаз	12410^4

Таким образом, модуль самого жесткого из твердых тел (алмаза) почти в 200 000 раз больше модуля резины, тоже твердого тела. У резины модуль упругости очень мал, потому что резина состоит из длинных гибких молекулярных цепочек, которые в ненагруженном материале изгибаются, свиваются, сплетаются, словом, ведут себя подобно ниткам в спутанном клубке. Когда резину растягивают, изогнутые цепочки распрямляются, и совершенно очевидно, что необходимая для этого сила будет намного меньше той, которая потребовалась бы, чтобы растянуть пучок нитей, вытянутых в одном направлении. Совершенно иная картина наблюдается в кристалле. Прикладывая к нему силу, мы действуем непосредственно на межатомные связи, и единственная причина большой разницы в величине E для разных кристаллов заключена в различной жесткости самих химических связей. Наклон прямого участка кривой межатомного взаимодействия очень сильно зависит от энергии межатомной связи. Но общая форма кривой для всех кристаллов одинакова.

Если обратить внимание на величину E для фталоцианина, то нетрудно понять, почему огромное множество твердых химических соединений не может быть использовано в качестве конструктивных материалов. Вообще говоря, мы всегда хотим, чтобы наши конструкции были как можно жестче: колебания мостов и зданий и без того велики. А если сделать конструкцию из материала с жесткостью фталоцианина, она никуда не будет годиться. Сталь - наиболее жесткий из сравнительно дешевых материалов, и в этом одна из причин ее широкого использования. Пластики, даже армированные стекло пластики, имеют низкую жесткость, что ограничивает их применение для крупных конструкций.

Прочность

По-видимому, наиболее убедительно в рекламе продаваемой вещи звучат слова "не боится огня" и "не ломается". И хотя почти все мы знаем, что авторы рекламы не очень объективны, все же реклама находит адресата, и всегда можно встретить людей, искренне убежденных в том, что существуют (или, по крайней мере, должны существовать) какие-то действительно неразрушающиеся предметы. Однако создать такие предметы невозможно, поскольку энергия химических связей не бесконечна, и эти связи имеют определенную прочность. Нужно лишь, надежно закрепив предмет, достаточно сильно на него нажать или потянуть, и он сломается. Вопрос лишь в том, когда.

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. Печенье - жестко, но непрочное; сталь - и жесткая, и прочная; нейлон - нежесткий, гибкий, но прочный; малиновое желе - и нежесткое, и непрочное. Вряд ли можно ожидать большей информации о свойствах твердого тела, если пользоваться лишь двумя его характеристиками.

Проще всего начать с прочности на разрыв. Это - напряжение, необходимое для того, чтобы разорвать материал на части, разрушив все межатомные связи вдоль поверхности разрыва. Представьте себе стержень, который растягивается вдоль оси. Стержень из очень прочной стали может выдержать растягивающее напряжение 300 кг/мм^2 . А вот обычный кирпич выдержит лишь $0,4-0,6 \text{ кг/мм}^2$. Следовательно, прочность материалов, используемых в технике, может изменяться примерно в 1000 раз.

Ниже приведена прочность на разрыв некоторых наиболее часто применяемых материалов.

МАТЕРИАЛ	ПРОЧНОСТЬ, кг/мм²
Металлы	
<i>Стали</i>	
рояльная проволока	300
высокопрочная сталь	150
низкоуглеродистая сталь	40
<i>Чугун</i>	
обычный	7-15
современный	15-30
<i>Другие металлы</i>	
чистый алюминий	7
сплавы алюминия	15-60
медь	15
латуни	12-40
магниевые сплавы	20-30
титановые сплавы	75-150
Неметаллы	
древесина, ель	
вдоль волокон	10
поперек волокон	0,3
стекло (оконное и посудное)	3-20
хорошая керамика	3-35
обычный кирпич	0,5
льняное волокно	70
хлопок	35
шелк	35
паутина	25
сухожилие	10
пеньковый канат	8
кожа	4
кость	15

Говоря о прочности, мы обычно имеем 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 разрушение происходит, хотя и представляет собой явление более сложное, чем разрыв. Под действием сжимающей нагрузки материал может ломаться самым различным образом.

Если мы сжимаем достаточно короткий стержень, на пример подставку, podporку или что-нибудь в этом роде, из материала мягкого, пластичного, подобного меди или мягкой стали, то материал просто растечется в разные стороны, словно пластилин. Если стержень сделан из хрупкого материала (камень, стекло), то при сжатии он разлетится, обратившись в осколки и пыль (иногда это бывает довольно опасным). Если же вы навалитесь на тонкую трость, она выгнется, а затем сломается пополам - так ведут себя при сжатии любые длинные гибкие стержни и пластинки. Консервная банка под действием большой нагрузки, например если на нее наедет автомобиль, сомнется - этот вид разрушения похож на предыдущий. Аналогично разрушаются любые тонкостенные конструкции, каких много в кораблях, самолетах, автомобилях. Оказалось, что нелегко составить таблицу, которая давала бы наглядное представление о "прочности при сжатии". Чтобы определить эту величину, требуются знания и опыт, но, вообще говоря, этой характеристикой лучше не пользоваться.

Между величинами прочности материалов на растяжение и сжатие какого-либо универсального соотношения не существует. Отчасти это связано с тем, что в большинстве случаев трудно провести четкую грань между материалом и конструкцией. Например, куча кирпича обладает прочностью на сжатие и не имеет никакой прочности на растяжение. Несомненно, в данном случае куча кирпича представляет собой конструкцию, а не материал, но такие материалы, как чугун, бетон, гипс, на много прочнее при сжатии, чем при растяжении, и в основном по той же самой причине, что и куча кирпича: в них масса трещин. Цепи и канаты прочны на разрыв, но совсем не сопротивляются сжатию. Вероятно, их следует считать конструкциями. Древесина, однако, примерно в три-четыре раза прочнее при растяжении, чем при сжатии, потому что ее отдельные волокна при сжатии сгибаются. Тем не менее древесина считается материалом, а не конструкцией.

Растяжение и сжатие в конструкциях

В течение многих веков инженеры и архитекторы старались по возможности не нагружать материал растяжением. И это делалось не столько потому, что не было достаточно прочных на разрыв материалов (древесина, например, в этом отношении прекрасный материал), сколько из-за того, что очень трудно сделать достаточно прочное на разрыв соединение. (Большинство из нас интуитивно чувствует, что сжатая конструкция безопаснее растянутой; например, нам кажется, что кирпичная стена безопаснее подвесной канатной дороги.) Но когда все-таки приходилось соединять детали, работающие на растяжение, например на кораблях, места стыков всегда были наиболее уязвимым местом конструкции. Теперь мы научились делать надежные стыки с помощью болтов, заклепок, клея и сварки, и уже нет особых оснований не доверять таким конструкциям.

Однако в древности проблема соединений в сжатых конструкциях решалась намного проще, чем в растянутых. В самом простом случае это была укладка камней или кирпичей один к другому без применения раствора, и такое сооружение не рушилось. Эта работа требует навыка, но он не многим сложнее того, который приобретают дети, складывая картинки из кубиков. Однако с развитием архитектуры росла и высота стен, появилась необходимость надежнее связывать кирпичи и камни между собой. Иначе стены с грохотом превращались в груды камня: не связанные между собой камни расплзались под весом верхней части кладки.

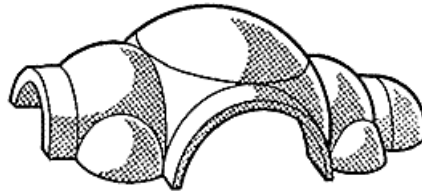
До наших дней сохранились великолепные образцы соединений в античных постройках. Правда, не ясно, насколько необходима была та тщательность, с которой выполнены большие каменные блоки этих сооружений. Вероятно, отчасти она определялась соображениями престижа. Но как бы то ни было, многие из древних построек поражают наше воображение.

Однако какой высокой и впечатляющей ни была бы стена, технически это не очень мудреная конструкция; ее создатель должен был думать лишь о напряжениях, действующих в одном направлении, по вертикали. Правда, перекрытия, двери, окна всегда вносят дополнительные трудности. А как только мы начинаем рисовать в своем воображении системы напряжений в двух и трех направлениях, перед нами открываются колоссальные возможности. Примером может служить арка. Самая простая арка (рис. 6) работает на сжатие одновременно в двух направлениях, хотя на первый взгляд это кажется невозможным. Кирпичной аркой можно без особых ухищрений перекрыть пролет длиной около 50 м (чаще встречаются пролеты в 25–50 м). Это намного больше того, чего удается добиться с помощью любого простого балочного перекрытия. Арки очень долговечны, и до наших дней в отличном состоянии сохранилось много древнеримских арок, с их помощью, например, перебрасывали водопроводы через овраги.



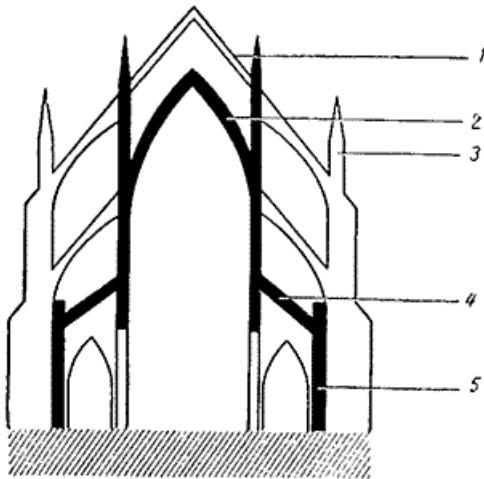
Рис. 6. Арка, представляющая собой конструкцию, работающую на сжатие в двух направлениях

Формирование представлений о сложном напряженном состоянии стимулировало громадный скачок в развитии не только архитектуры, но и техники. Как только была принята концепция двумерной арки, а вслед за этим сделан следующий логический шаг - к трехмерному куполу, - архитектура стала творить чудеса. Центральная часть собора св. Софии, построенного в Константинополе около 530 года при императоре Юстиниане, представляет собой огромный купол, диаметр которого достигает 33 м. Для легкости он сложен из пемзы и покоится на громадных арках, которые в свою очередь опираются на вспомогательные полукупола (рис. 7). Раз меры свободного от каких-либо колонн пространства площадью более чем 60х30 и высотой около 80 м были, вероятно, непревзойденными вплоть до постройки современных вокзалов, крыши которых держатся на металлических стропилах.

**Рис. 7. Макет куполов собора св. Софии в Константинополе.**

Формы византийских зданий, как правило, просты. Готические же архитекторы, давая волю своему воображению, создавали перекрытия, боковые приделы, витражи. И хоть это, надо думать, обходилось недешево, такие постройки, если они были сделаны со вкусом и знанием дела, могли служить образцами инженерного искусства и художественного мастерства. Что же касается каменной кладки, то она должна быть выполнена так, чтобы напряжения во всех точках конструкции были сжимающими: ведь кладка совсем не сопротивляется растяжению, под действием которого она разваливается по швам.

Готические архитекторы, пытаясь заставить конструкцию работать на сжатие, не прибегали к математике, и поэтому в трехмерные лабиринты соборных крыш чертом прокрадывалось растяжение. Так обрушилась башня одного из самых больших готических соборов - собора в Бове (1247), крыша его проваливалась дважды. Архитекторы знали лишь качественную сторону подобных катастроф и пытались предупредить их, подкрепляя конструкции частоколом контрфорсов (рис. 8).

**Рис. 8. Типичная конструкция готического собора с контрфорсами**

- 1 - деревянная крыша;
- 2 - арочный свод;
- 3 - контрфорс;
- 4 - деревянная крыша бокового придела;
- 5 - стена придела.

В соборе св. Софии эта задача решалась и рациональнее и успешнее: там вспомогательные купола давили на главный купол и создавали сжатие в опасной области. Однако иногда готические зодчие перебарщивали: создавая слишком большие боковые давления, они должны были ставить подпорки изнутри, чтобы предотвратить разрушение крыш. Эти подпорки чаще всего делались в виде перевернутых арок, подобных аркам собора в Уэльсе (Великобритания), который, как бы ни оценивали его в эстетическом плане, технически построен неграмотно (рис. 9). Не удивительно, что крыши церковей довольно часто рушились на головы коленапоклоненных прихожан.

Рис. 9. Собор в Уэльсе (Великобритания).



Каменная кладка остается целой благодаря силам тяжести, то есть при правильно спроектированной кладке вес камня создает безопасную сжимающую нагрузку во всех ее точках. А если этого веса не хватает, к зданию всегда можно добавить башни или башни. Если же в конструкции появляются растянутые области, то, безусловно, растягивающие и сжимающие нагрузки (в том числе нагрузки от веса сооружения) должны быть уравновешены. Так, канаты подвесного моста (рис. 10) находятся в растянутом состоянии, а грунт под мостом оказывается сжатым. Растяжение в брезенте и растяжках палатки уравновешивается сжатием в центральной подпорке и на той земляной площадке, где установлена палатка. На плавущем корабле растяжение в парусах и оснастке вызывает сжатие мачт и рангоутов. В теле животных сжимающие нагрузки воспринимаются скелетом, в основном позвоночником; эти напряжения возникают не только под действием собственного веса, но и вследствие растяжения в мышцах и сухожилиях. Сокращая мышцу, я поднимаю руку, в это время мышца передает сжимающую силу кости, а кость легко выдерживает сжатие. Если нога попадает в условия, когда на нее действует изгиб - а изгиб включает растяжение, - нога может сломаться.

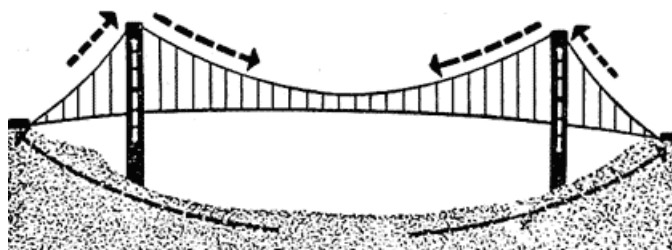


Рис. 10. Растяжение в тросах балансируется сжатием в грунте

Когда мы располагаем материалами, одинаково хорошо работающими и на сжатие и на растяжение, наши конструкции оказываются проще и безопаснее. Именно поэтому в строительстве удобны железобетон и стальные конструкции. Инженерам повезло, в их распоряжении есть железо и сталь - ведь мы часто и не знаем, какого рода напряжения придется выдержать машине во время работы. Например, стенки парового котла работают на растяжение, но если по какой-то причине давление пара упадет ниже атмосферного, котел будет сжат разностью давлений, однако со стальным котлом ничего страшного не произойдет.

К довольно неожиданным эффектам, с которыми приходится бороться, могут привести сжимающие напряжения в корпусе подводной лодки. Когда лодка находится в надводном положении, она плавает, как любое другое судно, поскольку ее вес меньше веса воды, которая может быть вытеснена объемом лодки. Чтобы лодка погрузилась, балластные цистерны заполняют водой настолько, чтобы вес лодки был равен весу воды в ее объеме. Тогда "удельный вес" лодки будет равен удельному весу воды, и лодка не будет иметь запаса плавучести.

Теперь лодка может опускаться на глубину и маневрировать примерно так же, как это проделывает дирижабль в воздухе. Однако, погружаясь глубже, лодка испытывает все большее и большее давление воды, и сжимающие напряжения в ее корпусе растут. Поскольку давление внутри лодки остается примерно постоянным, корпус ее сжимается, уменьшается объем, а следовательно, уменьшается и выталкивающая сила. Если вес лодки вместе с балластом не изменяется, она стремится провалиться глубже, и при некоторых обстоятельствах этот процесс может стать опасным. На предельной для подводной лодки глубине погружения величина деформации сжатия может составить около 0,7%. Деформация происходит во всех трех направлениях, поэтому объем лодки может уменьшиться примерно на 2%. Так как сжимаемость воды очень невелика, то для лодки весом 1000 т это будет означать потерю выталкивающей силы примерно 20 т*. Если эту силу не компенсировать, частично опорожня балластные цистерны от воды, подводная лодка будет опускаться все глубже и глубже, пока ее не раздавит давлением воды. В этом, между прочим, заключается одна из трудностей постройки подводной лодки из стеклопластиков, которые всем, пожалуй, хороши, кроме модуля упругости: он слишком мал.

* Общий вес балластной воды, необходимой для погружения такой лодки, будет около 100 т. Следовательно, упругая деформация корпуса потребует заметного изменения балласта.

Иногда думают, что затонувшие подводные лодки "висят" где-то поблизости от океанского дна. Это, конечно, нелепое представление: если корпус потерпевшей аварию лодки и не сохнет давлением воды, что случается чаще всего, то он будет непрерывно сжиматься, выталкивающая сила будет падать и лодка будет опускаться на дно все быстрее и быстрее.

Воздушные шары, пневматические шины и т. п. представляют особый случай конструкции, в которой растягивающие напряжения в оболочке уравновешены давлением наполняющего их газа или жидкости. Поэтому большие баржи-мешки и надувные лодки обычно очень легкие и эффективные конструкции. Изобретение крыш, поддерживаемых изнутри воздухом, заставляет пересмотреть прежние архитектурные традиции, в этих конструкциях все элементы работают на растяжение, лишь воздух внутри здания сжат.

Балки и изгиб

Итак, мы знаем теперь, что понять, как работает конструкция на растяжение и сжатие, довольно легко. Но вот как те же самые растяжение и сжатие позволяют балкам выдерживать нагрузки - это далеко не очевидно. А между тем разного рода балки (рис. 11) составляют львиную долю всех конструкций, с которыми мы повседневно сталкиваемся. Самая обычная половая доска - наглядный пример балки, и таких примеров можно привести огромное множество. Мы уже говорили, что задача этой самой доски заключается в том, чтобы давить на наши подошвы вверх с силой, в точности равной нашему весу. Естественно, эту роль пол должен играть постоянно, в том числе и тогда, когда мы стоим посреди комнаты, далеко от стены, которая в конечном счете будет воспринимать силу нашего веса. Но позвольте, как эта сила передается от стены на наши ноги, и обратно?

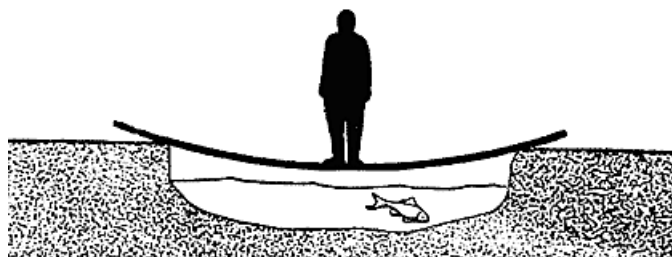


Рис. 11. Свободно опертая балка.

Ответ на этот вопрос дает так называемая теория балок, которую, пожалуй, можно назвать становым хребтом техники. Но, к сожалению, этот "хребет" представляет собой *pons asinorum* * для студентов технических вузов. Большинство из них механически заучивают формулы теории балок лишь для того, чтобы проскочить на экзаменах; понимать эти формулы они начинают гораздо позже, когда настает время мучаться над собственными проектами. Поэтому давайте пока оставим всю эту кухню интегрирования эпюр и попытаемся подступиться к существу проблемы.

* Мост для ослов (*лат.*). Так говорят о том, что, не являясь сложным само по себе, представляет тем не менее затруднение для начинающего. Источник выражения - "Геометрия" Евклида (III век до н.э.). - *Прим. перев.*

Начнем с того, что вспомним высказанную ранее мысль об отсутствии четкого различия между понятиями "материал" и "конструкция". Большие балки, например перекрытия железнодорожных мостов, подобно детскому конструктору, собираются из многих малых стержней. Эти стержни работают как на растяжение, так и на сжатие. Способ передачи нагрузки в такой решетчатой балке, или ферме, по существу не отличается от того, как передается нагрузка в сплошной балке, даже такой, как половая доска. В решетчатой балке вся нагрузка передается только путем сжатия и растяжения стержней. В сплошной балке такой решетки нет, но мы можем представить себе ее как бы прошивающей всю балку.

Для определенности начнем анализ с консольной балки, то есть с балки, один конец которой встроены в стену или жестко закреплен каким-либо другим способом на любом основании (на языке инженеров это называется "заделка"): к другому концу консоли приложена нагрузка. Такую консоль рисовал еще Галилей (рис. 12); правда, он неверно рассчитал прочность своей консоли, что, впрочем, ему простительно. Мы же построим нашу консоль только из стержней и натянутых струн.

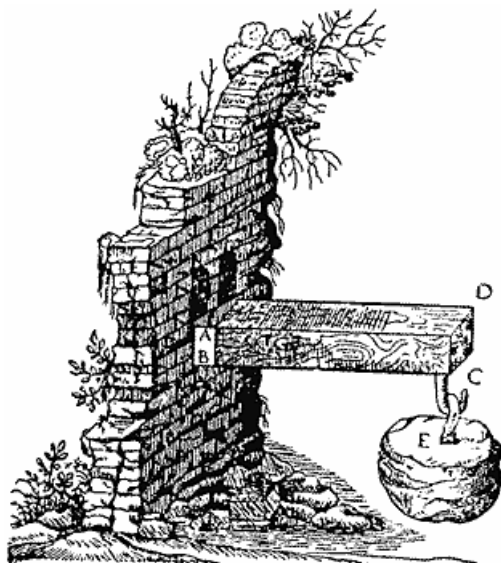
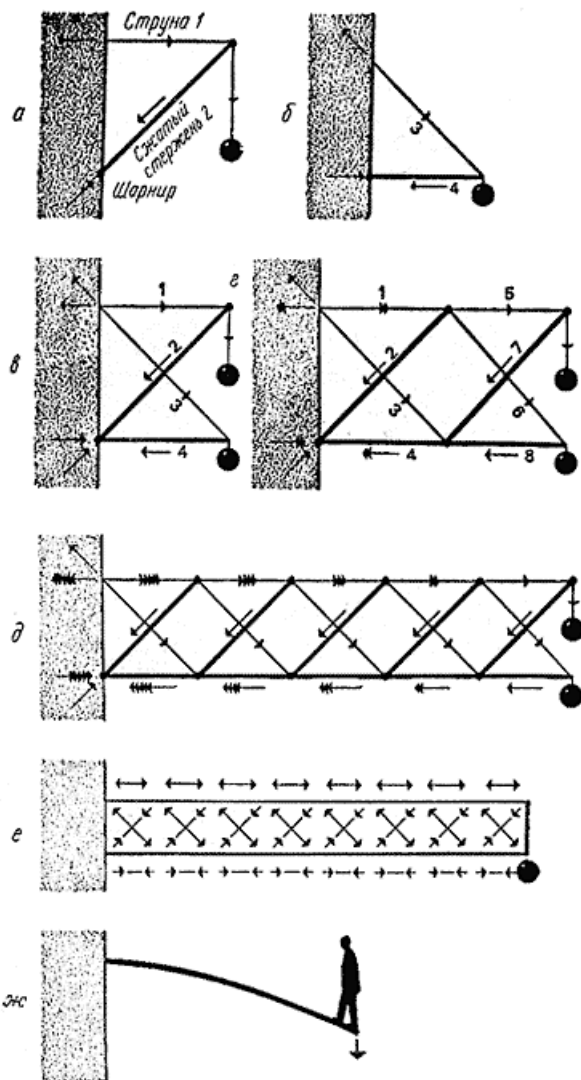


Рис. 12. Рисунок Галилея, иллюстрирующий испытания консольной балки.

Рассмотрим простую конструкцию типа крана, изображенную на рис. 13, *а*. Сжатый стержень 2 опирается на стену и поддерживается струной 1, таким образом он может воспринимать внешнюю нагрузку (назовем ее W). Очевидно, сила, противодействующая нагрузке W , возникает вследствие сжатия наклонного стержня 2. Натяжение горизонтальной струны 1 лишь предохраняет сжатый стержень 2 от поворота и падения.

С таким же успехом мы можем воспользоваться другой треугольной конструкцией (рис. 13, *б*), в которой сжатый стержень 4 занимает горизонтальное положение и удерживается от падения наклонной растянутой струной 3. В этом случае сила, удерживающая вес W , обеспечивается струной, а горизонтальный сжатый стержень необходим лишь для того, чтобы струна не прижималась к стене.

Обе эти конструкции одинаково хороши, и мы можем объединить их в одну, способную выдержать вес $2W$, как показано на рис. 13, *в*. Ясно, что нагрузка $2W$ непосредственно воспринимается наклонными элементами 2 и 3, один из которых сжат, а другой растянут. Горизонтальные элементы 1 и 4 воздействуют на стену, один из них давит, другой - тянет, вместе они обеспечивают целостность конструкции, но не поддерживают вес груза непосредственно.



Пристроив к полученной конструкции еще одну, точно такую же, мы получим новую ферму, показанную на рис. 13, г. В этом случае тот же самый груз $2W$ поддерживается сжатыми и растянутыми наклонными элементами 2, 3, 6 и 7, в то время как элементы 1, 5, 4 и 8 сжаты и растянуты в горизонтальном направлении и, хотя они не поддерживают внешнюю нагрузку непосредственно, благодаря им ферма не рухнет. Получается, что каждый элемент выполняет свою функцию и, если хотя бы один стержень или одна струна выйдет из строя, катастрофа неизбежна: каждый элемент по-своему важен.

Теперь посмотрим, как передается в нашей ферме нагрузка от элемента к элементу. Правая ячейка на рис. 13, г работает точно так же, как единственная ячейка на рис. 13, в. Однако в левой (внутренней) ячейке на рис. 13, г дело обстоит иначе. Растягивающее напряжение в струне 1 вдвое больше напряжения в струне 5, а сжатие в стержне 4 в два раза превышает сжатие в стержне 8. Это происходит потому, что диагональные элементы (назовем их "сдвиговыми") добавляют нагрузку на элементы, расположенные по направлению к месту заделки консоли. Однако во всех сдвиговых элементах независимо от длины фермы нагрузка одинакова.

Мы можем продолжать нашу ферму, пристраивая к ней все новые и новые ячейки, как это показано на рис. 13, д. Внимательно посмотрев на рисунок, мы поймем, что и здесь напряжения во всех диагональных элементах одинаковы. С другой стороны, напряжения сжатия и растяжения в нижних и верхних горизонтальных элементах от ячейки к ячейке возрастают (если двигаться от точки приложения нагрузки к месту заделки консоли). Нетрудно доказать, что это возрастание напряжения пропорционально номеру элемента (опять-таки считая от точки нагружения). Именно поэтому консоль всегда ломается в месте заделки, у стены, где возникают наибольшие напряжения, если, конечно, заранее не позаботиться о ее прочности и не подобрать все стержни соответственно действующей нагрузке. Если такой подбор сделан строго пропорционально нагрузке, то ферма становится равнопрочной, то есть может сломаться в любом месте, а это идеальный случай, составляющий цель многих расчетов на прочность. Совершенно ясно, почему мы хотим, чтобы материал был напряжен во всех точках одинаково; в этом случае материал используется с максимальной эффективностью, а конструкция имеет минимальный вес.

Если теперь мы преобразуем нашу ферму или балочку, построенную из детского конструктора, в сплошную балку, то получим систему напряжений, изображенную на рис. 13, е. В средней по высоте части балки под углом 45° к оси действуют главным образом сдвиговые напряжения, неизменные по длине балки. Материал верхней и нижней частей

балки нагружен в основном растяжением и сжатием. Горизонтальные напряжения растяжения-сжатия быстро возрастают по длине балки и в наиболее опасном сечении становятся намного больше сдвиговых напряжений. Именно эти напряжения обычно повинны в разрушениях балочных конструкций и тяжелых несчастных случаях, которые за ними следуют. Вот почему вычисления, связанные с расчетом напряжений, - это совсем не сухие академические упражнения, интересные только специалистам, они прямо связаны с безопасностью и благополучием большинства из нас.

Если вся эта охота за напряжениями покажется читателю несколько непонятной, лучше всего сделать модель из детского конструктора или из соломинок для коктейлей, скрепляя их обыкновенными булавками. Поразмыслив над такой моделью, вы поймете, что представляет собой консоль вообще и как она выдерживает нагрузку. Конечно, сколь сложным бы ни было напряженное состояние, мы должны отдавать себе отчет в том, что любое напряжение связано с деформацией, поэтому консоль неизбежно должна в большей или меньшей степени прогибаться под нагрузкой (рис. 13, ж).

Консоли широко распространены в технике, но еще чаще используются обычные балки, вроде тех, которые принято называть "свободно опертыми" (рис. 14). Примером такой балки может служить доска, переброшенная через канаву или ручей. Как же такая балка соотносится с консольной? Наглядный ответ на этот вопрос дает рис. 14. Дело в том, что свободно опертую балку можно рассматривать как две консоли, жестко связанные друг с другом в местах заделки и перевернутые на 180° . В то время как наибольшее напряжение в консоли возникает в месте ее заделки, в нашей новой балке оно будет в центре. Поэтому такие балки обычно ломаются пополам.

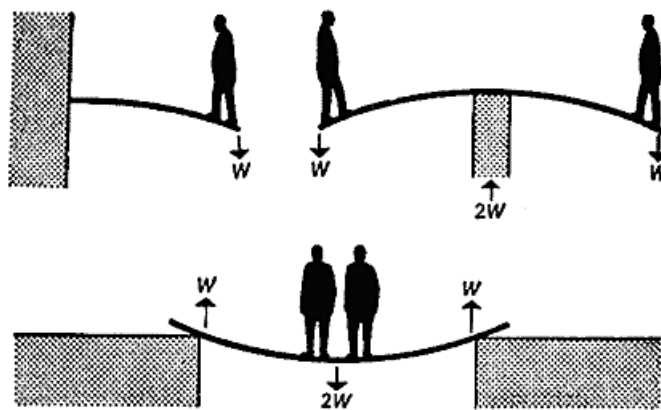


Рис. 14. Свободно опертая балка, которую можно рассматривать как две консоли, сложенные вместе у заделок и перевернутые на 180° градусов.

Теперь нам понятно, почему мы не проваливаемся сквозь пол: напряжения в досках передаются зигзагами, под углом 45° к поверхности, от наших подошв до стены, обеспечивая в результате силу, направленную вверх, которая нас и держит. Вместе с этими сдвиговыми напряжениями в доске вблизи верхней и нижней ее поверхностей возникают напряжения растяжения - сжатия, направленные горизонтально. Если по какой-либо причине эти напряжения окажутся слишком большими (на доску наступил чересчур грузный человек или сама доска слишком тонка), мы сначала обнаружим тревожный прогиб доски, а уж затем раздастся треск.

Каждый может поставить простой эксперимент, который покажет, что напряжения и перемещения, вызванные изгибом, намного опаснее тех - при прочих равных условиях, - которые вызваны растяжением или сжатием. Действительно, возьмите какую-нибудь деревянную планку или стержень и попробуйте разорвать ее руками. Как правило, этого вам сделать не удастся, как не удастся и заметить на глаз удлинение вашего образца. Теперь начинайте гнуть стержень, и вы тут же заметите вполне ощутимый прогиб, а возможно, и без особого труда сломаете образец. Этим объясняется то обстоятельство, что балки почти всегда требуют тщательной расчетной проверки прочности и жесткости. Такой расчет может сделать каждый, кто знаком с элементарной алгеброй, по стандартным формулам, приведенным в конце книги.

Мы уже говорили, что разобраться в теории изгиба балок не так-то просто, но, откровенно говоря, особого напряжения интеллекта для этого не требуется, да и многое в технике станет гораздо яснее. По правде сказать, проектируя даже весьма внушительные конструкции, инженеры зачастую пользуются почти элементарной теорией изгиба. Далее мы увидим, что такая практика иногда может быть опасной, поскольку элементарная теория, будучи чрезвычайно полезной, все же не дает нам достаточно полного представления о прочности сложных конструкций. Тем не менее она очень широко используется для прикидочных оценок прочности любых конструкции, от коленчатого вала до морских судов.

Большие балки начали использовать в технике по существу не столь давно, немногим более столетия назад. Английскому инженеру Телфорду (1757–1834) дали много лестных прозвищ за искусство строить мосты, он построил их, вероятно, больше, чем кто-либо другой. Обычно Телфорд применял каменные или чугунные арки, работающие на сжатие, а для больших пролетов первым стал строить подвесные мосты, используя железные цепи (мост через пролив Менай - 1819 год). Вряд ли Телфорд когда-либо применял большие балки, отчасти из-за отсутствия подходящего материала -

кованных железных плит, а отчасти оттого, что не было надежной теории балок. Между прочим, об уровне расчетов на прочность в то время можно судить по тому, что форма линии цепей для упомянутого моста определялась не расчетным путем, а на специально построенной большой модели моста, переброшенной через овраг.

Лет тридцать спустя Роберт Стефенсон (1803–1859) уже имел в своем распоряжении листы котельной стали; кроме того, он верил своим расчетам. Ему принадлежит блестящая идея * изготовить из листов железа балку в виде полого короба и пустить внутри нее поезда. Так, в 1850 году был построен недалеко от телфордова моста железнодорожный мост через Менай. Каждая балка Стефенсона весила 1500 т, они были собраны на берегу, за тем спущены на плотках на воду, установлены на плаву поперек узкого бурлящего потока между опорами, после чего примитивные гидравлические домкраты за несколько приемов подняли всю конструкцию метров на тридцать к опорам. Хотя вся операция проводилась с полным пониманием дела, она не лишена была элементов риска; по тем временам это был выдающийся подвиг.

* В действительности эту честь он должен разделить со своим коллегой Вильямом Фэйрбэрном.

Несколько позже Стефенсона одолели сомнения, и было предложено укрепить мост, подвесив трубу на цепях, но это оказалось совершенно излишним. Оба моста по сей день стоят рядом - превосходные образцы использования растяжения и изгиба в технике. Подвесной мост Телфорда вначале был недостаточно жестким, штормовые ветры, гулявшие вдоль пролива, угрожающе раскачивали его. Рассказывают, как однажды зимней ночью лошади почтовой кареты не смогли удержаться на ногах, и во избежание неприятностей пришлось срочно пережигать постромки огнем фонаря. После этого случая мост был укреплен, и в таком виде он служит до сих пор. Недостаточная жесткость подвесных мостов делает их непригодными для железнодорожных целей: поезд может сойти с рельсов. Именно поэтому Стефенсон и Брюнель (1806–1859) разработали для больших пролетов балочные мосты. Но хотя трубчатый мост через Менай имеет великолепную жесткость и никогда не вызывал беспокойства, в настоящее время подобные мосты имеют решетчатую конструкцию. Такие мосты экономичнее как в постройке, так и в эксплуатации.

Корабль также представляет собой длинную закрытую с двух сторон трубу, которой назначено плавать. Отличие такой конструкции от степенсона моста по существу невелико. Корпус корабля порой не выдерживает веса двигателей, груза, топлива, которые он несет, и изгибается. Глядя на стоящее у причала судно трудно себе представить, что его можно разрушить неосторожной или неравномерной загрузкой трюмов и цистерн. Однако такие трагедии случались довольно часто и, судя по всему, не исключены и в будущем. В сухом доке корабль тщательнейшим образом устанавливается на специальные килевые подставки, чтобы корпус опирался на них равномерно, но в плавании такие равномерные опоры отсутствуют. Корабль может быть поднят двумя мощными волнами за нос и корму, а его середина окажется без опоры. Бывает и так, что самая мощная волна может оказаться под центральной частью корпуса.



Рис. 15. Корабль "Скенектеди".

Трещина началась у острого угла люка на палубе и "побежала" до самого киля

Корабли становились все больше, длиннее, а инженеры стремились сделать их легче. В 1903 году Британское Адмиралтейство решило провести специальные испытания судов на прочность. С этой целью эскадренный миноносец "Волк" был заведен в сухой док. После откачки воды подпорки были оставлены сначала только посередине, а затем лишь по краям судна. При этом с помощью тензометров - приборов для измерения удлинений, а следовательно, и деформаций материала - измерялись напряжения в различных частях корпуса. Затем "Волк" вышел в открытое море для продолжения испытаний в плохую погоду. Легко себе представить экспериментаторов, в темных трюмах борющихся с морской болезнью и тогдашними не очень покладистыми тензометрами, - в официальном отчете состояние моря называлось "чрезвычайно бурным с сильным ветром". Капитан делал все, что было в его силах, чтобы этот поход был худшим для "Волка". Но как он ни старался, а напряжения в корпусе нигде не превышали 9 кг/мм^2 , в то время как прочность сталей, используемых в кораблях, была примерно $40\text{--}45 \text{ кг/мм}^2$.

После этих двух испытаний кораблестроители решили, что стандартный метод расчета прочности судов по простой теории изгиба балок вполне их устраивает, поскольку он обеспечивает достаточно большой запас прочности. Порой никто не бывает так слеп, как эксперты.

Корабли продолжали время от времени ломаться по полам. Такое стряслось, например, со стометровым пароходом, груженным рудой, на одном из Великих озер в Америке во время шторма. Максимальное напряжение в таких условиях по расчетам должно было составлять не более одной трети от предела прочности материала судна.

Даже когда не случалось самого страшного, появлялись трещины вокруг люков и других отверстий в корпусе *. Безусловно, корень зла крылся именно в этих отверстиях. Трубчатый мост Стефенсона оказался исключительно надежным, потому что представлял собой сплошную оболочку, если не считать отверстий под заклепки. Конечно же, британские кораблестроители не могли не принять во внимание возможность увеличения напряжения пропорционально уменьшению площади поперечного сечения за счет всех этих отверстий. Однако профессор Инглис в своей знаменитой статье, написанной в 1913 году, показал, что такой подход не очень хорош **. Он ввел понятие "*концентрации напряжений*", которое, как мы увидим ниже (глава 4), имеет жизненно важное значение в расчетах прочности конструкций.

* В 1966 году почетный вице-президент Королевского общества кораблестроителей Дж. Муррей заявил: "*С 1950 года лишь 26 судов разрушились в открытом море. Из большого числа судов, благополучно проплавивших в море и затем обследованных в доках, примерно 20% имели трещины в главной корпусной ферме*" ("Таймс" от 23 марта 1966 года). Несколько дней спустя пришло известие о двадцать седьмом судне, сломавшемся пополам в штормовую погоду на Тихом океане.

* Впервые задача о концентрации напряжений была решена русским ученым Г.В. Колосовым. - *Прим. перев.*

Что показал Инглис? Он нашел, что если мы, вырезав в пластинке отверстие, уменьшим сечение, скажем, на одну треть, то напряжение на кромке отверстия не будет составлять $3/2$ от первоначального, а может быть во много раз больше. Число, показывающее, во сколько раз местное напряжение превышает среднее значение напряжения - коэффициент концентрации напряжений, - зависит от формы отверстия, или надреза, и от свойств материала. Наихудшая ситуация возникает в случае острых над резов и хрупких материалов.

Этот вывод Инглиса, который он получил чисто математическим путем, был встречен с обычным пренебрежением тем удивительно непрактичным племенем людей, которые сами себя зовут почему-то "практиками". Произошло это в основном потому, что мягкая сталь менее других материалов чувствительна к концентрации напряжений, хотя и ни в коем случае не безразлична к ней.

Глава 2.

ВНУТРЕННЕЕ СЦЕПЛЕНИЕ, или НАСКОЛЬКО ПРОЧНЫМИ ДОЛЖНЫ БЫТЬ МАТЕРИАЛЫ

*Что, наконец, представляется нам затверделым и плотным,
То состоять из начал крючковатых должно несомненно,
Сцепленных между собой наподобие веток сплетенных,
В этом разряде вещей, занимая в нем первое место.
Будут алмазы стоять, что ударов совсем не боятся,
Далее - твердый кремь и железа могучего крепость,
Так же как стойкая медь, что звенит при ударах в засовы *.*

Лукреций.
"О природе вещей"

* Перевод Ф.А. Петровского (Лукреций, О природе вещей, М, изд. АН СССР, 1958). В прозаическом переводе Т. Джексона на английский язык алмаз назван "*все презирающим*", что больше соответствует действительности. - *Прим. перев.*

Прежде чем ставить вопрос о том, сколь прочными должны быть материалы, следует научиться измерять их реальную прочность. К настоящему времени накоплено довольно много экспериментальных данных, полученных в чисто научных целях. Но львиная доля механических испытаний всегда проводилась и проводится с целями сугубо практическими - без знания прочности материалов развитая цивилизация существовать не может.

Вообще говоря, сведения о прочности нужны нам по двум причинам. Первая и наиболее очевидная - конструктор должен располагать данными, без которых он не может рассчитать прочность изделия. Правда, более или менее строгий расчет стал возможен сравнительно недавно. Зато вторая причина - контроль качества материала - известна и вошла в практику издавна. Дело в том, что всегда нужно знать, является ли данная партия материала столь же качественной, как и предыдущая. Иногда вопрос этот может быть поставлен и так: можно ли использовать данный материал взамен предложенного ранее?

Конечно, занятия, столь "ученые", как механические испытания, не были в чести ни у ремесленника, ни у его хозяина *. Процедура испытаний, описанная Вестоном Мартиром (1885–1966) в его книге **, посвященной строительству деревянных судов в Новой Шотландии в двадцатые годы нашего века, была, должно быть, очень распространенной.

* В "Истории черной металлургии Британии" (J.C. Carr, W. Taplin, The History of the British Iron and Steel Industry, Harvard University Press, 1962) приводятся слова одного из ведущих британских предпринимателей-металлургов: "Я не знаю, что такое испытания. Если кто-то хочет покупать мою сталь - пожалуйста, если не хочет, пусть ищет в другом месте".

** J. W. Martir, The Southseaman, Blackwoods, 1928.

Прежде чем приладить какую-нибудь доску, Мак Альпин, Том и всякий, кто бывал рядом с ними, долго совещались. Сначала они очень внимательно ее разглядывали, затем гнули, постукивали, прислушивались, и - могу поклясться - я видел однажды, как Мак Альпин дегустировал доску. Во всяком случае, он лизнул древесину, а затем повторил все движения опытного дегустатора чая - вплоть до последнего ловкого плевка сквозь стиснутые зубы - все было проделано с видимым наслаждением.

По-видимому, первое зарегистрированное испытание на растяжение было проведено французским философом и музыкантом Мариной Мерсенном (1588–1648), которого интересовала прочность струн в музыкальных инструментах. В 1636 году Мерсенн провел серию испытаний струн из различных материалов; правда, сведений о том, были ли как-то использованы полученные им данные, до нас не дошло.

Насколько я знаю, первое упоминание об объективных механических испытаниях, за которыми последовало практическое применение полученных результатов, датировано 4 июня 1662 года.

Сэр Баттен, Повей и я поплыли в Вулвич, где были свидетелями испытаний голландской пряжи сэра Форда (в последнее время этот вопрос очень беспокоил нас, я сам подумывал о мистере Хью, который поставлял нам канаты и, судя по всему, не справлялся с делом). И действительно, канаты были очень плохими: испытания показали, что пять таких пряжей рвутся быстрее, чем четыре нити рижской пряжи. Кроме того, отдельные веревки оказались явно старым хламом, вымазанным дегтем, лишь сверху они были покрыты новой пенькой. Все это походило на неслыханное жульничество.

Экспериментаторы в Вулвиче могли рвать канат, привязав один его конец к какой-нибудь балке сверху, а к другому концу пристроив корытце, в которое можно было класть мерные грузы. Но скорее всего они проводили сравнительные испытания: связывали два каната, которые хотели сравнивать, и рвали эту связку с помощью ворота. Число пряжей в каждом канате можно было потом подогнать так, чтобы получилась равная вероятность разрыва обоих канатов.

Испытать канат или проволоку довольно просто, так как их концы легко закрепить, намотав на барабан ворота или лебедки. Закреплять для разрыва образцы других материалов намного труднее, поэтому долгое время испытания ограничивались сжатием и изгибом. Современные испытательные машины имеют захваты, в которых можно закрепить любой металлический стержень и разорвать его. Правда, если взять обычный стержень, такое испытание, как правило, будет неудовлетворительным: захваты повредят металл и вызовут преждевременное разрушение стержня у одного из его концов. Поэтому лучше изготовить специальный образец с утоненной средней частью, такой образец порвется по неповрежденному захватами тонкому сечению. Вообще же, чтобы правильно выбрать форму образца, нужно обладать некоторым опытом и умением, потому что для каждого типа материала должна быть найдена своя наилучшая форма.

Что касается техники испытаний, то, конечно, к образцу можно прикладывать нагрузку непосредственно грузами. Однако разрушающее усилие для обычно используемых образцов лежит между одной и десятью тоннами, а в большинстве случаев испытания проводят девушки-лаборантки. Поэтому нагрузка обычно создается с помощью механического или гидравлического устройства. Промышленность выпускает различные машины такого рода, многие из них в той или иной степени автоматизированы. Все, что должен сделать оператор, это вставить образец, увидеть, как машина порвала его, а затем разделить за фиксированную нагрузку на измеренную площадь поперечного сечения образца. В результате получается разрушающее напряжение.

Разумеется, полученное число ничего не говорит о том, почему материал имеет именно такую прочность и не должен ли он быть прочнее. С другой стороны, прочность любого технического материала практически достаточно постоянна. Поэтому в свое время прочность считали неотъемлемой характеристикой материала, которой он наделен более или менее случайным образом. Металловеды знали, что та или иная добавка или термическая обработка могут упрочнить или разупрочнить сплав, но эти знания были чисто эмпирическими, и наблюдаемые эффекты не удавалось объяснить.

Инженерам нравилось такое постоянство в поведении материалов: их радовала мысль, что каждый материал обладает свойственной ему прочностью, которая может быть определена раз и навсегда, стоит только провести достаточное число испытаний. Еще совсем недавно в лабораториях материаловедения главной заботой было создание блестящих коллекций больших испытательных машин. Результатами испытаний исписывалось огромное множество бумаги, однако знаний о прочности материалов прибавлялось весьма немного. И в самом деле, трудно преувеличить строгость той тайны, которая веками окутывала проблему прочности и разрушения твердых тел.

Представления об атомном строении материи были впервые сформулированы Демокритом (460–370 гг. до н.э.). Затем они были существенно развиты Лукрецием (95–55 гг. до н.э.), намного опередившим свое время. Но эта теория была целиком построена на догадках, об убедительных экспериментальных свидетельствах не приходилось и думать. И все же Лукреций представлял себе существование проблемы сцепления, или когезии, он предположил, что атомы имеют какие-

то связывающие их воедино зацепки. Увы, и в середине XIX века мудрейший Фарадей ничего не мог сказать о прочности твердого тела, кроме того, что она определяется сцеплением между его мельчайшими частицами. Он добавлял к этому, что вся проблема очень интересна. Хотя оба утверждения верны, они не многим отличаются от высказываний Лукреция.

В предыдущей главе приводилась таблица реальных прочностей различных материалов. Как и модули упругости, для разных веществ они весьма различны, столь же непостоянны и величины прочности химической связи. Казалось бы, можно предположить, что прочность вещества пропорциональна прочности его химических связей. Однако на самом деле это не так, и именно в этом одно из отличий прочности и жесткости. Действительно, модуль Юнга можно связать с жесткостью химической связи между атомами, но для прочности это, вообще говоря, несправедливо. Связь между атомами железа в стали не так уж прочна - она с легкостью разрушается химически, когда железо ржавеет. В то же время механически весьма непрочная ржавчина (окись железа) обладает прочными химическими связями. Другой пример: металлический магний прочнее, чем окись магния (магнезия), хотя разница энергий связи прекрасно иллюстрируется при горении магниевой стружки в кислороде. Поэтому попытки связать химическую и механическую прочности могут привести к грубым ошибкам. В самом деле, имея сильные химические связи, можно без особого труда сделать очень непрочный (или даже совсем лишенный прочности) материал, но сделать очень прочный материал, располагая только слабыми химическими связями, - нельзя.

Пластики и полимеры, которые вошли в обиход в период между двумя мировыми войнами, были, вероятно, первыми прочными искусственными материалами, вышедшими из химических лабораторий. Их разработка основывалась на довольно естественном предположении об особой прочности этих материалов - химики наделяли их очень сильными химическими связями. В начале второй мировой войны ко мне пришел работать один весьма способный молодой химик академического толка. Тут же он принялся за работу над созданием особо прочного пластика, объяснив мне при этом, что материал должен быть прочнее других, потому что он будет основан на более сильных связях и число таких связей будет больше, чем в любом из существующих материалов. Так как юноша был действительно очень знающим химиком, я ему верил. Так или иначе, для создания этих связей понадобилось очень много времени. Когда синтез был завершен, мы с трепетом извлекли из формы этот стратегический продукт. Но, увы, он оказался не прочнее куска старого засохшего сыра.

Гриффитс и энергия

Теперь мы должны вернуться назад, к 1920 году, когда вся проблема прочности довольно основательно подзавязла. В то время А.А. Гриффитс (1893–1963), молодой сотрудник Авиационного исследовательского центра в Фарнборо, носился с идеями, которые шли вразрез с традициями и противостояли скучной обыденности работ над материалами. Но, к сожалению, всерьез их никто не воспринимал. А Гриффитс ставил очень интересные вопросы. Почему столь велика разница в прочности различных тел? Почему прочность всех тел не одинакова? Почему вообще материалы имеют какую-то прочность? Почему бы им не быть прочнее? По крайней мере, сколь прочными они "обязаны" быть? До сравнительно недавнего времени все эти вопросы считались либо непостижимыми, либо несостоятельными, либо принадлежащими глупцам.

Теперь-то мы знаем в общих чертах, какой должна быть прочность любого материала и почему далеко не всегда она достигается на практике. Более того, нам в какой-то мере известно, что нужно делать, чтобы повысить прочность материала. Этими знаниями мы прямо или косвенно обязаны Гриффитсу. Ниже в сокращенном и несколько видоизмененном виде я приведу его основные идеи.

Прежде всего мы должны уметь обращаться с понятием энергии, которая представляет собой способность совершать работу. Энергия имеет размерность силы, умноженной на расстояние. Так, если я поднимаю груз весом 2 кг на высоту 1,5 м, то я увеличиваю его потенциальную энергию на 3 кгм. Эта энергия (она исходит от моего обеда, который в свою очередь исходит от солнца, и т.д.) может быть преобразована в любую из форм энергии, но не может быть уничтожена. Потенциальная энергия представляет собой очень удобный способ "консервирования" энергии. Когда это потребуется, она может пройти через различные последовательные преобразования из одной формы в другую. Эти переходы могут быть очень наглядными, при этом может быть рассчитан баланс энергии.

Накопленная, или потенциальная, энергия поднятого груза прежде использовалась, например, для привода настенных часов. Сейчас в большинстве часовых механизмов запас энергии содержится в пружине. Выбор способа накопления энергии - всего лишь вопрос удобства, а не принципа *. Энергия деформированного тела очень напоминает энергию поднятого груза, следует лишь иметь в виду, что в процессе деформирования сила изменяется, в то время как вес практически не зависит от высоты подъема, если она, конечно, не слишком велика. Согласно закону Гука при деформации напряжение в материале растет линейно. Следовательно, если исходное напряжение было равно нулю, то энергия деформации в единице объема выражается формулой

$$1/2 \cdot (\text{Напряжение} \cdot \text{Деформация})$$

То, что энергия деформации вполне обычная тривиальная вещь, отлично демонстрируется стрелками-лучниками. Между прочим, поэтому следует держаться в стороне от натянутых тросов. Кинетическая энергия причаленного судна, то есть энергия движения судна, качающегося на волнах у причала, преобразуется в энергию деформации чалки. Если чалка обрывается, то эта энергия переходит в кинетическую энергию каната, которая может оказаться слишком большой для стоящего на ее пути человека.

* Часовая пружина представляет собой стальную ленту, свернутую для экономии места в спираль, подобно рулетке. По существу, это балка. Когда часы заводят, число витков спирали увеличивается, а так как общая длина ленты не изменяется, то каждый ее участок оказывается более изогнутым. Поскольку это балка, во всех ее точках действует либо растяжение, либо сжатие (см. главу 1). Кстати, по мере раскручивания пружины энергия, получаемая с одного оборота, уменьшается. Поэтому часовщики в свое время вынуждены были изобрести устройство, называемое улиткой (или фузией): это коническая катушка, на которую наматывается, поддерживая силу привода постоянной, ведущая цепь. Вот почему прежде предпочитали привод от груза: энергия груза на один сантиметр веса одинакова и в нижнем, и в верхнем положениях. (в русской литературе для улитки обычен несколько иной синоним - *фузья* - V.V.) Следовательно, все тела в нагруженном состоянии обладают энергией деформации, и эта энергия тем или иным способом может быть преобразована в любую другую форму энергии, чаще всего - в тепло. Но дети всегда ухитряются узнать, что энергию растянутой резины можно использовать для разрушения, например стекла. Не знаю, может быть, именно такие ассоциации привели Гриффитса к мысли о разрушении как об энергетическом процессе.

Когда разрушается хрупкий материал, в области разрушения образуются две новые поверхности, которые до этого не существовали, и идея Гриффитса заключалась в том, что нужно связать энергию новых поверхностей с энергией деформации тела перед разрушением. Теперь давайте разберемся, что же такое поверхностная энергия. Мы знаем, что энергия имеет много форм - тепловая, электрическая, энергия деформации и т.д., - но то, что поверхность твердого тела обладает энергией только в силу самого существования своего как поверхности, - это становится ясно не сразу.

Наблюдая дождевые капли, пузыри, насекомых, шагающих по поверхности воды, мы легко приходим к выводу, что вода, как и другие жидкости, имеет поверхностное натяжение. Поверхностное натяжение - это совершенно реальная физическая сила, которая может быть измерена без особого труда. Следовательно, если площадь поверхности жидкости увеличивается, то производится работа по преодолению этой силы, и энергия накапливается в новой поверхности. Подсчитывая баланс энергии, мы должны учитывать поверхностную энергию так же, как и другие виды энергии. Например, когда комар садится на воду, поверхность прогибается под его лапками; следовательно, площадь поверхности и ее энергия увеличиваются. Комар проваливается до тех пор, пока увеличение поверхностной энергии воды не сравняется с уменьшением потенциальной энергии насекомого, дальше комар не тонет, и это его, наверное, вполне устраивает.

Жидкость стремится по возможности уменьшить свою поверхностную энергию. К примеру, тонкая струя жидкости из только что закрытого крана, достигнув определенного диаметра, непременно разобьется на отдельные капли с меньшей поверхностной энергией. Когда жидкость замерзает, молекулярный характер ее поверхности изменяется мало, и энергия поверхности сохраняется, хотя поверхностное натяжение уже не в силах изменить форму твердой частицы, округлив ее подобно капле. В большинстве твердых тел межатомные связи прочнее и жестче, чем в обычных жидкостях, соответственно и величины поверхностной энергии у них в 10–20 раз выше*. Не замечаем же мы поверхностного натяжения в твердых телах не потому, что оно слабое, а потому, что твердые тела слишком жестки, чтобы их форма заметно искажалась силами поверхностного натяжения.

* Поверхностная энергия воды составляет примерно 77 эрг/см². У конструкционных материалов эта величина порядка 1000 эрг/см². Поверхностная энергия алмаза равна 5400 эрг/см². (Поверхностное натяжение в дин/см численно равно поверхностной энергии в эрг/см².)

Теперь, подобно тому, как мы стали бы вычислять вес самого большого комара, способного шагать по данной жидкости, попытаемся определить, сколь прочным должен быть тот или иной материал. Начав эти расчеты, основанные на вышесказанном, мы с удивлением обнаружим, что они очень простые.

Попробуем найти напряжение, которое необходимо для разделения в объеме материала двух примыкающих один к другому атомных слоев. Пока нам безразлично, какой материал рассматривать, кристаллический или аморфный. По существу все, что нам нужно знать, - это величины модуля Юнга и поверхностной энергии.

Итак, положим, что два слоя атомов вначале находятся на расстоянии x см один от другого, тогда энергия деформации на квадратный сантиметр при напряжении S и деформации E может быть найдена следующим образом:

$$1/2 \cdot (\text{Напряжение} \cdot \text{Деформация} \cdot \text{Объем}) = 1 / SEx$$

Но по закону Гука

$$E = SE, \text{ то есть } e = S / E.$$

Заменяя в первом равенстве E через S / E , получим

$$\text{Энергия деформации на квадратный сантиметр} = S^2 x / 2E.$$

Если G есть поверхностная энергия твердого тела на 1 см², то общая энергия двух поверхностей, образовавшихся при разрушении, будет $2G$ на 1 см².

Теперь предположим, что по достижении нашей теоретической прочности a , вся энергия деформации в объеме между двумя слоями атомов переходит в поверхностную энергию, то есть

$$S^2 x / 2E = 2G$$

Отсюда

$$S_* = (GE / x)^{1/2}.$$

Правда, мы немного завысили теоретическую прочность, так как предполагали, что материал подчиняется закону Гука вплоть до разрушения. Ведь в предыдущей главе мы видели, что закон Гука верен лишь для малых деформаций, а при больших деформациях кривая зависимости

межатомной силы от деформации отклоняется вниз от прямой. Поэтому энергия деформации будет меньше найденной нами энергии, грубо говоря, вдвое. Чтобы учесть это, мы просто опустим двойку в выведенной нами формуле, имея в виду, что мы не претендовали на получение точной величины прочности. Следовательно, правдоподобную оценку прочности материала должно давать выражение

$$S_* = 2(GE/x)^{1/2}$$

проще которого едва ли что можно придумать.

Теперь применим эту формулу к стали, типичными величинами для которой будут: поверхностная энергия $G = 1000$ эрг/см², модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^{12}$ дин/см², межатомное расстояние $x = 2 \cdot 10^{-8}$ см.

Подставив эти значения в формулу, получим прочность около $3 \cdot 10^{11}$ дин/см², то есть примерно 3000 кг/мм², что составляет около $E/6$. Прочность обычной стали - около 50 кг/мм², прочность специальной проволоки может быть 300 кг/мм².

Так как величины E и G для разных твердых тел различны, мы получим для них и различные значения теоретической прочности. Единственное, что будет роднить эти числа, - все они намного превысят значения прочности, которые нам дают реальные материалы. Пожалуй, сталь составляет исключение в этом смысле: реальная прочность некоторых сортов стали достигает все-таки 1/10 от вычисленной прочности; огромное большинство твердых тел имеет всего сотую или даже тысячную долю теоретической прочности.

Лет 30–40 назад никто не рискнул бы публично усомниться в этих вычислениях. Ведь в таком случае нужно было бы дать объяснения, откуда берется энергия вновь образованных поверхностей. Почему-то серьезно за это никто не брался. Где-то что-то было не так, и, пожалуй, рассуждали многие, лучше об этом поменьше говорить.

Если мы займемся вычислением лишь прочности как таковой, то для различных материалов получим различные значения теоретической прочности. Однако мы легко можем найти теоретические величины упругой деформации при разрыве; проделав это, мы обнаружим, что вычисленные деформации окажутся примерно одинаковыми для любого твердого тела почти независимо от его химической природы. Вообще говоря, величина этой деформации составляет примерно 10–20% *. Если это так, то прочность твердого тела должна лежать между $E/10$ и $E/5$. Таким образом, мы не вправе сказать, что все материалы должны иметь одну и ту же прочность, но мы можем утверждать (правда, без гарантированной точности), что все материалы должны были бы иметь одну и ту же упругую деформацию при разрыве. Повседневная практика, однако, убеждает нас, что материалы не только не имеют постоянной деформации при разрыве, но и расчетные прочности во всех без исключения случаях намного превышают реальные значения.

* Проницательный ум легко обнаружит, что поверхностная энергия твердого тела должна быть пропорциональна величине модуля Юнга. Действительно, $G = E_x/10$. Дело в том, что упругость и поверхностное натяжение определяются одними и теми же силами связи. Каучук имеет деформацию разрыва около 800%, но природа ее совершенно иная, и потому применять наши вычисления здесь было бы жульничеством (см. приложение D). О пластическом удлинении мягких металлов (у мягкой стали, например, оно составляет 60%) см. в главе 3.

Гриффитс задался целью найти физическую теорию, которая позволила бы объяснить расхождение между теорией и практикой. Я не был знаком с самим Гриффитсом, но его тогдашний помощник Бен Локспайсер рас сказывал мне кое-что об обстоятельствах, при которых велась эта работа. В те времена считалось, что ученые исследователи должны зарабатывать на жизнь лишь прикладными работами. Отсюда следовало, что материаловеды должны были ограничиваться исследованием применяемых в технике материалов, таких, как древесина или сталь. Гриффитсу нужен был гораздо более простой материал, он хотел иметь материал с чисто хрупким разрушением. Поэтому он обратился к стеклу. Сейчас мы назвали бы такой материал модельным, тогда же очень популярными были модели в аэродинамических трубах, но, помилуйте, кому приходилось прежде слышать о модельном материале?

Имея все это в виду, Гриффитс и Локспайсер остерегались обсуждать с руководством подробности своих экспериментов. Однако работа включала вытягивание волокон и выдувание пузырей из расплавленного стекла, и однажды, когда они проработали уже несколько месяцев, Локспайсер, уходя домой, забыл погасить газовую горелку, на которой друзья плавляли стекло. Пришлось давать объяснения по поводу случившегося пожара, после чего Гриффитсу и Локспайсеру было приказано прекратить пустое времяпрепровождение. Гриффитс был переведен на другую работу, позже он стал известным конструктором двигателей.

Предубеждение против стекла рассеивалось с трудом. Много лет спустя, кажется, в 1943 году мне довелось демонстрировать одному известному маршалу ВВС обтекатель самолетного радиолокатора, сделанный из стеклопластика. Это была, действительно, громадная штука, которую нужно было подвешивать под бомбардировщиком типа "Ланкастер".

- Из чего это сделано?
- Стекло, сэр.
- Стекло? Черт возьми, я не позволю совать стекло ни в один из моих самолетов!..

Вернемся, однако, к экспериментам Гриффитса. Он первым стал систематически изготавливать стекло волокна и, исследуя их механические свойства, нашел правдоподобное объяснение полученным результатам. Вначале Гриффитс должен был, хотя бы приблизительно, определить теоретическую прочность стекла, с которым работал. Модуль Юнга легко было найти путем простых механических испытаний, а величина межатомного расстояния не должна была сильно отличаться от 2–3 Å *.

* Нужно сказать, что Гриффитс пришел к этим оценкам несколько другим путем.

Оставалось измерить поверхностную энергию. А в простоте ее определения для стекла и заключалось одно из достоинств этого материала в качестве объекта исследования. Дело в том, что стекло не имеет фиксированной точки плавления, а при нагреве медленно изменяется от хрупкого твердого тела до состояния вязкой жидкости, и в ходе этого процесса существенных изменений молекулярной структуры не происходит. Поэтому при переходе от жидкого состояния к твердому не следует ожидать и сильных изменений величины поверхностной энергии, и потому поверхностное натяжение и поверхностная энергия, которые достаточно легко измеряются на расплавленном стекле, можно с известной точностью применять и при анализе затвердевшего стекла. Если нагреть конец стеклянного стержня в пламени газовой горелки, то, размягчившись, стекло будет стремиться принять форму шара, потому что силы поверхностного натяжения остаются достаточно большими и после того, как сопротивление деформированию по существу исчезло. Нетрудно измерить силу, необходимую для медленного вытягивания стержня в этих условиях. Но ведь она лишь очень немногим больше сопротивления поверхностному натяжению. На основании такого рода экспериментов, выполненных на очень простых приборах, Гриффитс установил, что теоретическая прочность его стекла при комнатной температуре должна быть почти 1400 кг/мм².

Затем Гриффитс взял холодные стержни диаметром около 1 мм из того же обычного стекла, разорвал в испытательной машине и определил их прочность. Она оказалась около $15\text{--}20 \text{ кг/мм}^2$, что вполне нормально для тех стекол, из которых делают лабораторную посуду, пивные бутылки; эти же стекла вставляют в окна и т.д. Но эта прочность составляла около $1/50\text{--}1/100$ от расчетной.

Тогда Гриффитс стал нагревать свои стержни посередине и оттягивать их концы. Получались более тонкие стержни-нити, которые он также после охлаждения испытывал.

Чем тоньше были полученные нити, тем они оказывались прочнее. Сначала их прочность увеличивалась медленно, но по мере того, как они становились очень тонкими, прочность возрастала весьма быстро. Прочность волокон диаметром около $2,5 \text{ мкм}$ сразу после вытягивания составляла 600 кг/мм^2 и более, а спустя несколько часов падала примерно до 350 кг/мм^2 . Кривая зависимости прочности от диаметра волокна росла столь стремительно (рис. 16), что трудно было установить верхний (максимальный) предел для величины прочности.

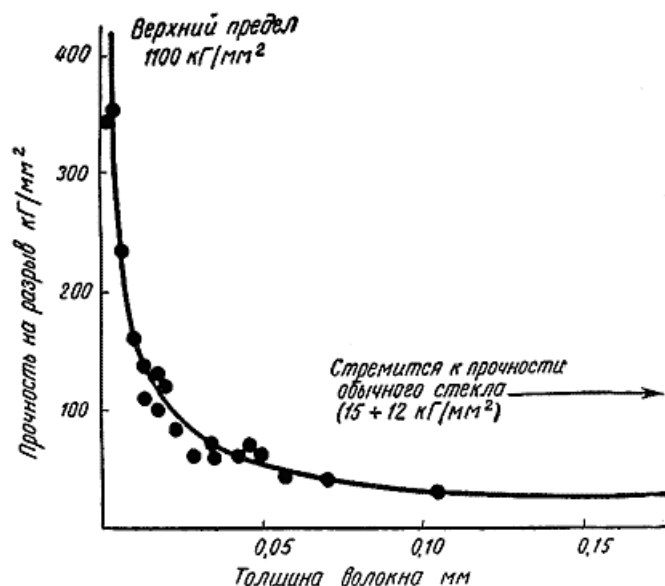


Рис. 16. Построенный Гриффитсом график зависимости прочности стеклянных волокон от толщины волокна.

Зависимость эта не была очень гладкой, опытные точки имели некоторый разброс. Однако по поводу об этой тенденции никаких сомнений не оставалось. Гриффитс не мог ни изготовить, ни испытать волокна тоньше примерно $2,5 \text{ мкм}$, да если бы он и смог это сделать, в его время измерить толщину таких волокон хоть с какой-нибудь точностью было бы очень трудно. Однако он проделал простой математический трюк: отложив по осям координат обратные величины, он экстраполировал кривую "прочность-размер" в область ничтожно малых толщин, и оказалось, что прочность тончайших нитей должна быть около 1100 кг/мм^2 . Напомним, что вычисленная величина прочности для его стекла была чуть меньше 1400 кг/мм^2 . Поэтому Гриффитс сделал вывод, что ему практически удалось приблизиться к теоретической прочности, и, если бы на самом деле можно было сделать более тонкие волокна, их прочность была бы очень близка к теоретической. Достичь в эксперименте почти теоретической прочности было, конечно, триумфом, особенно если учесть условия, в которых этот эксперимент проводился.

Недавно Дж. Морли из фирмы "Роллс-Ройс" получил кварцевые волокна (их состав отличается от состава гриффитсова стекла) с прочностью более 1400 кг/мм^2 (рис. 17). Как мы увидим в следующей главе, столь высокая прочность может быть получена не только на стеклянных волокнах, но и почти на любых твердых телах, аморфных и кристаллических.

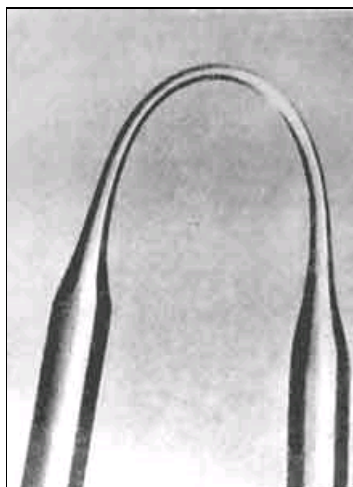


Рис. 17. Кварцевая нить, упруго изогнутая до деформации $7,5\%$; напряжения в ней доходят до 530 кг/мм^2 (прочность обычного стекла $7\text{--}15 \text{ кг/мм}^2$)

Итак, Гриффитс продемонстрировал (по крайней мере, в одном случае), каким образом можно на практике достигнуть почти теоретической прочности. Теперь он должен был показать, почему прочность подавляющего большинства твердых тел столь резко отличается от теоретической.

Глава 3.

ТРЕЩИНЫ И ДИСЛОКАЦИИ,

или

ПОЧЕМУ СТОЛЬ МАЛА ФАКТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Гриффитс написал классическую статью о своих опытах. Опубликована она была в 1920 году. В ней подчеркивалось, что задача состоит не столько в том, чтобы объяснить, почему тонкие волокна прочны, сколько в том, чтобы понять, почему столь мала прочность толстых волокон. Ведь одиночная цепочка атомов неизбежно должна либо обладать теоретической прочностью, либо же вообще не иметь ее.

Становилось ясным, во всяком случае Гриффитсу, что в реальном мире, где материалы обнаруживают лишь малую и крайне переменчивую долю прочности их химической связи, на самом деле механическую прочность определяет механизм ослабления. И только много позднее, уже в наше время, когда мы научились получать материалы, прочность которых составляет значительную долю теоретической величины, действительно важную и полезную роль приобрело умение изготавливать материалы с очень прочными химическими связями.

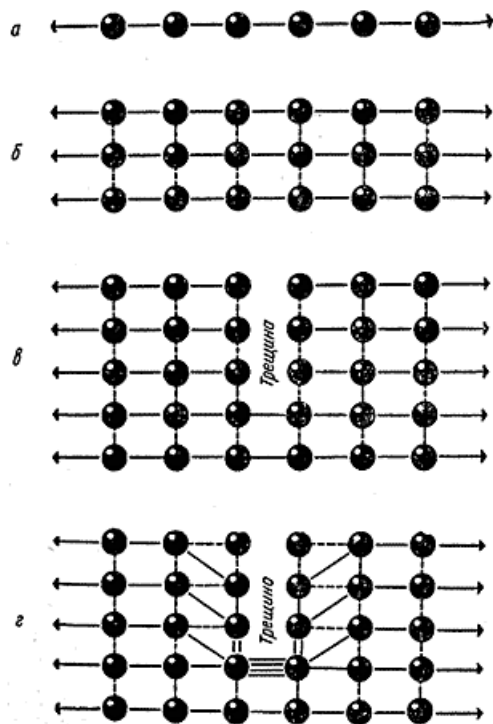
Слабость стеклянных волокон подводит нас к вопросу о гриффитсовых трещинах и возвращает к профессору Инглису, которого мы покинули в главе 1 в раздумье над тем, почему морские суда, обладающие по тогдашним расчетам большим запасом прочности, разламываются надвое в открытом океане. Инглис рассчитал, как разного рода вырезы, вроде люков на палубе, влияют на прочность крупных сооружений, в частности морских судов. Гриффитсу же пришла в голову блестящая мысль распространить расчет Инглиса на объекты гораздо меньших размеров, с надрезами почти молекулярной величины и столь малой толщины, что их нельзя рассмотреть в оптический микроскоп.

Концентрация напряжений

Каковы бы ни были размеры надрезов-концентраторов, сама концентрация напряжений всегда играет огромную роль. Как показал Инглис, всякое отверстие, любой острый надрез в материале создает в нем местное повышение напряжений. Этот местный всплеск напряжения, величину которого можно рассчитать, зависит только от формы отверстия и никак не связан с его размерами. Все инженеры знают о существовании концентрации напряжений, но далеко не все ее чувствуют. Действительно, полагаясь лишь на здравый смысл, трудно понять, почему крохотное отверстие ослабляет материал в той же степени, что и большая дыра*: это несколько противоречит привычным представлениям. Там, где есть малые отверстия и надрезы, материал начинает разрушаться от усталости очень скоро, но и при обычном статическом разрушении, то есть 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.

* Как мы увидим дальше, в главах 4 и 8, неупругое поведение пластичных металлов выравнивает напряжения вокруг малого отверстия, значительно ослабляя их концентрацию. Однако это не всегда наблюдается в металлах, работающих при циклическом нагружении, то есть в условиях усталости.

Нетрудно нарисовать физическую картину того, что же в действительности происходит у таких надрезов, как трещины, особенно если рассматривать существо дела на атомарном уровне. Обратившись к рис. 18, вы поймете, что при растяжении одиночная цепочка атомов испытывает равномерное напряжение, поэтому она обладает теоретической прочностью (рис. 18, а).



Взяв еще несколько таких же цепочек и расположив их так, чтобы они образовали кристалл (рис. 18, б), мы увидим, что пока еще ничто не мешает каждой цепочке в отдельности нести ее полное теоретическое напряжение. Предположим далее, что мы перерезали несколько соседних межатомных связей, то есть создали трещину (рис. 18, 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. 18, г). Ясно, что при подобных обстоятельствах перегруженная связь порвется раньше всех других. Когда же такое перегруженное звено лопнет, положение не изменится к лучшему. Напротив, оно ухудшится, так как на долю соседнего звена добавится не только нагрузка перерезанных с самого начала цепочек (при создании трещин), 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 не только для прямоугольных вырезов, но и для вырезов другой формы, например круглых и цилиндрических отверстий. Сильно вытянутое эллиптическое отверстие можно считать трещиной. Для эллиптической трещины коэффициент концентрации напряжений будет выражаться формулой

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

где L есть полудлина трещины, а 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 трещину длиной, скажем, 2 мкм с радиусом кривизны ее кончика 1 А. Такая трещина слишком мала, чтобы ее удалось увидеть с помощью оптического микроскопа, ее трудно обнаружить даже с помощью электронного микроскопа. Но тем не менее она повышает напряжение у своего кончика в 201 раз. При подобной концентрации напряжений прочность гриффитсова стекла должна снизиться от 1500 кг/мм² до уровня всего нескольких килограммов на квадратный миллиметр, то есть до величины, близкой к прочности обычного стекла. Все это позволило Гриффитсу предположить, что в обычном стекле содержится множество очень тонких трещин, которые не поддаются обнаружению с помощью каких бы то ни было обычных средств. Он ничего не говорил о том, как они выглядят или каково их происхождение, а просто утверждал, что если они существуют в обычном стекле - а почему бы им не существовать! - то стекло должно быть малопрочным. Он предположил далее, что по какой-то неизвестной причине в тонких волокнах они образуются реже, а в тончайших почти не попадают, быть может, лишь потому, что им там нет места.

Гриффитсовы трещины

По-видимому, Гриффитс думал, что трещины, которые он считал реально существующими в стекле, разбросаны во всем его объеме и возникают в процессе затвердевания стекла из-за неспособности его молекул сомкнуться друг с другом на отдельных участках. Оглядываясь назад, можно только удивляться тому, как много времени понадобилось, чтобы отвергнуть это представление. Расчеты Гриффитса показывали, что трещины - каково бы ни было их происхождение - должны быть весьма узкими, возможно, порядка сотых долей длины волны обычного видимого света. Так как увидеть

объекты, по размерам намного меньшие, чем длина волны освещающего их света, принципиально невозможно, то рассмотреть трещины Гриффитса непосредственно через обычный оптический микроскоп, который в лучшем случае позволяет видеть предметы размером около полумикрона, не было никакой надежды. Пришлось ждать появления электронного микроскопа, в котором изображение создается электронами с длиной волны что-нибудь около $1/25 \text{ \AA}$, в то время как видимый свет имеет длину волны около 4000 \AA .

Но уже в 1937 году, то есть еще до того, как в лабораториях появились электронные микроскопы, Андраде и Цинь решили поискать трещины в стекле с помощью простого оптического микроскопа, прибегнув к так называемому декорированию. Этот метод, часто весьма действенный, можно представить себе следующим образом. Пусть тонкая проволока, например телеграфный провод, натянута так далеко от вас, что ее совершенно не видно. Но если бы удалось как-то заманить на нее стаю ласточек, проволока сразу же бросилась бы нам в глаза. (По этой самой причине связисты иногда насаживают пробки на телеграфные провода.) Теперь представьте себе, что появилась новая стая и уселась на спины уже знакомых нам птиц - проволока стала еще заметнее. В принципе таким образом нашу проволоку можно сделать сколь угодно толстой. Теперь остается лишь вспомнить, что некоторые вещества кристаллизуются легче, если на подложке есть какие-то отклонения от регулярности. Выбрав подходящее вещество и заставив его кристаллизироваться на какой-то поверхности, вы часто можете заметить, что новые кристаллы зарождаются почти исключительно на тонких нерегулярностях этой поверхности и, следовательно, делают последние видимыми для наблюдателя.

Андраде осаждал на поверхности стекла пары натрия, которые при конденсации создавали на ней сетку линий. Можно было предположить, что это были трещины, но полной уверенности, конечно, не было: в подобном опыте нетрудно было получить изображение марсианских каналов или любых других химер. Но даже если эти узоры и выявляли тончайшие трещины на поверхности стекла (что, кажется, в действительности так и было), то это еще не служило доказательством отсутствия в стекле внутренних трещин.

В послевоенные годы удалось показать, что исключительно прочны не только тончайшие, но и довольно толстые волокна, если они тщательно изготовлены. Прочные стекловолокна от прикосновения к ним слабеют, а слабые - упрочняются, если удалить с них поверхностный слой химическим путем. Все это дало основания считать, что волокна ослабляются главным образом дефектами на поверхности стекла.

Приблизительно в 1957 году мы с Маргарет Паррат и Дэвидом Маршем провели очень много времени за исследованиями поверхности стекла. Усовершенствовав методику Андраде, Паррат научилась воспроизводить прекраснейшие образцы трещин на поверхности стекол всех сортов. Многие из этих трещин, пожалуй, большая их часть, представляли собой тончайшие волосовины. Плотность распределения трещин очень хорошо увязывалась с прочностью образцов различных стекол. Вопрос теперь состоял только в том, чтобы выяснить, как же трещины возникали на поверхности стекол. Во многих случаях сомнений насчет природы трещин не оставалось: трещины оказались царапинами, нанесенными стеклу другими соприкасавшимися с ним твердыми телами. Паррат сфотографировала такие типичные трещины (рис. 19 и 20).

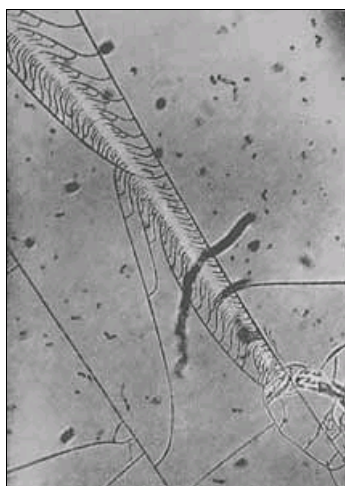
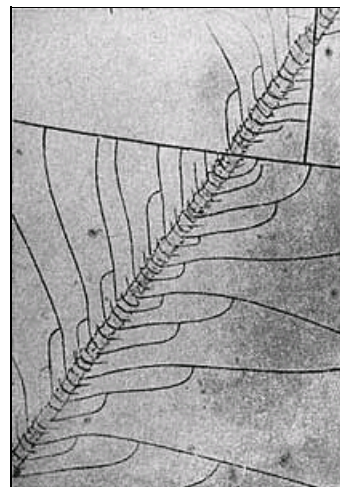


Рис. 19. Трещины вблизи царапины на поверхности стекла ($\Gamma 7000$).



Достаточно самого легкого прикосновения к стеклу чтобы создать на его поверхности совершенно законченные образцовые трещины. Лишь в очень редких случаях стекло оберегается от подобных прикосновений с самого момента его изготовления из расплавленной стекломассы.

Отнюдь не исключено, что это простое объяснение давало исчерпывающий ответ на вопрос о происхождении трещин для большей части обычных стекол *. Высокую прочность тонких волокон можно отчасти объяснить тем, что они очень легко гнутся и их проще изогнуть, чем поцарапать. Однако наблюдается ряд случаев, когда прочность стекла меняется, хотя его поверхность сохраняется совершенно неповрежденной. Одна из причин этого была изучена Маршем.

* Энергетический критерий Гриффитса, который управляет распространением трещин, рассматривается в [главе 4](#). Хотя внутренние дефекты там, где они существуют, в принципе не отличаются от поверхностных, они обычно бывают короче и, следовательно, как мы в этом убедимся дальше, для их роста требуется больше энергии.

Когда жидкости затвердевают, они чаще всего кристаллизуются. Обычно кристаллы бывают плотнее исходной жидкости (хотя известны исключения из этого правила, например вода). В кристаллах атомы располагаются более упорядоченно и теснее друг к другу, чем в жидкости. Стекла же в процессе затвердевания бывают столь вязкими, что их молекулы не успевают рассортироваться так, чтобы образовать кристаллы. Поэтому стекло - это переохлажденная и застывшая жидкость, а не кристаллическое твердое тело.

Однако и в стекле существует тенденция к кристаллизации, и некоторые стекла со временем превращаются в кристаллические тела. Это явление называют расстекловыванием. Поскольку стекла при расстекловывании дают усадку, этот процесс часто сопровождается разупрочнением, отчего стекла рассыпаются на кусочки. Обычно античные стекла доходили до нас в расстеклованном состоянии, ведь их, как правило, плохо варили. К тому же с тех пор прошло более чем достаточно времени и они вполне успели закристаллизоваться. Правда, став непрочными, они не стали менее прекрасными. Как показал Марш, в некоторых стеклах, даже самых свежих, расстекловывание происходит с самого начала. Ему удалось сфотографировать на электронном микроскопе крошечные кристаллики и показать, что усадка в ходе их образования достаточна, чтобы зародилась трещина, бегущая затем по всему куску стекла (рис. 21). Надо подчеркнуть, что стекло в тонких волокнах от обычного стекла ничем особенно не отличается. Если поверхность толстого стекла сделать гладкой и постараться сохранить ее в таком виде, то по прочности это стекло не уступит тонкому волокну. Однако добиться этого на практике обычно очень трудно.

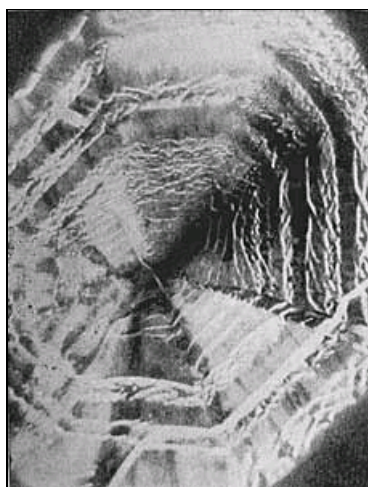


Рис. 21. Рост клиновидного кристалла в стекле.

Если в стеклоподобном аморфном материале трещина, берущая начало от того или иного местного дефекта, не распространяется, то почему же и каким образом он все-таки разрушается? В таких случаях материал, подобно пластилину, течет и разрушается от сдвига. Поскольку стекло начинает течь при комнатной температуре лишь под действием очень большого напряжения и к тому же оно легко разрушается от распространения трещины, постольку оно, как и другие аморфные материалы, практически всегда разрушается хрупким образом. Мы к этому привыкли, и нам трудно представить себе, что они могут разрушаться иначе. На самом же деле, если растрескивание стекла, которое происходит при растяжении, предотвратить, например, путем всестороннего его сжатия, то в этом случае стекло можно заставить течь, как текут пластичные материалы. Стекло, когда на него оказывают давление притупленной алмазной иглой (индентором), ведет себя подобно замазке, но ведь касательное напряжение, необходимое для течения, гораздо выше наблюдаемой прочности. В обычных стеклах оно превышает при комнатной температуре 350 кг/мм^2 .

Совсем недавно Марш показал, что стекло, если в нем почти отсутствуют трещины, действительно течет. При комнатной температуре напряжение течения в стекле обычно превосходит 350 кг/мм^2 . Интересно, что температура сравнительно слабо влияет на тенденцию к разрушению стекла путем распространения трещин, в то время как касательное напряжение течения сильно зависит от температуры. Когда мы нагреваем стекло, не доводя его до плавления, напряжение течения снижается быстрее, чем напряжение хрупкого разрушения. Именно поэтому нагретое стекло (не обязательно очень горячее) довольно легко гнется, формуется и поддается выдуванию. Наоборот, свободное от дефектов стекло становится прочнее при охлаждении, так как при этом повышается его сопротивление течению. Из-за этого стекло с хорошей поверхностью при температуре -180°C по своей прочности примерно в два раза превосходит то же стекло при комнатной температуре.

Обобщая все сказанное выше, можно заключить, что всегда существуют два механизма, ведущих спор за право разрушить материал, - пластическое течение и хрупкое растрескивание. Материал уступает тому или другому из них. Если он начинает течь, прежде чем растрескается, то, значит, он пластичен. Если же он растрескивается до того, как начал течь, то мы имеем дело с хрупким материалом. Потенциальные возможности обоих видов разрушения заложены во всех материалах.

Прочность хрупких кристаллов и рассказ об усах Все, что мы говорили, довольно хорошо объясняет прочность стекол и таких аморфных минералов, как кремний или вулканическая лава обсидиан. Но подавляющее большинство твердых тел, природных и искусственных, имеет кристаллическую структуру. Существует своего рода предрассудок, что кристаллические материалы не могут быть прочными. Так, слесарь, обнаружив сломанный коленчатый вал или какую-либо другую деталь автомобиля, может сказать, что "она кристаллизовалась". В каком состоянии была эта деталь до "кристаллизации", он не объяснит, ясно, что она не была аморфной. Нет нужды повторять, что все металлы, почти все минералы, большинство керамических материалов и привычные нам сахар и соль - вещества кристаллические. Соображения здравого смысла вряд ли приведут к заключению, что только регулярная упорядоченная упаковка атомов или молекул может быть причиной малой прочности твердого тела. И действительно, это не так.

Однако, когда мы имеем дело с твердыми хрупкими кристаллами, на практике их прочность оказывается даже ниже, чем прочность монолитного стекла, и в своем "сыром" виде неметаллические кристаллы вполне заслуживают того презрения, с которым к ним относятся инженеры.

Теперь самое время поговорить об "усах". Мы часто слышим о "металлических усах", как если бы они были единственным типом усов. На самом же деле эти усы менее обычны и менее интересны, чем неметаллические, поэтому мы будем говорить главным образом о последних. Усы, о которых пойдет речь, не имеют ничего общего с человеческим волосом и представляют собой длинные тонкие игловидные кристаллы, которые могут быть случайно или преднамеренно выращены из большинства веществ. Существует много способов их выращивания. Толщина усов обычно составляет 1–2 мкм, хотя их длина может измеряться миллиметрами и даже сантиметрами.



Рис. 22. Усы, растущие на металлической поверхности

Иногда усы вырастают случайно на металлических поверхностях (рис. 22), и, когда эта поверхность оказывается элементом электрической схемы, вполне возможно короткое замыкание, которое иногда оказывается досадным, иногда дорогостоящим, а порой и опасным, смотря по обстоятельствам. Такого рода металлические усы были известны довольно давно, но к ним относились разве что с некоторым любопытством, когда к этому не примешивалось чувство досады. Так продолжалось до 1952 года, когда Херрину и Голту случилось изогнуть несколько оловянных усов. Они заметили при

этом, что при деформации ~2% усы остаются упругими. Такая упругая деформация соответствовала напряжению, которым никто никогда не нагружал не только олово, но и, возможно, никакой другой металл. Это было похоже на поведение тонких волокон с аномально высокой прочностью, что, естественно, привлекло к себе огромное внимание.

Херринг и Голт работали с оловом. Олово - металл, а от металла каждый почему-то ожидает прочности. Меня же в то время занимал вопрос, можно ли сделать прочными и обычно слабые неметаллические кристаллы. И вот однажды, это было в 1954 году, я зашел на склад химических реактивов и попросил дать мне что-нибудь такое, что растворялось бы в воде, а кристаллизовалось бы в виде игл. Кладовщик дал мне бутылку с гидрохиноном, веществом, которое обычно используется в фотографических проявителях. Бутылка была полна сухих кристаллов толщиной примерно в обычную иглу и около сантиметра длиной. Опирируя скальпелем, я быстро понял, что их прочность пренебрежимо мала. Затем я растворил несколько гидрохиноновых кристаллов в воде, нанес каплю этого раствора на предметное стекло микроскопа и стал ждать, когда вода испарится. В процессе испарения в поле зрения микроскопа вырастали игольчатые кристаллики, которые были намного меньше растворенных мною.

Новые кристаллы имели нитевидную форму. Вначале они были так тонки, что их едва можно было различить в оптический микроскоп. Пошевелив их иглой, я обнаружил, что эти маленькие нити очень прочны, но установить точно, насколько они прочны, - было очень непросто (рис. 23).

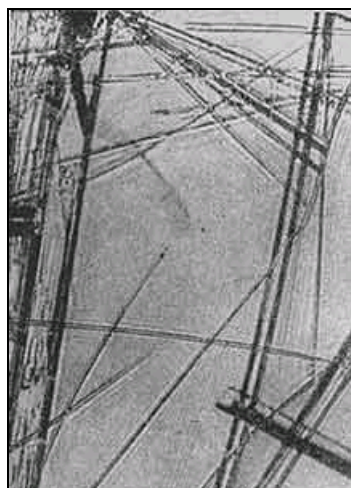


Рис. 23. Нитевидные кристаллы, или усы гидрохинона, растущие из водного раствора. Обратите внимание на неясное изображение - это ус, который освободился от мешающих ему механических ограничений и выпрямляется (параллельные полосы вызваны дифракцией - это моя оплошность!) (г100).

Это меня взволновало, и очень скоро я начал пробовать кристаллы разных веществ, взятых с полок собственной лаборатории и лабораторий своих коллег. Некоторых навыков и минимальной хитрости было достаточно, чтобы получить в виде очень тонких нитей - усов кристаллы почти любого растворимого твердого вещества. В ход пошли горькая соль и даже хлористый натрий, обычная поваренная соль. И во всех случаях усы оказывались прочными. Можно было предположить, что их прочность как-то связана с влажностью их поверхности. В 20-е годы русский ученый А.Ф. Иоффе обнаружил, что некоторые вещества после смачивания становились прочнее. Правда, есть и такие вещества, которые при этом, наоборот, разупрочняются. Однако, насколько я мог определить, высушивание усов не сказывалось заметно на их прочности.

На этой стадии работы было много трудностей. Например, мы не имели достаточно надежных методов измерения прочности усов.

Обычно мы изгибали усы под микроскопом с помощью игл; измерив приблизительно толщину и радиус кривизны, можно было определить деформацию при разрушении с помощью простой теории изгиба балок. Можно себе представить, сколь дьявольски неудобен и неточен был этот метод.

Усы обычно зарождались в виде чрезвычайно тонких нитей, которые затем становились толще. Заметив это, я усовершенствовал методику изгиба: при зарождении уса я начинал взбалтывать воду и затем оставлял усы утолщаться до тех пор, пока они не ломались. Это была менее грубая методика, но все еще весьма неудовлетворительная.

Как раз в это время (1956 год) ко мне пришел работать Дэвид Марш и буквально первыми его словами были: "Почему бы не сделать подходящую разрывную машину?" Кажется, я без обиняков прогнал его, посоветовав не заниматься глупостями. Усы были слишком малы, чтобы рассмотреть их невооруженным глазом, мне представлялось, что нельзя сделать испытательную машину для столь крошечных образцов. Марш ушел и занялся отнюдь не глупостями: он возвратился с микроиспытательной машиной, которая на удивление всем... работала. Сконструировал и построил он ее сам. Один из вариантов машины Марша (Марк-III) пошел в серийное производство, и сегодня, пожалуй, не найдется ни одной уважающей себя лаборатории, которая бы ее не имела. На этой замечательной машине можно при необходимости испытывать волокна с поперечным сечением $0,1 \text{ мкм}^2$ (по существу их не видно в оптический микроскоп) и длиной около четверти миллиметра. Она способна измерять удлинения менее чем 5 А, что соответствует примерно разрешению хорошего электронного микроскопа.

* Конструкция и принцип действия этой машины описаны в *Journal of Scientific Instruments*, 1961, 38, pp. 229–234.

Располагая таким устройством, мы могли уже получить вполне реальные результаты. С самого начала мы обнаружили, что высокая прочность может быть получена почти на всех кристаллах, от горькой соли до сапфира, лишь бы кристалл имел форму тонкого уса. В этом случае не имели значения ни химическая природа кристалла, ни метод, которым он был выращен. Мы испробовали, должно быть, сотню различных веществ, так что никаких сомнений относительно этого не оставалось.

Построив график зависимости прочности уса от его толщины, мы обратили внимание на то, что кривая для каждого данного типа усов была чертовски похожа на аналогичную кривую для стеклянных волокон (глава 2). Более того, когда мы посмотрели на зависимость от толщины не прочности, а деформации при разрушении, то обнаружили, что все точки для всех испытанных усов лежат на одной и той же кривой. Так, на рис. 24, например, показана зависимость деформации при разрыве от толщины усов двух резко различающихся веществ - кремния и окиси цинка. Разделить эти кривые невозможно.

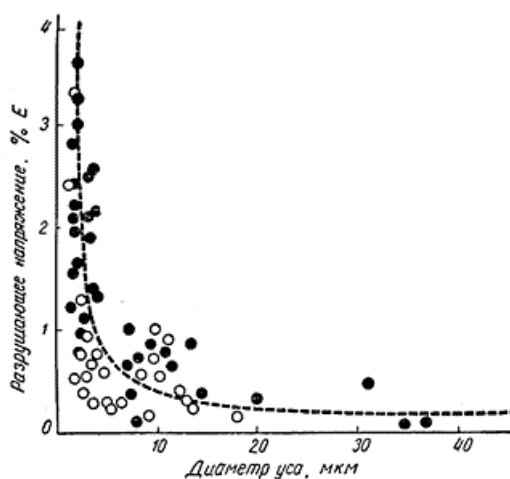
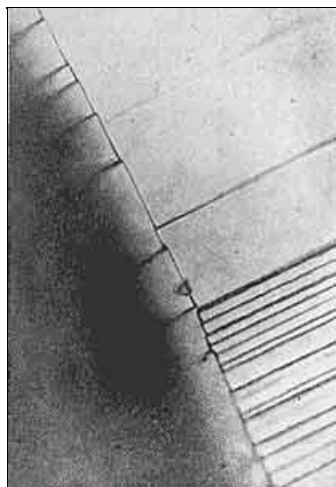


Рис. 24. Зависимость прочности усов от их толщины. Белый кружок - усы кремния; черный - усы окиси цинка.

Конечно, велик был соблазн считать, что прочность и разрушение усов - а потому, быть может, других кристаллов - определяется поверхностными трещинами, как и в случае стекла. Однако каких-либо трещин мы не обнаружили, и были все основания полагать, что их просто не должно существовать. Когда ус вырастает из раствора или паров, то обычно вначале появляется очень тонкая нить, которая в электронном микроскопе кажется почти идеально гладкой. Затем эта нить утолщается, на нее как бы натягивается сверху новый слой материала.

Поначалу эти слои могут быть моноатомными или мономолекулярными, но, конечно, различные слои нового материала будут подпитываться атомами из окружающей среды с несколько различными скоростями. Тогда слой, который захватывает атомы быстрее, будет расти вдоль оси кристалла с большей скоростью и может настигнуть нижний слой, растущий медленнее. Однако обогнать его он не может, и тогда образуется ступенька, имеющая двойную высоту. Она будет требовать двойного количества материала для своего роста, чтобы продвигаться с той же скоростью, что и остальные слои. В действительности, однако, скорость подвода материала путем диффузии остается примерно той же, что и для единичных слоев. Следовательно, двойной слой движется со скоростью, меньшей чем средняя, и постепенно все больше растущих слоев нагромождаются вслед за ним и не могут его обогнать. Образуется серия обрывистых ступенек (рис. 25). В среднем эти ступеньки будут тем выше, чем "старше" и, следовательно, толще кристалл. Когда рост кристалла прекращается, эти ступеньки остаются на поверхности и их можно видеть в микроскоп.



Интуиция подсказывает, что трещина - штука скверная, но далеко не очевидно, что и ступенька может вызвать вредную концентрацию напряжений. Готовых теоретических решений задачи о поведении ступенек в литературе не было, и я попросил Марша заняться изучением этого вопроса. Методом фотоупругости, работая на прозрачных моделях в поляризованном свете, Марш смог доказать, что ступенька так же вредна, как и эквивалентная ей трещина. По существу ее можно рассматривать как половину трещины. Экспериментальный результат Марша был затем математически подтвержден Коксом.

Хотя эта работа была выполнена для объяснения прочности крошечных кристалликов, полезно обратить на нее внимание инженеров, которые, опасаясь трещин, порой легкомысленно относятся к ступенькам в машинах и конструкциях. Заметим, что в случае ступенек, как это было и с трещинами, концентрация напряжений определяется не абсолютным размером дефекта, а отношением глубины к радиусу основания дефекта.

Изучив под электронным микроскопом серию усов, Марш нашел, что для исследованных им веществ радиус основания ступеней роста был практически постоянным и составлял примерно 40 Å. Затем он сравнил высоту наиболее опасных ступенек с измеренной прочностью усов. Связь была налицо и не оставляла места сомнениям относительно объяснения масштабного эффекта на усах. Так как большие усы ничем, кроме размеров, не отличаются от других типов кристаллов, это должно было послужить общим объяснением прочности и разрушения хрупких кристаллов.

Дэш своими опытами показал, что поведение усов в этом смысле не отличается от поведения больших кристаллов. Он взял большой (2 см) кристалл кремния, который в обычных условиях особой прочностью не отличается, и очень тщательно его отполировал. Заключив этот кристалл в прозрачную коробку, снабженную механизмом изгиба, Дэш регулярно появлялся с ним на разного рода конференциях и демонстрировал свой опыт всем и каждому: кристалл мог изгибаться без разрушения до деформации 2%, что соответствует напряжению 450 кг/мм^2 - цифра очень внушительная.

Когда мы обращаемся к более распространенным кристаллическим материалам, в цепи наших рассуждений появляется еще одно звено. Можно, конечно, действуя подобно Дэшу, получить довольно большой монокристалл, но, как правило, каждый отдельный кристалл в наших обычных материалах достаточно мал. Усы - это все-таки исключительные по своим свойствам малые монокристаллы. Обычно же твердые тела больших размеров являются поликристаллами: можно сказать, что они собраны из большого числа малых кристалликов, примыкающих друг к другу в трех измерениях, подобно булыжникам мостовой или областям на географической карте. Форма отдельных кристаллов может быть весьма неправильной, они примыкают один к другому по границам обычно очень плотно, в чистых материалах контакт на молекулярном уровне достаточно хороший. Вообще говоря, поверхностная энергия этих границ выше, чем энергия поверхностей разрушения в кристаллах, и поэтому в достаточно чистых материалах "границы зерен" не являются источником низкой прочности.

Другое дело - материалы с большой концентрацией примесей. Хорошо известно, что, когда жидкость замерзает, в процессе кристаллизации растущие кристаллы стремятся изгнать из своего объема примеси. Например, лед, образовавшийся из соленой воды, при таянии дает достаточно пресную воду (что очень удобно для полярников). Этот процесс приводит к тому, что примеси в твердых телах накапливаются по границам зерен. Здесь же собираются и вакансии, то есть поры атомных размеров. Все это может превратить границы зерен в поверхности разрушения. Именно из-за этого небольшая добавка неподходящей примеси может разрушить сплав. Иногда понижение прочности дает положительный эффект. Рассмотрим, например, что дает добавление антифриза к воде, охлаждающей двигатель автомобиля. Основной смысл этой операции состоит в том, что гликоль, существенно понижая точку замерзания полученной смеси, оттягивает неприятности, но, если все-таки смесь замерзнет, лед получается пористым, лишенным механической прочности и вряд ли способен сильно навредить машине.

Однако для большинства достаточно чистых кристаллических тел границы зерен довольно прочны и поведение твердых хрупких материалов можно сравнить с поведением усов и других монокристаллов, а последнее, как мы видели, очень

похоже на поведение стекла. В обоих случаях проблема прочности и разрушения почти исключительно связана с гладкостью поверхности. Для стекла определяющим дефектом обычно является поверхностная трещина, для хрупких кристаллов - ступенька на поверхности. Наличие внутренних дефектов в хрупком кристалле имеет меньшее значение.

Как мы увидим дальше, для пластичного мягкого материала существует совершенно другая проблема.

Дислокации и пластичность

Вещества, с которыми мы имели дело до сих пор, считаются в технике хрупкими. Это не значит, конечно, что они рассыпаются на куски при первом же прикосновении. Нет, мы уже видели, что некоторые из них очень прочны. Абсолютного деления на хрупкие и пластичные вещества нет, но, вообще говоря, хрупкие тела имеют достаточно хорошо определенные свойства. Если не считать небольших упругих изменений, которые исчезают после снятия нагрузки, хрупкие тела не деформируются перед разрушением, и причиной их разрушения является то, что одна или несколько трещин пробегают через весь материал. Обломки хрупких тел после разрушения можно очень хорошо подогнать друг к другу; например, можно довольно искусно склеить разбитую вазу. В пластичных материалах, например в мягкой стали, перед разрушением наблюдаются большие необратимые искажения формы, так что из получившихся после разрушения кусков нельзя уже сложить первоначальный предмет.

Хрупкие вещества, которыми мы пользуемся в повседневной жизни, - стекло, фаянс, кирпич, бетон, некоторые пластмассы - вполне удовлетворяют нас. Однако для изготовления различного рода машин мы обычно предпочитаем пластичные металлы. Хрупкие тела разрушаются путем полного разделения двух соседних слоев атомов или молекул под растягивающим напряжением, остальной объем материала при этом не нарушается. Поведение металла напоминает в чем-то поведение пластилина. Еще до разрушения, то есть до разделения образца на две части, в объеме материала развивается интенсивное течение, подобное течению вязкой жидкости. В это время соседние атомные слои, не разделяясь, сдвигаются друг относительно друга подобно колоде карт.

После того как соседние слои атомов проскользнут на достаточное расстояние и материал окажется деформированным этим сдвигом, прочность, как правило, не снижается, так как взамен разорванных связей атомы могут завязать новые с другими партнерами. В некоторых случаях материалы после такого процесса даже упрочняются (это называется нагартовкой или наклепом). Однако, если процесс зашел слишком далеко, материал ослабнет и в конце концов разрушится. Величина наклепа и удлинение,

которые может выдержать пластичный материал, сильно колеблются от металла к металлу, от сплава к сплаву. Почти всегда с нагревом эти величины возрастают. Что и говорить, способность металлов пластически деформироваться и, следовательно, получать заданную форму в холодном и нагретом состояниях является их огромным достоинством. Кроме того, пластичность вносит свой вклад в сопротивление металлов трещине (см. главу 8). Однако она же является и главной причиной их сравнительно низкой прочности. Мы уже говорили, что если образец не разрушается хрупким образом из-за наличия трещины под определенным углом к направлению растяжения, то он может разрушиться путем "соскальзывания" под углом 45° к оси (рис. 26) и, если для такого процесса потребуется меньшая сила, его ничто не остановит.

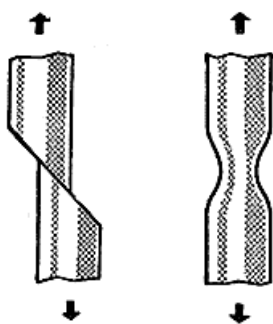


Рис. 26. Вязкое разрушение при растяжении.

Недавно А. Келли показал, что точный расчет сопротивления твердого тела сдвигу достаточно сложен и от вещества к веществу сопротивление это сильно изменяется. Однако мы можем получить приближенное значение теоретической прочности на сдвиг с помощью очень простой модели, и результат не будет грубым. Рассмотрим модель - на бумаге или в натуре, - которая состоит из слоев шариков, представляющих атомы. Существуют такие взаимные расположения слоев, при которых они лежат наиболее близко друг к другу. Чтобы вывести их из такого положения, необходимо немного оттянуть слой от слоя. Такому движению сопротивляются растягиваемые связи: шарики-атомы против того, чтобы покинуть комфортабельные ямки минимальной энергии.

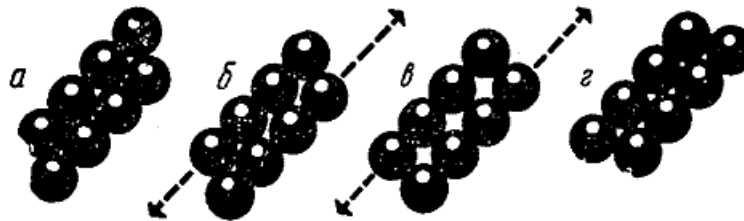


Рис. 27. Схематическое изображение сдвига, происходящего путем скольжения целой плоскости атомов без помощи дислокационных механизмов.

На рис. 27 изображена двумерная модель - два параллельных ряда монет, лежащих на столе. Ясно, что последнее сопротивление сдвигу исчезает в момент, когда атомы-монеты балансируют на вершинах друг у друга; такое положение создается в момент, когда слой оказывается сдвинутым относительно другого слоя на угол 30° . Пройдя эту точку, атомы будут сваливаться в положение равновесия на дне следующей ямы, и сдвиг на одно межатомное расстояние будет завершен. Сопротивление сдвигу началось с нуля, возросло до некоторого максимума, затем снова упало до нуля, когда атомы оказались на вершинах. Сопротивление будет максимальным примерно на полпути к вершине, в нашем случае это соответствует углу сдвига около 15° . Трехмерный случай будет немного более сложным, для него максимум наступает при 10° . Для кристаллов, которые состоят из атомов различных размеров, этот угол может быть еще меньше.

Очень грубые вычисления, основанные на этой модели, дают величину теоретической прочности на сдвиг порядка 10% от модуля упругости E . (Более сложный расчет, проведенный А. Келли, дает 5–10% от E .) Впрочем, не слишком большая точность этих чисел особого значения не имеет: при обычных испытаниях реальных материалов мы достигаем их весьма редко*. Теоретическое значение прочности на сдвиг для железа составляет около 1200 кг/мм^2 , но практически кристалл очень чистого железа сдвигается при напряжениях, лежащих между 1,5 и $8,0 \text{ кг/мм}^2$, для рядовых сталей прочность на сдвиг составляет $15\text{--}25 \text{ кг/мм}^2$, для самых прочных сталей - около 150 кг/мм^2 .

* Заметим, что теоретическая прочность на сдвиг, вообще говоря, ниже, чем прочность на разрыв. Поэтому, если образцы, близкие к совершенным, могут достичь очень высоких напряжений, они разрушаются преимущественно путем сдвига. Это мы видели в случае стекла.

Очень мягкие металлы, например чистые золото, серебро, свинец, можно испытывать на сдвиг руками. После сильного наклепа сопротивление сдвигу несколько повышается, но оно никогда не приближается к теоретической величине. Широко известнаковка металла, которая делает его более твердым: таким путем повышали твердость кромок еще медного и бронзового оружия, а в старину часовых дел мастера всегда обрабатывали так латунные заготовки шестеренок. (Если вы воздержитесь от смазки шестеренок старинных напольных часов, то зубья их не только перестанут собирать пыль и быстро истираться, но с течением времени будут становиться тверже и полироваться, и так будет продолжаться века.)

Вплоть до 1934 года общепринятое объяснение всех этих явлений было крайне неубедительным и походило на желание уйти от вопроса. Вот оно: "Скольжение происходит вследствие того, что малые кусочки кристалла, обламываясь, работают как подшипники качения. Когда их становится слишком много, они начинают мять друг друга, и это является причиной наклепа". Как говорил герцог Веллингтон, "если вы верите в это, вы можете поверить во что угодно".

В 1934 году Дж. Тэйлор из Кэмбриджа, который изобрел лемешный якорь, придумал также дислокацию. По крайней мере, он "посадил" дислокацию в научную статью как гипотезу. Основная идея была чрезвычайно проста, настолько проста, что не могла быть ошибочной. И она в самом деле оказалась верной.

Почти невероятно, рассуждал Тэйлор, что металлические кристаллы в действительности так совершенны, как мы о них думаем, когда вычисляем их прочность. Давайте предположим, что во всем объеме кристалла, быть может, через каждый миллион атомов или что-нибудь около этого, встречаются небольшие неправильности. При этом нас интересуют не точечные искажения, такие, как чужеродные атомы, которые могут обеспечить движение отдельных точек, а линейные дефекты, которые позволят продвинуться вперед целым армиям атомов на широком фронте.

Кристалл состоит из слоев, или плоскостей атомов, которые показались бы наблюдателю, уменьшенному до размеров электрона, громоздящимися в ужасающей бесконечной регулярности, подобно страницам какой-то громадной книги. Предположение Тэйлора заключалось в том, что кое-где слой атомов оказывается незавершенным, как если бы кто-то вставил лишний лист бумаги между страницами книги и теперь она в одних местах состоит, положим, из миллиона страниц, а в других - из миллиона и одной страницы. Самые интересные явления разыгрываются, конечно, вдоль линии, где лишний слой атомов подходит к концу, на кромке "лишней" плоскости. Посмотрев на рис. 28, а, мы увидим, что должны быть две области, по обе стороны от кромки экстраплоскости, где атомы сдвинуты на угол, примерно соответствующий теоретической прочности кристалла на сдвиг. Другими словами, в этих зонах кристалл практически разрушен.

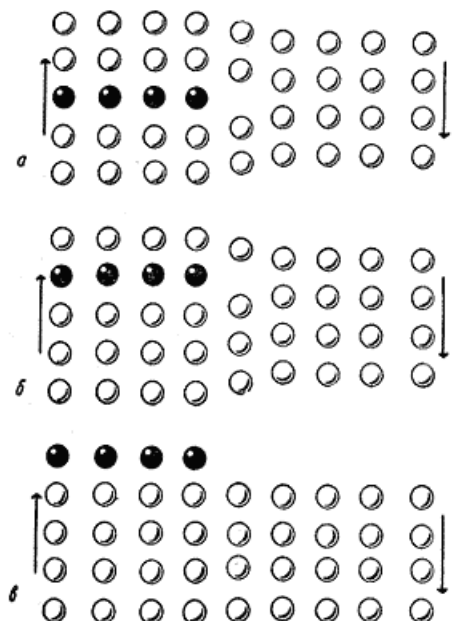


Рис. 28. Схематическое изображение сдвига, происходящего с помощью краевой дислокации. Черные атомы, конечно, не обозначают те же самые атомы в каждой из схем. Они лишь показывают положение "лишней" атомной плоскости. Когда дислокация движется, ни один из атомов не смещается со своего исходного положения более чем на долю ангстрема.

Но еще более важно то, что дислокации оказываются подвижными. Если мы приложим небольшую сдвиговую нагрузку к кристаллу, то обнаружим, что необходима лишь малая добавочная деформация, чтобы разорвать всю линию сильно натянутых связей. Но затем мы обнаружим (рис. 28, б), что в результате вся расстановка оказалась всего лишь смещенной на одно межатомное расстояние. Продолжая нагружать кристалл, мы будем вновь и вновь повторять этот процесс и в конце концов вытолкнем дислокацию на поверхность кристалла (рис. 28, в). А сила, необходимая для этого, может быть очень малой.

Инженеры-механики и некоторые металловеды встретили идею Тэйлора в штыки, даже сейчас еще кое-кто из них издает глухое рычание. Однако физики академического толка с ликованием набросились на дислокации. Позже еще многие годы дислокаций, как таковых, никто не видел и, быть может, не ожидал когда-либо увидеть; но их гипотетические движения (дислокации одного знака отталкиваются друг от друга и т.д.) и правила размножения (когда союз двух дислокаций освящен внезапным появлением в кристалле пяти сотен новых дислокаций) могли быть теоретически предсказаны, они давали превосходную пищу уму, были чем-то вроде трехмерных шахмат.

Нужно сказать, почти все эти академические предсказания сбылись. Вначале Тэйлор предполагал, что скольжение в пластичных кристаллах обеспечивается теми дислокациями, которые с самого начала присутствуют в кристалле благодаря случайностям неидеального роста. Затем оказалось, что обычно для интенсивного скольжения, которое происходит в пластичных материалах, этих дислокаций не хватает. Большие семейства новых дислокаций могут, однако, генерироваться либо вследствие дислокационных взаимодействий (источник Франка-Рида), либо на резких концентраторах напряжений, например на кончиках трещин. Последний случай встречается чаще. Таким образом напряженный металл может быстро напиться дислокациями (около 10^8 на квадратный сантиметр) и легко обеспечить себе течение под постоянной нагрузкой либо стать послушным кузнечному молоту.

Напомним, что дислокация - это существенно линейный дефект, который может довольно легко перемещаться в кристалле. Если дислокаций много, им не надо совершать далекие путешествия, дабы встретить другие дислокации. Результаты встречи бывают различными: например, могут образоваться новые дислокации, а чаще сближающиеся дислокации взаимно отталкиваются. 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 хрестоматийный пример: если надо сломать проволоку или кусок жести, то их следует несколько раз согнуть взад-вперед. Сперва металл деформируется легко, затем немного упрочняется и, наконец, ломается хрупким образом.

Металл, упрочненный деформацией, может быть возвращен в исходное мягкое состояние путем отжига, то есть нагревом его до полной или частичной рекристаллизации, при этом большинство избыточных дислокаций исчезает. Так, медные трубы следует отжигать после гибки, в противном случае они будут хрупкими.

Ю.Н. Работнов. Предисловие

Введение. Новая наука о прочных материалах, или как задавать трудные вопросы

Часть I. Упругость и теория прочности

Глава 1. Напряжения и деформации, *или* почему мы не проваливаемся сквозь пол

Глава 2. Внутреннее сцепление, *или* насколько прочными должны быть материалы

Глава 3. Трещины и дислокации, *или* почему столь мала фактическая прочность материалов

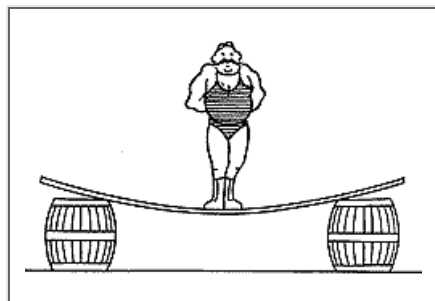
Часть II. Неметаллы

Часть III. Металлы

Приложение I. О различных типах твердого тела, *или* кое-что о патоке

Приложение II. Простые формулы теории балок, *или* как сделать расчет на прочность

Сетевая публикация подготовлена учениками московской гимназии № 1543 Олегом Борисенко и Дмитрием Бегизовым



Дж. Гордон

Почему мы не проваливаемся СКВОЗЬ ПОЛ

Перевод с английского С.Т. Милейко
Опубликовано издательством "Мир", Москва, 1971

Часть II. НЕМЕТАЛЛЫ

Глава 4. Торможение трещины, или как обеспечить вязкость

Ударная прочность

Критерий Гриффитса и критическая длина трещины

Вязкость неметаллических материалов

Поверхность раздела как тормоз для трещин

Глава 5. Древесина и целлюлоза, или о деревянных кораблях и железных людях

Рост растения

Свойства древесины

Разбухание

Выдержка древесины

Разложение древесины

Деревянные суда

Глава 6. Клей и фанера, или слюда в планерах

Клей

Слоистая древесина и фанера

Аэропланы

Глава 7. Композиционные материалы, или как делать кирпичи с соломой

Папье-маше

Пресс-порошки

Слоистые материалы с целлюлозными волокнами

Стеклопластики

Армированный бетон

Глава 4

ТОРМОЖЕНИЕ ТРЕЩИНЫ, или КАК ОБЕСПЕЧИТЬ ВЯЗКОСТЬ

Плиний старший (23-79 гг. н.э.) в своей весьма путаной "Естественной истории" указывает способ, с помощью которого можно отличить неподдельный алмаз. Он советует положить предполагаемый алмаз на наковальню и ударить его тяжелым молотом как можно сильнее. Если камень не выдержит, он не настоящий алмаз. Надо думать, так 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 состоит его главное применение в технике. Но алмаз, как и другие твердые драгоценные камни, довольно хрупок; и если бы даже его добывали большими кусками и в больших количествах, широко распространенным конструкционным материалом он бы не был.

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, кости, зубы, одежда, канаты, нефрит - вязки. Большинство минералов, стекла, посудная керамика, канифоль, бакелит, бетон, печенье - хрупки. Хрупким можно назвать и обычное желе, это легко проверить за столом, наблюдая, как распространяются в нем трещины от ложки или

вилки. Вещества, которые мы перечислили в каждом из списков, имеют довольно мало общего, вот почему не так просто выявить то, что делает одни вещи 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 пен появится небольшая вмятина. Прочность на разрыв обычных стекол и керамик может быть довольно большой, но никому не придет в голову делать из них, например, автомобиль. Причина ясна - очень уж они хрупки. Здравый смысл подсказывает это каждому из нас. Но почему? Что же такое хрупкость на самом деле?

Прежде всего, скорость нагружения - далеко не главное, что определяет хрупкость. Психологически существует большая разница между статической нагрузкой, которая прикладывается медленно, и динамической мгновенно приложенной ударной нагрузкой. Разница существует и на самом деле, и ею нельзя пренебречь, но она далеко не так важна, как это может показаться с первого взгляда. Мы стучим молотком не потому, что нам нужны удары сами по себе, а потому, что удар тяжелого молотка - очень удобный и дешевый путь получения большой локальной силы. Если бы мы приложили такую же по величине силу медленно, то, как правило, получили бы примерно тот же конечный результат. Это справедливо и в тех случаях, когда мы рассматриваем падение предметов на пол, автомобильные аварии, крушения самолетов, хотя в дальнейшем в этих явлениях мы увидим некоторые важные особенности. Однако 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.

Мы уже говорили, что в каком-то смысле нет существенной разницы между механически нагруженным материалом и взрывчаткой. Энергия деформации упругого тела накапливается в натянутых химических связях, а при разрушении тела эта энергия освобождается. Если достигнута теоретическая величина деформации разрыва, все связи оказываются максимально натянутыми, и мы должны считать, что энергия деформации примерно равна энергии химических связей в материале. На практике, однако, материалы обычно разрушаются, не достигнув и малой толики теоретической прочности, так что освобожденная энергия при этом намного меньше, чем энергия, даваемая эквивалентным количеством взрывчатки. И все-таки разрушение может сопровождаться вполне ощутимым хлопком. Наблюдение за тем, как разрываются особо прочные волокна или усы (например, в машине Марша), убедительно показывает, что их прочность составляет значительную долю теоретической. В этом случае после разрыва не найдешь, как обычно, кусков образца: после взрывообразного разрушения волокно исчезает, оставляя лишь мелкую пыль. Такие испытания не опасны лишь потому, что прочные волокна, как правило, очень малы.

Ударная прочность

Здесь уместно прервать наш разговор об общей проблеме распространения трещины и поговорить о некоторых особых эффектах, которые возникают при динамических, ударных нагрузках. Сначала напомним, что максимальная скорость, с которой может передаваться нагрузка через любое вещество, равна скорости звука в этом веществе. В самом деле, звук можно представить себе как волну или серию волн напряжений, проходящих через среду с характерной скоростью.

Скорость звука в веществе равна $(E/\rho)^{1/2}$, где E - модуль Юнга, а ρ - плотность данного вещества. Взяв обычные числовые значения величин E и ρ для конструкционных материалов, мы увидим, что скорость звука в этих материалах будет очень большой. Для стали, алюминия и стекла она составит около 18000-20000 км/час (~5000 м/сек), что значительно превышает скорость звука в воздухе. Это также намного больше скорости удара молотка и значительно больше скорости полета пули.

Время, в течение которого молоток или пуля действуют с какой-то силой на твердое тело, составляет около сотой доли секунды. А это очень долгое время: фотолюбители знают, как много всего может совершиться за одну сотую. Точно так же и в нашем случае сотая доля секунды намного больше времени, потребного для отвода энергии от точки удара. От этой точки при ударе излучается целая серия волн напряжений, которые распространяются по всему объему тела. Очень быстро, за время, скажем, около нескольких десятитысячных или сотысячных долей секунды, эти волны достигают противоположных границ тела и отражаются от них подобно эху, лишь очень немного уменьшаясь в интенсивности. Дальнейший ход событий определяется многими факторами, в том числе формой тела, местом удара и т.д. Очень может статься, что отраженные волны напряжений постоянно будут встречать в некоторой критической или "несчастливой" точке прямые волны, идущие от места удара, и это нагромождение вызовет прогрессирующий рост напряжения в этой точке вплоть до разрушения. Рассказы о певцах, от голоса которых вылетали стекла в окнах, не так уж и фантастичны.

Можно привести интересные примеры поведения твердых тел под ударной нагрузкой. Например, при исследовании керамик повседневно проводятся ударные испытания керамических пластинок - свободно опертая квадратная пластинка подвергается удару заданной силы по центру верхней поверхности. Во многих случаях пластинка разрушается не в точке удара. Часто случается, что отваливаются четыре угла пластинки, потому что волны напряжений сталкиваются именно в углах.

Иногда случается, что, попав в броню, снаряд не пробивает ее, но от внутренней поверхности броневой плиты отлетает рваный кусок металла, осколок. Скорость и энергия этого осколка могут быть огромными, и разрушения, причиненные им внутри, например, танковой башни, оказываются такими же, как если бы снаряд действительно пробил броню.

Подобным же образом, когда снаряд или пуля попадает в бак с жидкостью, например в топливный бак самолета, выходное отверстие получается намного большим, и заделать его значительно труднее - ударные волны легко распространяются через жидкость и вырывают кусок в задней части бака. Голова человека конструктивно напоминает бак с жидкостью, и последствия попадания пули в нее, к сожалению, слишком хорошо известны. Менее известно, однако, что аналогичные события могут последовать за тупым ударом в лоб. При проектировании защитных касок заботятся о том, как погасить ударную волну и предохранить затылок при лобовом ударе. Этой цели и служит внутренняя лента в каске, которая на первый взгляд кажется необходимой лишь для вентиляции.

В технике вязкость материала определяется обычно путем ударных испытаний образца прямоугольного сечения размером 5-10 мм, часто снабженного стандартным надрезом. Образец закрепляют по концам, а затем разрушают тяжелым молотком в форме маятника. Измеряя разницу между высотой, с которой маятник падал на образец, и высотой, на которую он взлетел, разрушив его, определяют энергию, затраченную на разрушение. Строго говоря, это испытание почти ни о чем не говорит, но оно позволяет провести грубое сравнение различных материалов. Поэтому такие испытания очень популярны у инженеров.

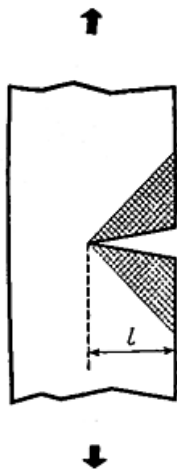
Критерий Гриффитса и критическая длина трещины

Вернемся теперь к вопросу о распространении трещины в твердом теле. В данном случае для нас не имеет значения, статическая или динамическая нагрузка разрушает тело. Вообще говоря, если в данной точке достигнуто разрушающее напряжение, то разрушение произойдет независимо от того, каким путем оно достигалось. Правда, существуют некоторые исключения: отдельные вещества, вроде вара или конфеты ириски, чувствительны к скорости нагружения. Даже дети знают, что самую неподатливую ириску легко разломить, ударив по ней чем-нибудь. Иногда удар приводит к успеху там, где бесполезны медленные приемы (глава 8). Обычно же материалы, как правило, меньше чувствуют разницу между динамическим и статическим нагружением.

Конечно, идеально было бы иметь материал, в котором зарождение трещин совершенно исключено. К сожалению, на практике такого, кажется, не бывает. Мы видели в предыдущей главе, что даже самая гладкая поверхность стекла испещрена мельчайшими невидимыми трещинами; более того, если бы удалось получить бездефектную поверхность, она вскоре стала бы дефектной из-за соприкосновений с другими телами. Следовательно, практически все определяется легкостью, с которой трещины распространяются в нагруженном материале. Основы теории распространения трещин были заложены все тем же Гриффитсом.

Гриффитс указал два условия, необходимых для распространения трещины. Во-первых, рост трещины должен быть энергетически выгодным процессом, и, во-вторых, должен работать молекулярный механизм, с помощью которого может осуществиться преобразование энергии. Первое условие требует, чтобы на любой стадии распространения трещины количество запасенной в теле энергии уменьшалось - подобно тому, как уменьшается потенциальная энергия автомобиля, спускающегося с горы. С другой стороны, и при энергетической выгоде автомобиль может спускаться с горы лишь в том случае, если у него есть колеса и их не держат тормоза. Колеса в этом случае служат механизмом, с помощью которого автомобиль скатывается с горы, они обеспечивают преобразование энергии.

Как мы уже говорили, деформированное тело "начинено" энергией, которая предпочла бы высвободиться. Так, поднятый вверх камень имеет потенциальную энергию и стремится упасть. Если материал полностью разрушен, энергия деформации его, естественно, полностью освобождена. Рассмотрим, однако, что происходит на промежуточных этапах процесса разрушения. Когда в деформированном теле появляется трещина, она слегка раскрывается и оба ее края расходятся на некоторое расстояние. Это означает, что материал, непосредственно примыкающий к краям трещины, релаксирует, напряжения и упругие деформации в нем уменьшаются, и упругая энергия освобождается. Давайте проследим за трещиной, начавшейся на поверхности тела и идущей в глубь нагруженного материала (рис. 29). Понятно, что область релаксировавшего материала будет приблизительно соответствовать двум заштрихованным треугольникам. Общая площадь этих треугольников будет примерно l^2 (l - длина трещины). Следовательно, количество освобожденной энергии должно быть пропорционально квадрату длины трещины, или глубины ее проникновения в тело. Расчеты подтверждают эту грубую оценку. Иными словами, трещина глубиной 2 микрона высвобождает в 4 раза больше упругой энергии, чем трещина глубиной в микрон, и т.д.



На другой чаше наших энергетических весов расположилась поверхностная энергия $2Gl$, которая необходима для образования двух новых поверхностей. Очевидно, эта энергия пропорциональна первой степени длины (или глубины) трещины. Величины поверхностной энергии двухмикронной и одномикронной трещин отличаются лишь в 2 раза, в то время как величины освобожденной энергии деформации - в 4 раза. Последствия такого взвешивания достаточно ясны. Мелкая трещина для своего роста должна больше потреблять поверхностной энергии, чем производить свободной энергии вследствие релаксации напряжений. Эти условия невыгодны для роста трещины. Однако, если исходная трещина достаточно велика, картина изменяется на противоположную: с ростом размеров величина освобожденной энергии увеличивается быстрее, она ведь зависит от квадрата длины трещины. Получается, что, если длина трещины превышает некоторую “критическую длину Гриффитса”, трещина производит больше энергии, чем потребляет. Тогда она может с громадной скоростью рвануться вперед, и процесс этот будет подобен взрыву. Для каждой величины напряжения в данном материале существует своя критическая длина Гриффитса. Для теоретически максимальной величины напряжения (теоретической прочности) критическая длина бесконечно мала, для материала, свободного от напряжений, она бесконечно велика - иного мы и не должны были ожидать. К сожалению, для тех напряжений, с которыми нам приходится обычно иметь дело, критическая длина трещины, как правило, очень мала, порядка нескольких микрон, и, конечно, она уменьшается, когда мы пытаемся увеличить напряжение. В этом заключается одна из трудностей, связанных с получением более прочных материалов.

Итак, при обычных уровнях нагрузений все трещины, за исключением самых мелких, имеют энергетический стимул к росту. Весь вопрос теперь в том, могут ли они расти. Иными словами, существует ли соответствующий механизм роста, то есть существует ли способ для реализации имеющейся энергетической выгоды, или преобразования одной формы энергии в другую? Гриффитсов баланс энергии, энергетическая выгода распространения трещины, длина которой превышает некоторую критическую величину, - явления совершенно общие для всех упругих тел. Но вот механизм преобразования энергии как раз и отличает вязкие материалы от хрупких.

Этим механизмом является концентрация напряжений. Как мы видели в [главе 3](#), концентрация напряжений на кончике трещины выражается приблизительно формулой

$$K = 2(l/R)^{1/2},$$

где l - длина трещины, идущей с поверхности, или полудлина внутренней эллиптической трещины, R - радиус ее кончика.

В типичном хрупком материале радиус кончика трещины R остается постоянным, он не зависит от длины трещины. Поэтому с ростом трещины концентрация напряжений становится опаснее. На практике R имеет величину, сравнимую с атомными размерами. Пусть R , скажем, 1 ангстрем. Тогда у кончика трещины длиной около микрона (10000 А) напряжение, равное теоретической прочности, появится уже при очень умеренных средних по объему напряжениях. А такого размера трещина обычно соответствует гриффитсовой критической длине. Следовательно, трещина может расти, начиная примерно с этой длины, причем, конечно, момент начала роста сильно зависит от приложенной нагрузки.

Но после того, как трещина двинулась вперед, ситуация обостряется. Концентрация напряжений увеличивается, баланс энергии все более и более склоняется в пользу развития трещины. Если внешняя нагрузка не снимается, рост трещины быстро ускоряется и вскоре достигает максимально возможной величины (обычно она составляет приблизительно 38% от скорости звука). Для стекла это около 6500 км/час (что и наблюдалось в эксперименте). Ну, а в это время волны напряжений гуляют, наверное, в материале во всех направлениях со скоростью звука (то есть быстрее, чем распространяются трещины), отражаясь как от старых, так и от вновь образовавшихся поверхностей, и дело закончится, вероятно, далеко не одной трещиной. Иными словами, материал разбивается вдребезги. Это оказывается возможным благодаря тому, что при больших напряжениях общая упругая энергия материала “заплатит” за образование множества новых поверхностей; в самом деле, при теоретической прочности она могла бы “рассчитаться” за разделение всего материала на слои толщиной в один атомный размер.

Совершенно хрупкие материалы вроде стекла достаточно надежны лишь при очень малых напряжениях. Стекло, например, можно использовать в витрине магазина, потому что в этом случае гриффитсова длина трещины достаточно велика и материал не боится небольших царапин или иных повреждений поверхности. Но если мы хотим работать с высокими уровнями напряжений, где-нибудь около теоретической прочности стекла, мы не имеем права допускать появления на поверхности даже самых мельчайших трещин. Ведь стоит только одной трещине увеличиться до критической длины (а она может быть порядка тысячи ангстрем - одной десятой микрона), как наступит катастрофическое разрушение. Именно поэтому применение однородных хрупких материалов при серьезных нагрузках чересчур опасно.

Нельзя сказать, что отсутствие у некоторых материалов способности сопротивляться распространению трещин казалось всегда недостатком первобытному человеку - он мог делать из кремня и обсидиана различные режущие инструменты. Практически эти минералы представляют собой природные стекла. Если обладать необходимыми навыками, то легкого нажатия рукой на деревянный нож достаточно, чтобы отщепить длинную полоску минерала, которая сама может затем использоваться в качестве ножа. Обработка же нехрупких камней, таких, как нефрит, может быть выполнена только с помощью гораздо более трудоемкого процесса-шлифовки. Чаще всего растягивающие напряжения возникают в инструментах вследствие изгиба, поэтому, придавая каменным инструментам компактные формы, можно не допустить больших напряжений и обеспечить достаточный срок их службы. Конечно, оружие типа каменного меча было бы совершенно непрактичным.

Вязкость неметаллических материалов

История техники - это во многом история борьбы с распространением трещин или история попыток избежать его последствий. Наиболее очевидный способ не дать трещине развиваться в хрупком материале состоит в том, чтобы не использовать такой материал под растягивающей нагрузкой, то есть нагружать его только сжатием. В этом заключается сермяжная правда каменной кладки. Мы видели в [главе 1](#), что, начиная от простейшей стены и кончая аркой, куполом и церковными соборами самых изощренных форм, все держится в состоянии сжатия. Каменная кладка по-своему чрезвычайно эффективна, но по своей природе она всегда тяжела и недвижима. Поэтому появилась целая серия вариаций этой же идеи. Одна из них - предварительно напряженный железобетон, в котором хрупкий компонент держится в состоянии сжатия прочными растянутыми стержнями. Другая - закаленное стекло. Оно однородно в том смысле, что, кроме стекла, ничего в нем нет, но его внешние слои, наиболее подверженные влиянию трещин, находятся в состоянии сжатия за счет растяжения в защищенной сердцевине*.

* Обычно это достигается путем быстрого охлаждения наружной поверхности горячего стекла с помощью воздушной струи. Стекло, подобно другим веществам, сокращается при охлаждении, поэтому если внешние слои охлаждаются быстрее и затвердевают прежде внутренних, то они вначале и сокращаться будут интенсивнее внутренних; но так как сердцевина вначале жидкая, то на первых стадиях охлаждения она течет. Затем сердцевина застывает и становится, как и наружные слои, упругой, и термические сокращения слоев в стекле становятся неоднородными, разными по величине. В итоге, когда охлаждение заканчивается, сердцевина оказывается растянутой, а наружные слои - сжатыми.

Деформации в стекле - как и в большинстве других прозрачных тел - становятся видимыми в поляризованном свете. Солнечные лучи, отраженные от неметаллических поверхностей, оказываются частично поляризованными. Именно поэтому следы воздушных струй, которыми охлаждалось стекло, можно видеть на ветровых стеклах машин. Конечно, эффект этот становится более выраженным, когда вы надеваете очки с поляризующими стеклами.

Такие стекла широко используются в автомобилях. Разработки в этой области могут обернуться созданием новых материалов. Остается удивляться, что этот способ торможения трещины в конструкционных материалах, по-видимому, совершенно не представлен в биологических материалах, в которых торможение трещины целиком основано на том же принципе, что и в большинстве созданных человеком материалов, - на снижении эффективной концентрации напряжений у кончика трещины. Однако методы, используемые природой, довольно существенно отличаются от тех, которые применяют металловеды.

Еще удивительнее то, как мало изучены механические свойства биологических материалов. Пожалуй, здесь играет психологический момент. Очень многие становятся биологами или медиками просто в результате реакции протеста против механико-математических дисциплин. А техника, наоборот, сейчас переживает тот период, когда природные материалы обычно бракуются. Металлы считаются более "важными", чем древесина, которая едва ли принимается всерьез как конструкционный материал.

Целлюлоза, главная составная часть древесины, тростника, бамбука и всех растительных волокон, - очень вязкая. Биты для крикета делаются из ивы, молотки для игры в поло - из вяза, мячи для поло - из бамбуковых корней, ткацкие челноки - из персидской хурмы. Самолеты в свое время делали деревянными, планеры остаются деревянными до сих пор. Деревянные суда считаются более пригодными для ледовых условий, чем стальные. Целлюлоза не может считаться непрочной или хрупкой, хотя химически она представляет собой сахар, построенный из связанных вместе молекул глюкозы. Все кристаллические сахара очень хрупки, сахар хрупок и в стеклообразном виде (вспомните ириску).

Материалом костей и зубов служат довольно простые неорганические соединения, которые в своей обычной кристаллической и стеклообразной формах также очень хрупки. Конечно, можно сломать и кость, и зуб, но это случается

сравнительно редко. Особенного восхищения заслуживают зубы, которые могут (при соответствующем уходе) разгрызть орехи в течение примерно сорока лет. Даже архисовременные зубные цементы несравненно слабее и более хрупки, чем материал зубов.

Поверхность раздела как тормоз для трещин

В вопросе о вязкости армированных пластиков, среди которых наиболее известны стеклопластики, существует интересный парадокс. Стеклопластик содержит множество тонких стеклянных волокон, склеенных смолой воедино. Стекловолокно не отличается от обычного стекла ни физически, ни химически. Как мы уже видели, стекла катастрофически хрупки; так же ведут себя и волокна из стекла. Более того, смола, которая используется как связующая матрица в стеклопластиках, также достаточно хрупка; может быть, почти в такой степени, как стекло. Однако, когда оба этих компонента объединены вместе, получается материал, который производится в больших количествах главным образом благодаря его вязкости.

Не так давно мы с Дж. Куком решили разобраться в этом явлении количественно. В материаловедении многие задачи связаны с математическими трудностями, теоретически разрешимыми, но требующими слишком трудоемкой вычислительной работы. К таким задачам относится в какой-то мере и расчет распределения напряжений вокруг трещины. Но мы должны знать некоторые особенности картины напряжений вокруг трещины, если хотим предугадать, как поведет себя трещина, столкнувшись на своем пути с какой-либо неоднородностью. Ведь стеклопластик - материал явно неоднородный, особенно интересная неоднородность возникает на границе раздела между волокном и смолой.

В наше время ЭВМ меняют все представления о вычислительных трудностях. Концентрация напряжений у кончика трещины была впервые вычислена Инглисом в 1913 году. Мы уже говорили об этом, его результаты можно считать классикой, они абсолютно верны. С тех пор целый ряд ученых, более способных, чем мы, работали над этой проблемой. Но дьявольски громоздкий математический аппарат одних заставлял предполагать, что кончик трещины бесконечно остр, то есть имеет нулевой радиус; тех же, кто считался с конечным радиусом головки трещины, та же самая математика принуждала использовать очень приближенные методы или же определять картину напряженного состояния только в какой-то ограниченной области. Предположение о бесконечно острой трещине ведет к бесконечно большим напряжениям, что, очевидно, лишено реального смысла и не помогает в решении проблемы разрушения*.

* Простая и изящная идея В.В. Новожилова (см. его статью в журнале "Прикладная математика и механика", 33, 1969, вып. 2) сводит бесконечные напряжения, полученные в результате решения задачи теории упругости, к реальным полным смысла величинам путем учета атомной структуры материала и того факта, что эти эфемерные бесконечно большие напряжения уменьшаются при удалении от трещины с бесконечно большой скоростью. - *Прим. перев.*

Приближенные методы, использовавшиеся для случая конечного радиуса головки, не давали достаточно полного представления о том, что делается у самого кончика трещины, то есть там, где идет разрушение.

Как бы то ни было, с электронно-вычислительной машиной или без оной, я, вероятно, не смог бы управиться со всей этой математикой, но Куку нравятся такого рода упражнения, и, использовав вычислительную машину "Меркурий", он сумел определить напряжения очень близко к кончику трещины с конечным радиусом.

Общая картина напоминает картину, показанную на рис. 18. Немного обобщая ее, мы могли бы изобразить траектории напряжений, то есть направления, по которым напряжения передаются с одной атомной связи на другую, как это сделано на рис. 30. Эта схема поможет нам понять детали картины напряжений, полученной Куком.

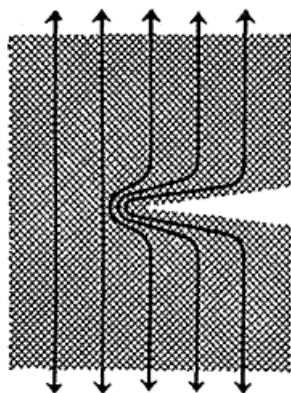


Рис. 30. Грубая схема траекторий напряжений в равномерно растянутом стержне, содержащем трещину.

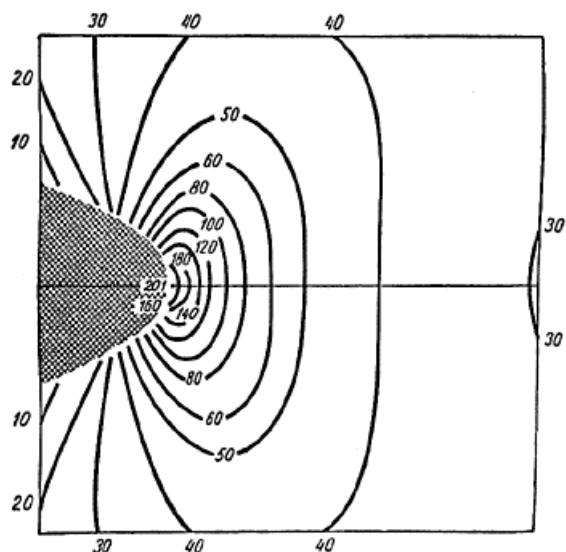
Мы, конечно, понимали, что делаем два допущения, которые упрощают нашу задачу. Во-первых, мы считали, что кончик трещины имеет очертания эллипса или круга - на самом деле в материале, состоящем из атомов, такого быть не может. Во-вторых, мы предполагали, что материал ведет себя как сплошное упругое тело и подчиняется при этом закону Гука - это тоже не учитывает реальных особенностей материала. Но ничего лучшего мы предположить не могли, остается лишь надеяться, что ошибки, вызванные таким огрублением действительной картины, будут не слишком велики.

Первый вывод относительно распределения напряжений в области конца трещины, который Кук сделал из своих упражнений с ЭВМ, заключается в том, что не так уж важно, как приложена внешняя нагрузка. Конечно, общая картина напряженного состояния в теле будет сильно зависеть от того, каким способом мы вынудим трещину расти - будем ли мы расклинивать ее, например, гвоздем или зубилом или приложим растягивающую либо изгибающую нагрузку к телу, содержащему трещину. Но распределение напряжений в области, в которой развивается разрушение, то есть на расстоянии нескольких атомных размеров от кончика трещины, будет во всех случаях примерно одним и тем же. Следовательно, механизм разрушения не должен, по-видимому, зависеть от способа нагружения тела. Задача, таким образом, упростилась, а это уже означало некоторый шаг вперед.

Обратимся теперь к рис. 31 и 32, на которых изображены действительные картины напряжений, рассчитанные для трещины длиной 2 мкм и радиусом кончика 1А. Часть трещины, прилегающая к ее кончику, отмечена на рисунке штриховкой. Кривые линии проходят через точки тела, в которых коэффициент концентрации остается постоянным для напряжении, направленных по вертикали (рис. 31) и по горизонтали (рис. 32) в плоскости листа. (Заметьте, это - не траектории напряжений!) Число у каждой линии обозначает величину коэффициента концентрации, то есть число K , на которое следует умножить величину среднего напряжения на значительном удалении от трещины, чтобы получить соответствующее напряжение в любой точке на заданной линии. Когда размер трещины увеличивается, радиус ее кончика не изменяется; следовательно, концентрация напряжений возрастает. Но характер распределения напряжений остается прежним, все изменяется пропорционально. Для случая, когда трещина укорачивается, справедливо, конечно, обратное.

Рис. 31. Концентрация напряжений вблизи кончика эллиптической трещины.

Растягивающие напряжения направлены под прямым углом к трещине, то есть параллельно приложенной нагрузке. Заштрихованная область представляет собой трещину. Вдоль кривых коэффициенты концентрации постоянны, числа, проставленные на них, показывают, таким образом, во сколько раз местное напряжение превышает среднее по образцу. Максимальная величина концентрации - около 200. Абсолютная величина концентрации зависит от длины трещины, но пропорции остаются неизменными.



Из рис. 31 видно, что напряжения, направленные вертикально, то есть силы, стремящиеся раскрыть трещину, разорвать ее, очень велики, особенно в области, вплотную примыкающей к кончику трещины. Самые опасные напряжения приходятся на область, примерно равную площади одной атомной связи. Численная величина максимального напряжения равна здесь полученному Инглисом напряжению в самой крайней точке трещины (правда, это точное значение не столь уж важно, потому что все подобные расчеты основаны на каких-то допущениях). Но если мы продвинемся вперед от трещины, перескочим, грубо говоря, на следующую атомную связь, то обнаружим, что напряжение на ней упало в два с лишним раза по сравнению с максимальной величиной. Вероятно, эти соотношения верны всегда, и они очень ясно показывают, что большая часть нагрузки концентрируется в материале на единственной цепочке атомных связей, проходящей через самый кончик острой трещины; следует лишь помнить, что мы имеем дело с твердым телом (а не с листом бумаги) и кончик трещины представляет собой линию в трехмерном пространстве. Как только перегруженная связь на кончике трещины лопнет, пик концентрации напряжений переместится на следующую связь и т.д. и т.д., подобно петлям на чулке.

Если увеличивать только прочность химических связей, то это мало повлияет на прочность тела, содержащего дефекты, так как этот путь не уменьшает концентрации напряжений у трещин. Именно поэтому алмаз и сапфир - вещества хрупкие и обычно не очень прочные, несмотря на их большую твердость и высокую энергию химических связей. На этом можно было бы и поставить точку в истории о прочности и хрупкости, если бы дело ограничивалось более или менее упругими и более или менее однородными телами. С такой точки зрения практически безразлично, с какого рода телом мы имеем дело - кристаллическим, стеклообразным или даже полимером; несущественна и величина модуля Юнга. Важно лишь, чтобы тело подчинялось закону Гука в достаточно широкой области деформаций, вплоть до разрушения. **Хрупкость - не есть особое состояние, она является нормальным состоянием всех простых твердых тел.**

Вязкость присуща более сложному твердому телу; можно даже сказать, что тело должно быть специально “сконструировано” таким образом, чтобы обладать этим свойством. Вязкие материалы часто содержат в своем объеме какие-то границы раздела, многие из этих материалов - тела неоднородные, то есть построены из двух или более составляющих, например из волокна и смолы.

Давайте теперь рассмотрим рис. 32, на котором изображена картина напряжений, параллельных трещине и направленных горизонтально. Сразу и не подумаешь о том, что такие напряжения, и довольно значительной величины, существуют, однако более внимательный анализ показывает, что дело обстоит именно так. Как видно из рис. 30, все траектории напряжений должны обходить край трещины, довольно резко изгибаясь при этом. Траектории напряжений можно образно представить себе в виде натянутых струн, которые стремятся выпрямиться. Если натянутая струна огибает жесткий колышек, она будет давить на колышек в направлении натяжения, а реакция колышка, естественно, будет направлена в противоположную сторону. Иными словами, в области, примыкающей к трещине со стороны ее кончика, должно существовать растяжение в направлении, параллельном поверхности трещины. Вычисления Кука дают распределение и величину соответствующих напряжений (рис. 32).

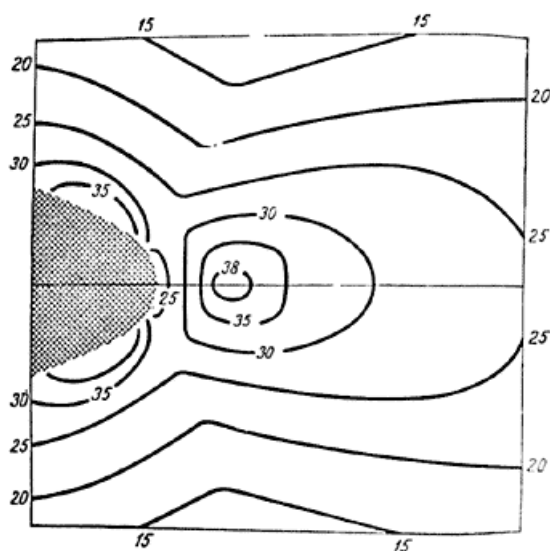


Рис. 32. Концентрация напряжений вблизи кончика эллиптической трещины. Растягивающие напряжения направлены параллельно трещине, то есть под прямым углом к направлению приложенной нагрузки. Для этого случая максимальная концентрация составляет около 40 - т.е. пятую часть концентрации, показанной на предыдущем рисунке.

Если напряжения, перпендикулярные трещине, достигают максимума на самом ее кончике, то напряжение, параллельное трещине (горизонтальное в плоскости чертежа), равно нулю в этой точке. Оно увеличивается с удалением от кончика по горизонтали (рис. 32) и достигает максимума на расстоянии одного-двух атомных размеров от трещины. Но этот максимум размазан, и довольно высокие напряжения сохраняются на значительном расстоянии от трещины. **Независимо от формы трещины и способа ее погружения отношение максимальной величины напряжения, параллельного трещине, к максимальной величине напряжения, направленного перпендикулярно ее поверхности, есть величина постоянная и равная приблизительно 1/5.** Такое положение имеет, по-видимому, фундаментальное значение для всех трещин, существующих в растянутом материале.

Здесь-то и становятся важными внутренние поверхности в биологических материалах. Важно то, что эти поверхности раздела обычно слабее окружающего их материала и не потому, что Природа не догадалась склеить здесь ткани прочнее, а потому, что, будучи верно устроенными, слабые поверхности делают материал вязким, упрочняют его.

Посмотрим, что получается, когда трещина приближается к подобной поверхности, расположенной перпендикулярно к направлению ее движения. Вначале к поверхности раздела подойдет зона растяжения, которая движется впереди трещины, и она попытается разорвать тело по этой поверхности на каком-то участке. **Если прочность поверхности раздела больше 1/5 от общей прочности сцепления материала, то эта поверхность не разрушится, трещина лишь пересечет ее и поведение материала не изменится. Если, однако, прочность границы раздела меньше примерно 1/5 от величины сцепления материала, то она будет разрушена, прежде чем главная трещина достигнет ее, и образуется ловушка, которая поймает и остановит трещину*.**

* По-видимому, можно считать, что в результате трещина будет притуплена. Радиус кончика трещины, который был очень малым, станет очень большим, практически бесконечно большим. Мы получим таким образом новую трещину под прямым углом к первоначальной, но тенденция к распространению трещины, параллельной приложенному напряжению, обычно отсутствует.

Схематически все это показано на рис. 33, а микроснимок действительной картины трещин в армированном материале - на рис. 34. Конечно, если сцепление на поверхности раздела слишком слабое, то материал в целом будет слабым, непрочным; если сцепления не будет вообще, то придется изобретать какое-нибудь веревочное или плетеное приспособление, чтобы хоть за счет трения удержать куски вместе. Конечный результат сильно зависит от правильного выбора сил сцепления на поверхностях раздела, и, коль скоро это сделано, может быть получена блестящая комбинация прочности и вязкости.

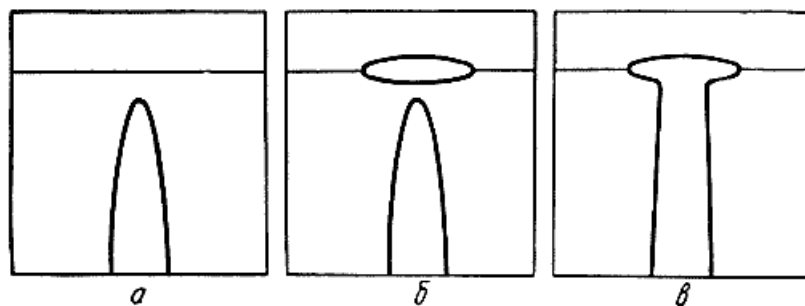


Рис. 33. Механизм торможения трещины по Куку-Гордону. *а* - трещина приближается к слабой поверхности; *б* - поверхность перед трещиной разрушается; *в* - Т-образный тормоз для трещины. На практике трещина обычно отклоняется, как показано на рис. 34.

Итак, условие эффективного торможения трещин состоит в пятикратном ослаблении материала. Поначалу такая операция не кажется многообещающей. Еще не взявшись за дело, мы должны уже кое-чем поступиться. Однако если наблюдать за процессом торможения трещин, метод создания слабых поверхностей раздела выглядит вполне эффективным: истинное разрушающее напряжение у кончика трещины должно быть равным теоретической прочности материала, то есть должно лежать, как правило, между $E/10$ и $E/5$ (E - модуль Юнга, см. главу 2). Уменьшая эту величину в 5 раз, мы все еще сохраняем прочность $E/50$ - $E/25$, достигнутую, кстати говоря, на практике в стеклопластиках и намного превышающую ту, что можно получить для металлов, сохраняя безопасный уровень вязкости (глава 8). К тому же прочность, значительно превышающая $E/100$, может и не составить особого интереса для практики.



Рис. 34. Влияние внутренних поверхностей на торможение трещин. Слева - материал, содержащий множество внутренних поверхностей; справа - однородный материал.

Хрупкость большинства природных минералов связана с их большей или меньшей однородностью. Но, оказывается, некоторые минералы имеют слоистое строение, причем связь между слоями приблизительно нужной прочности. Самые распространенные минералы такого рода - асбест и слюда, именно поэтому они имеют столь удивительные и полезные свойства. Очень показательны в этом смысле знаменитые опыты со слюдой профессора Орована. Слюда представляет собой минерал с ионными связями, в котором условия баланса электрических зарядов в молекуле требуют существования слоев металлических атомов, вынужденных делить заряд одного электрона с несколькими соседями. Эти слои в кристалле являются слабыми поверхностями. Один из часто используемых типов слюды называется мусковитом (*muscovite* - московский, этот сорт слюды впервые был найден в России). Прочность межслоевой связи в этой слюде составляет в среднем примерно $1/6$ от прочности в остальном объеме кристалла.

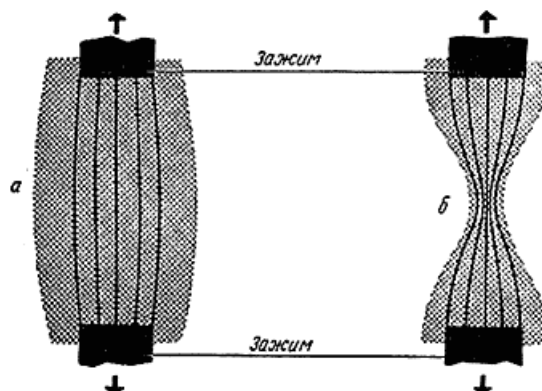


Рис. 35. Эксперименты Орована со слюдой.

а - образец с ненагруженными кромками, прочность его 320 кг/мм²

б - нагрузка на кромках равна среднему напряжению в образце, прочность его 17,5 кг/мм².

Орован измерял прочность мусковита при растяжении. Для первого опыта он вырезал из пластинки слюды образец обычной формы, напоминающий очертаниями контур песочных часов (рис. 35, б). Образец был плоским и достаточно тонким, а плоскости спайности - параллельными широкой грани образца. Такой образец как бы состоял из некоторого числа листов, слабо склеенных между собой. Кромки его имели грубые следы механической резки. Когда образец нагружался в испытательной машине, эти кромки нагружались в той же степени, что и середина, так что трещины начинались на кромках и распространялись в глубину образца обычным путем. Прочность, полученная на этих образцах, была около 17 кг/мм², то есть примерно равнялась прочности обычного стекла.

Затем Орован испытал ту же слюду, но на образцах другой формы. Из слюды вырезались прямоугольные пластинки, которые были несколько шире, чем захваты для крепления образцов в машине. Предполагалось, что образец будет нагружен так, как показано на рис. 35, а, то есть кромки его останутся ненагруженными. Наружные плоскости образца, лежащие на пути передачи нагрузки между захватами, должны быть, конечно, полностью нагруженными, а на них - царапины и другие концентраторы напряжений. Но трещины, появившиеся на этих концентраторах, едва начав расти, упираются на своем пути в относительно слабые плоскости спайности.

Прочность этих образцов оказалась равной приблизительно 320 кг/мм², то есть была почти в 20 раз выше, чем прочность образцов, в которых трещинам не нужно было пересекать слабые плоскости. Это составляет 1,5% от модуля Юнга - цифра весьма внушительная. Но вот другой сорт слюды - Маргарит - имеет вдвое больше электронов связи через плоскость спайности, а потому хрупок и обладает ничтожной прочностью.

Подобные эксперименты показывают, что для материалов такого типа трудно отделить реальную прочность от хрупкости, поэтому введение слабых внутренних поверхностей можно рассматривать как увеличение общей прочности тела.

Слюда и асбест не использовались людьми каменного века для изготовления инструментов и оружия - плоскости спайности тянутся в них через весь кусок минерала, от одной грани к другой. Другой известный с древних времен минерал, нефрит, представляет собой мешанину малых плотно упакованных игольчатых кристаллов со слабым сцеплением на границах; его можно считать неорганическим эквивалентом вересковой трубки или бамбукового корня. Нефрит поэтому очень вязок и мог бы быть почти идеальным материалом для инструментов и оружия, обрабатывайся он полегче да встречайся в природе почаше.

Поскольку нефрит нельзя расколоть так же легко, как кремний или обсидиан, ему придавали нужную форму путем очень длительной - недели и месяцы - шлифовки с песком на куске дерева. Поэтому очень прочный нефрит оставался материалом для дорогих поделок. Из-за дороговизны, великолепия и редкости материала самого по себе эти предметы сохранились в качестве символов престижа, когда на сцену выступили металлы.

Нефрит встречается редко, потому что он может кристаллизоваться лишь при определенных геологических условиях (температуре и давлении). Эти благоприятные условия иногда встречались в складках земной коры. Такие области есть на Дальнем Востоке, в Новой Зеландии, в Центральной Америке. Новозеландское племя маори делало нефритовые топоры почти на памяти живущего поколения. Генрих Гарер * рассказывает, что в центральной Новой Гвинее топоры до сих пор делаются из камня, похожего на нефрит; шлифовка и полировка их требует нескольких месяцев. Любопытная проблема возникла в связи с тем, что недавно в Англии было найдено несколько нефритовых топоров. Если это не шутка типа Пилтдаунской **, то либо где-то в Европе были раньше месторождения нефрита, либо топоры должны были проделать невообразимый путь с Дальнего Востока. Однако, как заметил Геродот по поводу находки скифских поделок в Делосе, они могли "рассеяться".

* *H. Harrer, I come from the Stone Age, Hart-Davis, 1964.*

** Пилтдаун - местечко в графстве Сассекс. Череп, найденный там в 1913 году, вплоть до 1953 года считался принадлежавшим доисторическому человеку. - *Прим. перев.*

Примеры эффективного торможения трещин в минералах случайны. Когда же имеешь дело с биологическими материалами, поражаешься огромной заботе, которую природа проявляла о разного рода поверхностях раздела. Конструкция зубов - прекрасное тому подтверждение. Зубы состоят из твердого вязкого поверхностного слоя, называемого эмалью, и сердцевины из дентина. И эмаль, и дентин содержат неорганические кристаллы удлиненной формы, распределенные в органической матрице. Главное отличие между ними состоит в процентном содержании органического и неорганического компонентов.

Твердый компонент эмали и дентина - вытянутые кристаллы вещества, которое номинально представляет собой гидроксилapatит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. Фактически же химический состав этих кристаллов изменяется в широких пределах, отражая условия, в которых они формировались. Обычно здесь присутствуют углеapatит, фтороapatит, фтористый кальций, карбонат кальция и т.д. Кристаллы эти небольшие, их размер в эмали около 3000- 5000 А в длину и 500-1200 А в толщину. В эмали они очень плотно упакованы, их содержание здесь составляет 99% всего объема материала. Между

отдельными кристалликами находится тонкий слой очень сложного органического соединения, состоящего главным образом из протеина. Раньше считали, что это соединение подобно кератину, одному из типов протеина, содержащемуся в волосах, однако сейчас полагают, что в зубной эмали содержится свой специальный сорт протеина. Между прочим, он заметно изменяет свой состав при переходе владельца из младенческого возраста к зрелому.

Дентин отличается от эмали прежде всего тем, что неорганическая составляющая занимает лишь около 70% его объема. Кроме того, кристаллы апатита намного меньше и имеют 200-300 Å в длину и 40-70 Å в ширину. Средой, в которую эти кристаллы заделываются, является органическая матрица, состоящая в основном из коллагена.

Сцепление между гидроксилатапатитом и слоями протеина имеет чрезвычайно сложную химическую природу. Частично оно обеспечивается гидроксильными связями, а частично - ионными (см. приложение I). Несомненно, существует очень тонкая настройка величины этого сцепления, а следовательно, и характера распространения трещины. Однако слабая органическая прослойка легко подвержена гниению, которое резко ускоряется, когда очаг разложения, пройдя слой эмали, доходит до дентина. Но, вероятно, это разумный компромисс: если бы отсутствовал легкоуязвимый органический слой, зубы не гнили бы с такой легкостью, но тогда они были бы хрупкими и, наверное, ломались бы еще в молодом возрасте*.

* Я не мог найти каких-либо экспериментально полученных величин для прочности на разрыв, модуля упругости и ударной вязкости материала зубов. Прочность на сжатие дентина составляет 20 кГ/мм^2 , эмали - 70 кГ/мм^2 . Бонфилд и Ли исследовали недавно механические свойства костей животных и слоновой кости. Для слоновой кости при 16°C они получили $E=1750 \text{ кГ/мм}^2$, продольную прочность на разрыв 22 кГ/мм^2 , прочность поперек бивня $10,5 \text{ кГ/мм}^2$. "Свежая" коровья кость имеет прочность около 15 кГ/мм^2 , модуль упругости - 2700 кГ/мм^2 . Ударная вязкость ненадрезанного образца этой кости составляет около 10^7 эрг/см^2 , то есть она соизмерима с этой характеристикой для стеклопластиков, свежей древесины и стали. Удельный вес кости (в том числе слоновой кости) составляет приблизительно $1,85 \text{ г/см}^3$. Следовательно, удельная прочность этих материалов примерно вдвое превышает те же показатели для мягкой стали, но жесткость костей не столь велика. (Этими данными я обязан Дж.В. Маклину.)

Очень часто в живых организмах для управления величиной сцепления на границах используется водородная связь в гидроксильной группе (-ОН). Такой способ, безусловно, удобен в случаях постоянной влажности окружающей среды. Поэтому, когда человек использует природные органические материалы в сухих условиях, возникают определенные трудности. Высушивание гидроксидов, то есть удаление водной оболочки, окружающей каждую гидроксильную группу, ведет к усадке материалов, таких, как древесины. Это может привести и к резкому охрупчиванию, так как прочность границ становится слишком большой. То же самое может случиться и со слоновой костью, строение которой очень напоминает структуру зубов. В афинском Парфеноне была знаменитая статуя богини Афины из золота и слоновой кости. В те времена под крышей Парфенона было, должно быть, очень жарко и, чтобы предохранить слоновую кость от охрупчивания и растрескивания, статуя была окружена неглубоким бассейном с водой, которая не только бросала снизу отраженный свет на Афины, но и поддерживала достаточную влажность воздуха. Бассейн всегда был наполнен водой и сохранял статую в течение почти восьми столетий. На полу Парфенона и сейчас можно видеть остатки кольцевой каемки бассейна, глубина которого была всего около пяти сантиметров.

Глава 5

ДРЕВЕСИНА И ЦЕЛЛЮЛОЗА, или О ДЕРЕВЯННЫХ КОРАБЛЯХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ЛЮДЯХ

Во время войны, когда мы работали над прочными пластиками, профессор Чарльз Гурни взял за правило декламировать мне чуть ли не каждый день стишок, смысл которого сводился к тому, что сделать пластик - не фокус, а вот создать материал, подобный дереву, под силу лишь всевышнему. Меня это несколько угнетало, потому что древесина действительно лучше подходила для самолетов, чем те пластики, которые мы в то время умели делать. Даже и по сей день имеются конструкции (например, гидропланы, определенного типа суда), для которых древесина остается наиболее подходящим материалом.

Древесина и другие формы целлюлозы с успехом применяются в технике. Но этого мало, целлюлоза в природе вообще имеет чрезвычайно широкое применение. Целлюлоза является конструкционным элементом всех растений. Именно прочность и жесткость целлюлозы держат зеленую листву растения "лицом к солнцу", без чего невозможен процесс фотосинтеза - отправной химической точки для всех форм жизни. На долю целлюлозы приходится в среднем около трети веса всей растительности на Земле - практически эта цифра вне пределов точного учета. В целлюлозе заперта большая часть имеющегося на Земле углерода. В телах животных целлюлоза встречается редко, хотя и обитает в океане небольшой класс животных - оболочники, в основном состоящие из целлюлозы, внешне они напоминают продолговатых медуз и, по-видимому, не имеют определенной устойчивой формы. А вот в насекомых содержится полимерное вещество хитин, которое очень похоже на целлюлозу.

Обратившись теперь к материалам, которые использует человек, мы увидим, что целлюлозе здесь принадлежит ведущая роль. Годовое потребление древесины в мире (не считая топлива) - где-то между 800 и 1000 млн. тонн (древесина - достаточно важный материал в технике, чтобы попасть в официальные статистические сборники). Необработанная древесина, идущая на заборы, а также бамбук для строений, солома и камыш для крыш и т.д. используются сельским

населением примерно в таком же количестве, но каких-либо статистических данных по таким “неиндустриальным” материалам, конечно же, нет. Мировое производство чугуна и стали составляет около 400 млн. тонн, цифры для любого металла по сравнению с этой пренебрежимо малы*.

* Довольно трудно получить сравнение по стоимости. Относительная стоимость древесины и стали в разных странах весьма различна, кроме того, и стоимость самой древесины изменяется в зависимости от обработки - так, сырая древесина намного дешевле стали, а высокосортная фанера несравненно дороже ее. Следовательно, соотношение зависит и от того, на какой стадии производства делается сравнение. Очень грубо можно сказать, что цены на деловую древесину и малоуглеродистую сталь примерно одинаковы.

Отнесенные к единице веса величины прочности малоуглеродистой стали и древесины вполне сравнимы, так что возможно, что общая нагрузка, которую несет в мире древесина, даже превышает нагрузку, приходящуюся на сталь. Однако несомненно, что нагрузки, которые доверяют стали, как правило, более впечатляющи.

Поскольку плотность древесины составляет в среднем примерно 1/14 плотности стали, то общий объем используемой в мире древесины может быть больше объема стали раз в 30.

Отношение количества потребляемой древесины к количеству стали от страны к стране сильно изменяется, однако его нельзя считать показателем степени индустриализации или технического прогресса. В Англии и Голландии в год на душу населения приходится около 500 кг стали и лишь 320 кг древесины. В США потребление стали примерно на том же уровне, потребление древесины значительно выше - около 1100 кг. В Канаде еще выше - 1500 кг. В менее развитых странах потребление и того и другого меньше.

Рост растения

Целлюлоза является примером стандартизованного производства в природе. Функции и общий вид молекул целлюлозы во всех, даже весьма сильно отличающихся одно от другого растениях, одинаковы. Правда, молекулы могут быть несколько разной длины, могут по-разному комбинироваться, но все это детали - химическая суть их всегда одна.

Все достаточно развитые растения содержат пустотелые вытянутые веретенообразные клетки-ячейки, стенки которых состоят в основном из целлюлозы. (Вот откуда и название “целлюлоза”: *cell* - ячейка, клетка, а суффикс *ose* - общий для всех сахаров, например фруктоза - фруктовый сахар и т. д.) Эти пустотелые веретена оказываются волокнами, которые принимают на себя механические нагрузки, обеспечивая прочность.

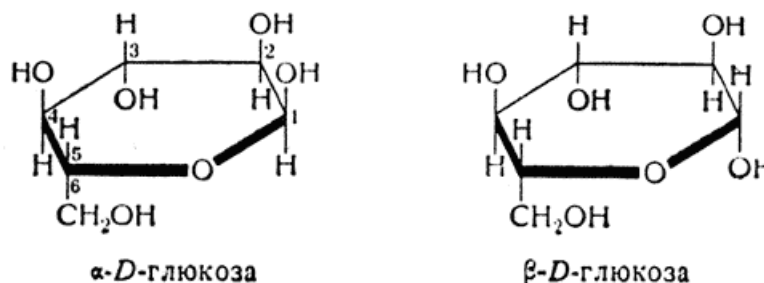


Рис. 36. Молекула глюкозы.

Вначале в листьях растений из атмосферного углекислого газа CO₂ и воды под действием солнечного света образуется простой сахар-глюкоза (рис. 36). Подобно другим простым сахарам, глюкоза хорошо растворяется в воде (кстати, поэтому она легко усваивается организмом) благодаря ее пяти гидроксильным группам, которые притягивают молекулы воды, а также тому, что молекулы глюкозы физически достаточно малы и могут свободно блуждать в объеме воды, конечно, при условии, что их там не слишком много. Концентрированный раствор глюкозы напоминает патоку.

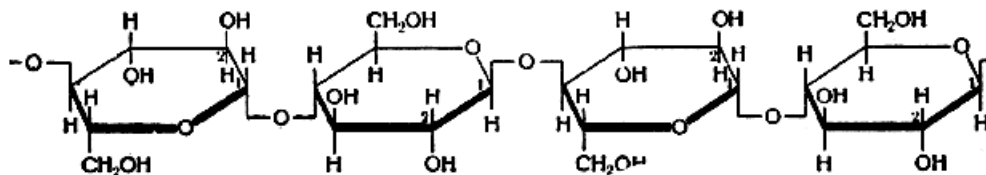
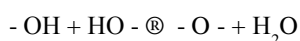


Рис. 37. Ячейки целлюлозной цепочки; обычно цепочка содержит несколько сотен таких ячеек

Растворенная в соке растения глюкоза проходит по его внутренним каналам и поднимается к растущей клетке. В стенке этой клетки молекулы глюкозы своими концами соединяются между собой (рис. 37). Соответствующая химическая реакция известна как реакция конденсации:



В результате образуется кислородная связь (-O-) и молекула воды, которая уходит в сок. Всем этим процессом в растении управляет вещество, которое называется ауксин; но как это происходит, в настоящее время не ясно. Кислородная связь между кольцами сахаров все-таки остается уязвимым звеном в целлюлозной молекуле, которая может достигать в длину нескольких сотен глюкозных ячеек. Именно эта связь разрушается с помощью ферментов в желудках жвачных животных, благодаря чему они могут усваивать целлюлозу; она же разрушается, когда дерево атакуют различного рода грибки. Та же связь рвется под воздействием простых химикалиев; так разрушает ее отбеливающий порошок, используемый в прачечных, что оказывается причиной постепенного старения и износа рубашек после многих стирок*.

* Увы, познания автора в химии и биохимии целлюлозы оставляют желать лучшего. Вряд ли стоит исправлять и дополнять этот параграф, но мы сочли целесообразным заменить рисунки 36 и 37 на их эквиваленты без грубых ошибок. - V.V.

Длинные целлюлозные цепочки откладываются в стенках клеток более или менее параллельно клеткам или волокнам, то есть, можно сказать, в направлении приложенной нагрузки. Процесс роста целлюлозы в целом весьма примечателен. Обычное дерево в возрасте нескольких лет имеет ствол с несколькими отходящими от него небольшими веточками. Каждая из этих веточек по существу представляет собой консольную балку, изгибаемую собственным весом (глава 1). Это значит, что верхние слои веток нагружены растяжением, а нижние - сжатием. Сук становится все толще и длиннее, а стало быть, и тяжелее, поэтому напряжения в верхних и нижних волокнах, в том месте где сук выходит из ствола, увеличиваются. Как и ствол, ветка растет: с каждым годом на ее поверхности под корой слой за слоем откладывается новый материал. Если бы очередной слой откладывался каждое лето в свободном от механических напряжений состоянии, то ветка, или балка, провисала бы все больше и больше, и все деревья должны были бы уподобиться плакучей иве. Однако с большинством деревьев такого не случается. Сучья растут примерно под одним и тем же углом к стволу в течение всей жизни дерева, так что молодое деревце можно считать геометрически подобным взрослому дереву. Так получается потому, что у большинства пород новая целлюлоза откладывается уже во вполне определенном напряженном и деформированном состоянии.

Работая с гидрохиноном и другими довольно простыми растворимыми веществами, я выращивал длинные игловидные кристаллы, усы (глава 3), которые утолщались путем как бы натягивания на поверхность новых слоев материала, что геометрически похоже на растущие слои в дереве. Исходные усы, тонкие волоконца, часто были в высшей степени изогнутыми, и можно было заметить, что растущие слои оказывали на них сильное выпрямляющее воздействие, отчего волнистые зародыши, вырастая до миллиметровой толщины, всегда становились очень прямыми. Отсюда ясно, что растущие слои этих кристаллов формировались под значительным механическим напряжением и эти напряжения выпрямляли волокна. Подобные явления встречаются довольно часто в простых небиологических системах, в этих случаях ни о каких дополнительных управляющих веществах или биологических механизмах и речи быть не может. Мы могли бы поэтому предположить, что прямой, без провисания рост ветки идет под механическим напряжением тоже без участия какого-либо биологического механизма. Но не все растения ведут себя подобным образом, и с помощью прививки можно заставить нормально растущее дерево стать похожим на плакучую иву. Есть предположения, что ауксин, управляющий синтезом целлюлозы, под действием тяжести концентрируется в нижних слоях ветки и, следовательно, внизу целлюлозы откладывается больше. Мне кажется, однако, что это далеко не полный ответ.

Целлюлозные цепочки всегда представляют собой простые нитевидные молекулы, которые не переплетаются с соседними нитями путем образования кислородных связей на боковых сторонах сахарных колец, как это делают другие более слабые полисахариды, например крахмал. Растительная клетка имеет форму трубки, стенки которой образованы длинными, уложенными приблизительно параллельно нитевидными молекулами целлюлозы. В природной целлюлозе имеются области, где молекулы-цепочки уложены идеально в параллельные пряди-кристаллы, они удерживаются в таком порядке с помощью гидроксильных связей по боковым сторонам молекул. Такие образования можно считать вполне обратными кристаллами с той удивительной особенностью, что они короче образующих их молекулярных цепочек (рис. 38). Каждый такой кристаллит заканчивается пучком распушенных цепочек, напоминающим по форме помазок для бритвы, в котором волоконца уже не очень параллельны. Молекулы могут в дальнейшем вновь собраться в параллельный пучок и образовать новый кристаллит, так что одна молекула иногда тянется через несколько кристаллитов.

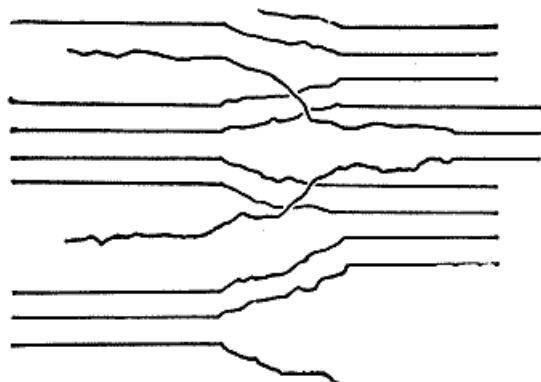


Рис. 38. Кристаллически-аморфная структура целлюлозы

Итак, кристаллические области образуются с помощью гидроксильных групп, которые избавились от плотно прилегающих к ним молекул воды; такая жесткая кристаллическая система оказывается недоступной для воды. Мы знаем об этом по рентгеновским измерениям: когда целлюлоза набухает в воде, расстояния между молекулами в кристалле не изменяются. С другой стороны, целлюлоза очень интенсивно притягивает жидкость и атмосферную влагу, и это с инженерной точки зрения ее самый большой порок.

Доля кристаллического материала в натуральной, целлюлозе может быть очень различна, но в среднем она составляет 30-40%. Некристаллическая, то есть аморфная, целлюлоза не имеет никакой защиты своих гидроксильных групп от влаги. Поскольку большинство этих групп со своими соседями жестко не связано, они подхватывают любую доступную им молекулу воды, образуя вокруг себя водную оболочку. Это, естественно, снижает взаимное притяжение гидроксильных групп. Силы, сохраняющие целостность клеточной стенки в боковом направлении, падают, и клетка разбухает. Целлюлоза полностью не переходит в раствор отчасти благодаря большому размеру своих молекул, а главным образом потому, что система в целом механически связана присутствием кристаллических областей, непроницаемых для воды и составляющих значительную часть общей массы. Так называемая "регенерированная целлюлоза", целлофан, получается путем растворения натуральной целлюлозы химическими методами, разрушающими кристаллиты. Затем полученный раствор осаждается, образуется прозрачная пленка, состоящая в основном из перепутанных отдельных молекул и намного меньшей доли кристаллитов. Намокая, такая пленка становится очень рыхлой и теряет всю свою прочность; целлофан может использоваться в качестве оберточно-упаковочного материала (это его основное назначение) лишь потому, что на него с двух сторон нанесена очень тонкая непроницаемая для воды лаковая пленка. Однако после продолжительного замачивания материалы такого типа становятся безнадежно слабыми, в то время как натуральная целлюлоза сохраняет довольно большую часть своей прочности.

Используемые нами натуральные сорта целлюлозы - это древесина, бамбук, тростник, лен, конопля, хлопок, рамп, сизал, эспарто и т.д. Однако, как и следует того ожидать, их механические свойства, и особенно разбухание в воде, зависимость прочности от температуры и содержания влаги отличаются лишь в деталях. Общая же картина для всех целлюлоз одинакова.

Свойства древесины

Как различны форма и размеры деревьев, так по-разному выглядит и древесина. Однако эти более или менее внешние признаки не столь важны, основное, что отличает разные типы древесины, это их плотность. Так, плотность выдержанной пробки от 0,08 до 0,16 г/см³, ели - около 0,5 г/см³, дуба - примерно 0,8 г/см³, гваякового дерева - 1,1-1,3 г/см³. Химическое же строение вещества любой древесины примерно одинаково (с небольшими видоизменениями), как приблизительно одинакова и его плотность, около 1,45 г/см³ (что очень близко к плотности сахара).

Древесина состоит из большого числа трубчатых ячеек - волокон, плотно прилегающих одно к другому. Чтобы их разделить, обычно приходится прибегать к довольно крутым мерам, как это, например, делается в производстве бумаги. У различных пород деревьев существуют небольшие различия в геометрическом расположении волокон. Например, некоторые породы (в частности, дуб) содержат какое-то число волокон, бегущих по радиусу от центра ствола и пересекающих продольные волокна под прямым углом. Но с инженерной точки зрения любую древесину можно считать пучком параллельных трубок. Поскольку материал этих трубок по существу для всех пород одинаков, плотность отдельных пород зависит от толщины стенок трубок. В результате оказывается, что в первом приближении большинство механических характеристик древесины пропорционально ее плотности: древесина, в два раза более плотная, будет и вдвое прочнее. Это не абсолютно точно, но приблизительно верно.

Вещество древесины состоит процентов на шестьдесят из целлюлозы. Кроме целлюлозы, оно содержит различные другие соединения типа сахаров и лигнин, вещество, похожее на смолу, которое пропитывает взрослое дерево какими-то сокровенными путями. Не пропитанная лигнином древесина имеет весьма однонаправленную структуру и поэтому обладает свойством двойного лучепреломления, то есть она поворачивает плоскость поляризации поляризованного света. Кроме того, она ярко окрашивается определенными красителями.

Ни тем, ни другим свойством нормальная древесина, содержащая лигнин, не обладает. Но непосредственно перед механическим разрушением, когда еще никакие механические методы не обнаруживают признаков близкого разрушения, древесина получает свойство двойного лучепреломления и легко окрашивается характерными красителями. По-видимому, причина этого кроется в каком-то необратимом разрыве химических связей между целлюлозой и лигнином, вызванном механическим напряжением. Однако использовать это явление как сигнал скорого неизбежного разрушения конструкции нельзя, потому что наблюдать его можно лишь под оптическим микроскопом на тонких сечениях, вырезанных из нагруженной части. Но оно может оказаться весьма полезным при расследовании причин аварий. Кроме того, это наглядно показывает, сколь хитро устроила природа вещество древесины.

В этой связи интересно еще упомянуть, что некоторые тропические породы, такие, как тик и гринхарт, содержат небольшие количества токсических веществ и кремнезема. Они защищают древесину от насекомых и гниения, но в то же время являются причиной высокой стоимости обработки лучших тропических пород: кремнезем очень быстро тупит инструмент, а щепки гринхарта ядовиты.

Механические свойства древесины в основном не отличаются от свойств, которые можно ожидать от пучка трубок или волокон. В боковом направлении волокна разделяются и сминаются довольно легко, поэтому прочность на разрыв и сжатие поперек волокон очень невелика, меньше 1 кГ/мм^2 . Более легкие породы, например пробку, можно даже сминать пальцами. С другой стороны, как раз потому, что трубчатые волокна легко сминаются, в древесину можно загонять гвозди и шурупы, не расщепляя ее (если, конечно, проделывать это, соблюдая определенную аккуратность). Между прочим, гвозди, достаточно осторожно вбитые в дерево, и ввернутые в него шурупы сколько-нибудь заметно не ослабляют древесину как целое; иными словами, дерево удивительно стойко к концентрации напряжений.

Прочность на разрыв ели составляет около 12 кГ/мм^2 . Она соответствует упругой деформации или межатомному разделению порядка 1%, то есть находится где-то между 1/10 и 1/20 теоретической прочности. Это намного лучше, чем тот же показатель для большинства других технических материалов, особенно дешевых. Ходовая сталь с прочностью 40 кГ/мм^2 упруго удлиняется на 0,15%. Если соизмерять все характеристики с удельным весом, то по прочности на разрыв древесина эквивалентна стали с прочностью 200 кГ/мм^2 , которая в 4-5 раз прочнее обычно используемых сталей. Но как мы увидим дальше, на практике не так-то легко эффективно использовать высокую прочность древесины на разрыв.

Древесина оказывается слабой при сжатии вдоль волокна. В этом отношении ее свойства противоположны свойствам чугуна, который прочен при сжатии, но слаб при растяжении. Здесь опять модель пучка склеенных между собой волокон оказывается очень реалистичной.

Под сжимающей нагрузкой тонкая стенка одной из трубок теряет устойчивость, на ней образуется складка, а все остальные трубки должны следовать за ней (рис. 39). Прочность на сжатие ели обычно лежит в пределах $3,0-3,5 \text{ кГ/мм}^2$. Если сравнивать эти цифры со сталью по удельной прочности (по отношению к плотности), то они выглядят все еще вполне сносно, но, конечно, далеко не так, как удельная прочность на разрыв.

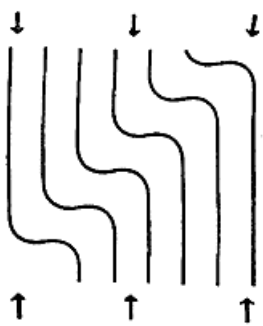


Рис. 39. Разрушение древесины при сжатии.

На чистой плоской поверхности, параллельной направлению волокон, место разрушения видно невооруженным глазом. Здесь бегут «складки» под углом 45° к направлению волокон.

Когда древесина начинает разрушаться от сжатия, можно видеть легкую линию складок на волокнах, бегущую под углом 45° к направлению волокон, но рассмотреть ее целиком довольно трудно: для этого нужно иметь чистую поверхность и знать, что и где искать. В течение некоторого времени после начала разрушения (складкообразования) ничего особенно сенсационного или катастрофического не случается, материал лишь постепенно проседает. Поскольку древесина чаще всего нагружается изгибом, то в результате медленного разрушения на сжатой стороне балки нагрузка передается на растянутую сторону. Поэтому номинальное напряжение в изогнутой балке перед окончательным разрушением может быть вдвое больше прочности на сжатие. Это обстоятельство делает деревянные конструкции очень надежными.

Древесина в некотором смысле вещь довольно зловредная: прежде чем появится реальная опасность разрушения, деревянная конструкция может немало потрепать вам нервы пугающими звуками. Планеры не имеют двигателя (они часто запускаются канатом примерно километровой длины, который наматывается на барабан лебедки), поэтому в полете - абсолютная тишина, нарушаемая лишь свистом ветра. И вот при быстром резком запуске деревянный планер будет пугать вас скрипами, тяжелыми вздохами, иногда даже грохотом. Это, естественно, встревожит вас, но скоро вы поймете, что все это притворство и никакой опасности разрушения конструкции нет. Такое представление может повторяться несколько раз на дню. Я почти уверен, что эти шумы не сопровождают процесса разрушения при сжатии. Часто я задавался вопросом, откуда они исходят, но, должен сознаться, никаких идей на этот счет у меня не появилось. Можно сказать одно - если вы слышите деревянную конструкцию, вряд ли вы ее сломаете.

Итак, по удельной прочности древесина вполне конкурентоспособный материал. Но одной лишь прочности практике не хватает, ей нужна еще и соответствующая жесткость: вещества вроде нейлона прочности имеют предостаточно, но для инженерных сооружений жесткость их слишком мала. Модуль Юнга для ели составляет примерно $1000-1500 \text{ кГ/мм}^2$, жесткость других пород более или менее пропорциональна их плотности. Удивительно, но удельный модуль Юнга для древесины почти в точности равен удельному модулю стали и алюминия и намного больше, чем у синтетических смол. Такая жесткость вместе с малой плотностью делает дерево очень подходящим материалом для балок и колонн. Мебель, полы, книжные полки, флаштоки, мачты парусников лучше всего делать деревянными. В Америке в XIX веке очень быстро и дешево было построено много железных дорог, отчасти это случилось благодаря высокой эффективности. железнодорожных мостов на деревянных эстакадах. Вместе с этими достоинствами древесина, однако, обладает

недостатком - она ползет. Это означает, что при достаточно длительной нагрузке материал постепенно деформируется. Следствие ползучести - вогнутые деревянные крыши старых домов и сараев. Из-за ползучести древесины нельзя оставлять надолго натянутыми деревянный лук или струны скрипки. По-видимому, причина ползучести состоит в том, что плохо закрепленные гидроксильные группы аморфных областей целлюлозы, пользуясь изменениями температуры и влажности, увиливают от своих обязанностей. Маловероятно, чтобы сколько-нибудь заметно ползла кристаллическая целлюлоза.

Разбухание

Несомненно, природа при желании могла бы химически соединить молекулы целлюлозы вдоль “боков”. Но тогда они были бы увязаны между собой очень надежно, и материал имел бы примерно одинаковую прочность во всех направлениях. Как мы уже видели в предыдущей главе, наличие слабых плоскостей, параллельных прочнейшему направлению, является, по-видимому, условием прочности и вязкости для материалов такого типа. Если бы такие поверхности отсутствовали, древесина походила бы на глыбу сахара - была бы однородной, но непрочной и хрупкой. Если судить по удельному весу древесины, то нет ничего плохого в ее механических свойствах. Обычно вес деревянных конструкций сравним по крайней мере с весом сооружений из металла. Плохо в древесине другое - она подвержена воздействию влаги. Вода может попадать в древесину под дождем, в реке, в море и т. д., но хуже всего то, что на древесину действует атмосферная влага.

При каждой данной температуре воздух может содержать определенное количество влаги. Любой избыток влаги выпадает в виде дождя, тумана, дымки или росы. Воздух в этом случае называется пересыщенным, и, следовательно, относительная влажность в сырой день равна примерно 100%. В сухую погоду или в помещении относительная влажность меньше, но она редко падает многим ниже 30%, даже в местах с сухим жарким климатом.

Древесина всегда стремится быть в равновесии с относительной влажностью окружающего воздуха. После длительной выдержки во влажном воздухе древесина может содержать 22-23% воды. В очень сухом воздухе содержание влаги в дереве может упасть до 5%. Однако связанные с этим колебания веса материала имеют второстепенное значение по сравнению с влиянием влажности на свойства древесины, в частности на ее усадку или разбухание. Каждый процент изменения влажности дает около половины процента усадки или разбухания. Обычные колебания влажности воздуха могут вызвать колебания поперечных размеров от 5 до 10%, то есть до 1 см на доску шириной 10 см. И если плотники-любители, располагая выбором, предпочитают использовать широкие доски, то профессионалы будут мудрее: они возьмут узкие доски, чтобы уменьшить перемещения в каждом отдельном стыке. Конечно, 5-10% усадки или разбухания не так уж часто случаются, но и 1-2% могут вызвать много неприятностей. Краски и лаки снижают колебания влажности в дереве, но не исключают их, так как нет красок, совершенно не проницаемых для паров воды.

Даже в помещении относительная влажность непрерывно изменяется, особенно между дневным и ночным временем. Полы и мебель “следят” за влажностью воздуха, а отсюда - скрипы и треск по ночам. Если каким-то образом удержать древесину от усадки при уменьшении влажности, она будет расщепляться: ведь она почти не имеет прочности на разрыв поперек волокон. Если геометрически ограничить возможность древесины разбухать, то при увеличении влажности может возникнуть весьма значительное давление. Египтяне использовали это давление для откалывания огромных глыб в каменоломнях, так была получена игла Клеопатры*.

* Игла Клеопатры - обелиск из красного гранита, воздвигнутый в 1500 году до н.э. Пролежав около полувека на морском дне, она была установлена в Лондоне, где находится в настоящее время. - *Прим. перев.*

Предварительно форма будущего куска размечалась канавкой на поверхности, эта же канавка служила концентратором напряжений. Затем вдоль канавки долбили глубокие отверстия, в которые загонялись сухие деревянные колья. Их заливали водой, и, пропитавшись влагой, дерево раскалывало камень вдоль требуемой линии.

Усадка морских канатных снастей и парусной ткани - в принципе то же самое. Отдельные волокна с изменением влажности изменяют не длину свою, а толщину, а остальное делает геликоидная геометрия каната и текстильной пряжи: веревки и одежда, намокая, становятся короче. Льняные паруса были особенно пористыми, и, чтобы уменьшить пористость, их замачивали.

Итак, мы видим, что самым важным следствием воздействия влажности на древесину является ее разбухание. С практической точки зрения влияние влажности на механические свойства, пожалуй, менее существенно. До предела намоченное дерево сохраняет примерно третью часть прочности и жесткости совершенно сухого дерева. Биологические материалы всегда работают в насыщенном состоянии - таким образом, ценою потери прочности снимается проблема усушки и разбухания. В технике целлюлоза никогда не используется в идеально сухих условиях, поэтому величины прочности и жесткости ее совсем не так плохи, как иногда это может показаться.

Сырую древесину гнуть немного легче, чем сухую; но больше всего облегчает гибку дерева нагрев. Так, прежде чем гнуть древесину для теннисных ракеток или шлюпочных шпангоутов, ее пропаривают. Часто считают, что пар делает с древесиной что-то особенное. Это неверно., просто пропаривание - всего лишь удобный путь нагрева древесины без ее высушивания, и механизм действия здесь в точности тот же, какой используют парикмахеры для завивки волос. Иногда древесину перед гибкой оборачивают влажными горячими тряпками. Эта операция помогает термической изоляции

древесины, сохраняет ее тепло предохраняет от слишком быстрого охлаждения. Древесина может без особого для себя вреда выдержать “влажный” нагрев примерно до 140°C, однако сухой нагрев, конечно, вызовет растрескивание вследствие усушки.

Выдержка древесины

Можно услышать довольно много вздора, о так называемой выдержке древесины. Об этом любят толковать старые мастера и романтичные, но несведущие любители. Древесина, как мы уже знаем, состоит из закрытых трубок, которые в живом растении частично заполнены водой или, точнее, соком. В свежесрубленном дереве содержание воды может быть различным, оно может даже превышать по весу количество сухого вещества. Примерно 25% этой воды абсорбировано, притянуто гидроксильными группами к стенкам волокон, остальная жидкость содержится внутри клеток. Во время выдержки большая часть воды удаляется. Выдержка в основном представляет собой операцию сушки и ничего более. Просто содержание влаги в дереве приводится к условиям, примерно равновесным с условиями окружающей среды, в которых ему предстоит работать: если этого не сделать, то изделие всегда будет под угрозой коробления от усушки. Для использования под открытым небом приемлема влажность 20%, для неотапливаемых помещений - около 15%, а для помещений с паровым отоплением - примерно 8-10%.

Клетки дерева представляют собой закрытые веретенообразные трубки, поэтому заключенной внутри них воде не так-то легко выйти наружу. Единственная возможность - медленное проникновение воды через стенки трубок. Такой процесс не представляет трудностей, если иметь дело с единичной клеткой. Но ведь бревно содержит многие тысячи таких клеток, и вода из внутренних клеток должна просочиться через стенки большинства других клеток, лежащих на ее пути наружу. Для этого необходимо поддерживать разницу влажностей между внутренним объемом древесины и окружающей средой. Чем больше эта разница, тем быстрее будет удаляться влага. С другой стороны, при слишком резком перепаде влажности наружные слои в ходе сушки окажутся заметно суше внутренних, будут больше сжиматься и, следовательно, расщепляться и растрескиваться. Поэтому, чтобы не повредить древесину, ее нельзя сушить слишком быстро. Традиционный способ выдержки - на открытом воздухе или под навесом. При сушке таким путем для досок толщиной 20-50 мм требуется около года, а для крупных дубовых заготовок для судов - около семи лет. С примитивными методами и знаниями ничего другого и не придумаешь, в былые времена лучшие судоверфи и хорошие каретники держали залежи ценной древесины, уже выдержанной или находящейся в процессе выдержки - это было одной из причин высокой стоимости их изделий.

В последние годы было предпринято много технологических исследований по выдержке лесоматериалов, в результате разработан ряд способов ускоренной безопасной сушки для древесины всех сортов и размеров. Тщательный контроль скорости сушки в больших сушильных печах позволяет свести время процесса к дням и неделям. Другой путь, также сокращающий время сушки, - современная тенденция применять пиломатериал меньших сечений, используя надежные клеи. Древесина, которая подобающим образом сушилась в печах (печи эти довольно дороги и требуют квалифицированного обслуживания), нисколько не хуже “натурально” выдержанной. Более того, в процессе сушки для нее менее вероятно подхватить грибковую инфекцию.

Содержание влаги в дереве можно определить путем взвешивания небольшого образца до и после печной сушки. В промышленности процент влажности определяется портативными приборами, которые измеряют электрическое сопротивление между двумя вбитыми в бревно иглами. Такая процедура дает ответ намного быстрее.

Если содержание воды в древесине меньше 25%, то вся она связана с гидроксильными группами в стенках клеток. Когда влажность достигает примерно 25%, гидроксилы оказываются насыщенными и стенки клеток не могут больше принимать воду; в таком случае говорят, что достигнута точка насыщения волокон. До этой точки полости клеток остаются пустыми, выше нее практически вся добавочная влага идет на заполнение трубчатых клеток. Все изменения размеров и механических свойств, обусловленные колебаниями влажности, проявляются только ниже точки насыщения волокон, то есть между 0 и 25% влажности. По достижении точки насыщения никакого дальнейшего разбухания не происходит, и добавочная вода просто увеличивает, причем весьма заметно, вес древесины.

Удельный вес вещества дерева около 1,45 г/см³, однако свежесрубленное дерево в воде не тонет (за исключением очень тяжелых пород), потому что даже в невыдержанной древесине очень много воздуха. Но если оставить дерево в воде, то, пропитавшись водой, оно в конце концов затонет, хотя для этого и потребуются, как и в случае естественной сушки, довольно много времени. В свое время экипаж “Кон-Тики” беспокоило, как поведут себя в плавании пробковые бревна плота, хотя скорость их пропитки не была очень высокой. Американские клиперы середины прошлого века с тремя впившимися в небо мачтами, сделанные из легкого, “мягкого” дерева, пропитывались водой, не прослужив и десяти лет. Однако за годы службы они, вне всяких сомнений, сполна окупали себя. Твердая древесина, которая обычно шла на постройку английских кораблей, была гораздо более водостойкой: можно привести несколько примеров, когда деревянные суда служили больше столетия.

Разложение древесины

Гниение древесины вызывается грибом, который паразитирует за счет целлюлозы: грибки вообще не имеют хлорофилла и не могут производить для себя сахар путем фотосинтеза. Споры различных грибов практически всегда имеются на дереве, подобно тому, как многие безвредные микробы живут в организме человека, оставаясь пассивными до той поры, пока не наступят подходящие условия. Болезнь дерева, гниение не может развиваться при влажности меньше 18%,

хотя споры сохраняют жизнеспособность в довольно сухой древесине, дожидаясь дождливого дня. Однако и при влажности выше 18% грибок еще не растет, если обеспечена хорошая вентиляция. С другой стороны, если влажность будет около 15%, то нужно совсем немного затхлости в каком-нибудь неветилируемом углу, чтобы началось гниение. Контролировать влажность древесины удается не всегда, но всегда можно обеспечить хорошую вентиляцию, и это будет гарантировать сохранность конструкции.

Сейчас существует много химикатов, убивающих активные споры и грибок в древесине, но их не всегда удобно применять в старых и сложных строениях: до пораженных частей не доберешься без дорогостоящей разборки конструкции. Однако почти всегда можно позаботиться об эффективной вентиляции.

В кругообороте веществ в природе некоторые процессы разложения очень существенны; не будь их, Земля не только была бы завалена стволами ранее живших на ней растений, но и все земные запасы углерода оказались бы связанными в целлюлозе - жизнь не могла бы продолжаться. С этим связано главное возражение против использования биологических материалов человеком: “планы” природы относительно отживающих организмов могут вступить в конфликт с нашими намерениями.

Деревянные суда

Деревянный парусник обеспечил в свое время экспансию Запада и потому более, чем какой-либо другой продукт техники, определил сегодняшние условия в нашем мире. Деревянные парусники открывали новые земли, они делали карту Земли. Они перевозили пассажиров и войска, эмигрантов и каторжников, путешественников и рабов. На них грузили золото и уголь, станки и книги, чай и шерсть, хлопок и дешевую жезть. Они везли это не только за тридевять земель, но и вдоль побережья, по рекам. Многие сотни лет военный корабль был самым веским аргументом королей, которые часто пускали его в ход.

Деревянные корабли - огнюдь не дела давно минувших дней, на памяти нашего поколения существовали первоклассные пассажирские парусные суда, плававшие в Австралию*. Живы адмиралы, которые начинали службу на деревянных парусниках.

* Последним большим деревянным пассажирским парусником был, по-видимому, “Торренс”, который ходил в Аделаиду вплоть до 1903 года. Металлические парусники различных типов с каютами первого, второго, а иногда и третьего классов ходили в Австралию и в нашем веке. Вопреки распространенному сейчас мнению они были прекрасными судами с отличными апартаментами и многими современными удобствами как для пассажиров, так и для экипажа. Грузовые парусники быстро сошли с арены, уступив место пароходам, а пассажирские парусные суда долго еще конкурировали с ними, предлагая пассажирам больший комфорт. Самый большой деревянный грузовой парусник - шестимачтовая шхуна “Вайоминг” водоизмещением 6000 т - был построен в Америке в 1910 году.

Хотя примерно в середине прошлого века как корпуса, так и оснастка судов были значительно усовершенствованы, в течение предшествующих трех-четырех столетий основные принципы конструирования оставались неизменными. Они определялись двумя факторами: разбуханием древесины и высокой стоимостью металлов.

Несущая конструкция большого корабля делалась из естественно изогнутой древесины, для таких элементов как шпангоуты, выбирались стволы деревьев, на корню принявших подходящую форму. Водонепроницаемая обшивка и палуба накладывались поверх частой решетки шпангоутов и продольных балок примерно квадратного сечения, пересекающихся со шпангоутами под прямым углом. Эта решетка не имела диагональных связующих элементов, способных воспринимать сдвиг. Кромки примыкающих одна к другой планок обшивки не связывались между собой механически, зазор между ними имел форму V-образной канавки. В эту канавку с помощью специального конопаточного зубила и деревянного молотка загонялась пакля, которую делали из отслуживших свое канатов обитатели тюрем и работных домов.

Поверх пакли между планками оставался открытый зазор шириной примерно 1 см. На палубах его заливали потом с помощью специального черпака горячей смолой. После того как смола застывала, ее излишки легко соскребались - в холодном состоянии смола становится достаточно хрупкой. В итоге палуба расчерчивалась изящными черными линиями. Для днища и боков судна использовалась специальная замазка. смысл всех этих операций заключался в том, чтобы заставить паклю компенсировать усушку и разбухание деревянной обшивки, а также - в некоторой степени - деформацию корпуса без заметного нарушения герметичности.

Вся конструкция была - в известной мере это делалось умышленно - довольно гибкой, вроде большой корзинки. Вероятно, не без оснований считалось, что, кроме компенсации усушки и разбухания древесины, такая гибкость корпуса вносила свой вклад в скоростные качества и добротность корабля. По-видимому, суда викингов и полинезийские каноэ были еще менее жесткими. Уже в викторианские времена, когда корабли комбинированной конструкции стали намного жестче, было специально построено несколько гоночных клиперов с корпусами, жесткость которых можно было изменять по желанию. Об одном из таких судов, когда оно вырывалось вперед, в экипажах соперников шутили: *“Они там развинтили болты, и мы их уже никогда не увидим”*.

В гаванях деревянные суда были, как правило, водонепроницаемыми, но все они, без исключений, начинали течь, когда выходили в море. Иногда течь бывала незначительной, а порой грозила опасностью. Несмотря на вековой опыт, корабельных дел мастера никак не могли, кажется, понять, что такое сдвиг. Любая конструкция типа оболочки,

подвергнутая изгибу и кручению, претерпевает значительные сдвиги в обшивке, а ведь этому как раз и подвергается корабль в море, особенно парусник. Но традиционная корабельная конструкция была подобна раме ворот без диагональных брусев.

Поскольку в конструкции судна никаких специальных элементов, эффективно воспринимающих сдвиг, не было, он воспринимался все той же паклей, которая попеременно то сжималась, то возвращалась в прежнее состояние, подобно губке. Время от времени (правда, на удивление редко) плывущий корабль выплевывал шпаклевку из какого-нибудь подводного шва. Случалось, что судно после этого тонуло. Однако чаще оно начинало течь и текло, текло... В этих случаях опасность была не столько в том, что корабль немедленно затонет, сколько в том, что непрерывная откачка воды изматывает силы команды, доводя матросов до такого состояния, при котором может случиться все что угодно.

Когда ситуация грозила катастрофой, можно было попытаться “подпоясать” корабль, обвязав его с помощью тросов, пропущенных под корпусом, подобно тому как об этом сказано в Новом Завете. С тех пор эта уловка повторялась много раз, и очень может быть, что именно сейчас где-нибудь в океане ее проделывают с каким-нибудь суденышком. смысл этой операции заключается только в одном - снабдить корпус судна воспринимающими сдвиг элементами. Но пока она не будет выполняться со знанием дела и точностью, которые, пожалуй, невероятны в подобных обстоятельствах (например, следует направить трос под углом примерно 45° к оси судна), она, надо думать, будет не более успешной, чем на корабле “Св. Павел”.

Что касается британского военного флота, то основные неприятности с течами кончились где-то около 1830 года, когда Роберт Сеппингс (1764-1840) предложил делать в деревянных корпусах кораблей железные диагональные крепления, Сеппингс, который часто приговаривал, что “частичная прочность приводит к общей непрочности”, был, вероятно, одним из первых кораблестроителей, понявших картину напряженного состояния корабельного корпуса. В торговом флоте деревянные корпуса были в основном заменены комбинированными и металлическими конструкциями лишь во второй половине прошлого века. Однако продолжали строиться и деревянные суда без соответствующего укрепления корпуса против напряжений сдвига. Старая, такие суда текли все больше. Они текли, а их эксплуатировали, пока это было экономически выгодным в условиях почти исключительно ручной откачки. Между прочим, вплоть до 1914 года норвежские судовладельцы покупали английские парусные суда и эксплуатировали их с ветряными помпами.

Несмотря на недостатки, деревянные военные парусники находились на вооружении флотов на протяжении трех-четырех веков, и адмиралтейства расставались с ними с сожалением, так как эти корабли были по-своему очень эффективны и экономичны. Они имели хороший радиус действия, были выносливы, независимость от морских баз позволяла им бесследно исчезать в океанских просторах - все эти достоинства флоты обрели вновь лишь недавно, с приходом атомных подводных лодок.

Активные действия флота случались не часто, угрозой был сам факт его существования. Однако до середины XVIII века считалось непрактичным круглый год держать флот в море, так как зимой корабли быстрее портились. Правда, усилиями преданных своему делу офицеров эти трудности преодолевались. Каждому, кто знаком с характером побережья, парусными судами и молекулой целлюлозы, длившаяся круглый год блокада Бреста и Тулона должна показаться почти невероятной. “Эти стоящие вдали избитые штормами корабли, которых Великая армия никогда не видела, стояли между нею и мировым господством” *.

* A.T. Mahan. Influence of sea power upon French Revolution and Empire, 1892.

Канаты и рангоуты балтийского происхождения доставляли морякам блокирующих судов много хлопот. И хотя французов они видели очень редко, им приходилось сражаться дено и ночно, их врагами были канаты, паруса, рей, которые вытягивались, гнили, рвались. Адмирал Нельсон писал: “Ко мне обращались с разных кораблей с жалобами на большую часть парусов и оснастки, но просьбы о замене выполнить было невозможно, так как в запасе был лишь такой же непригодный к службе хлам. Надо было искать другие пути борьбы с этим злом”. И все же “двадцать два месяца флот Нельсона не заходил в порт, - и, когда в конце концов возникла необходимость преследовать неприятеля четыре тысячи миль, корабли оказались во всех отношениях готовыми к этому неожиданному и столь далекому походу”.

Когда парусное судно идет при крепком попутном ветре будь это даже шторм, нагрузки в оснастке не слишком велики. Однако, когда корабль бросает из стороны в сторону на его пути против ветра, общая нагрузка в тросах на которых держатся мачты, может достигать нескольких тысяч тонн. Вплоть до середины XIX века вся эта нагрузка, эквивалентная весу многих железнодорожных составов, приходилась на долю пеньковых канатов, которые всегда подвержены разбуханию и усушке, вытяжке и гниению, поэтому требовалось большое искусство для того, чтобы не лишиться нескольких - а того и гляди, всех - мачт и гренгоутов. Понятно, что моряки всегда стремились избегать длительных походов навстречу ветру в бурную погоду. Пройти, например, мыс Горн всегда было гораздо опаснее, чем следовать знакомой дорогой к восточному побережью Америки или даже в Индию. Известен случай, когда экипаж (то был экипаж капитана Блая на корабле “Баунти”), взбунтовавшись, отказался повторять попытку обогнуть злополучный мыс: после первой попытки корабль едва не разнесло в щепки. В конце концов Блай должен был повернуть назад, держа курс в прямо противоположном направлении, в Тихий океан, вокруг Земли. Блай был превосходным моряком, и если уж он не преуспел здесь, то вряд ли кто-нибудь другой смог бы добиться успеха.

На английских военных кораблях металлические тросы для оснастки начали использовать с 1838 года. В торговом флоте стальные канаты внедрялись очень медленно (этот процесс продолжался до 60-х годов прошлого века), потому что как

раз в это время была усовершенствована технология скрутки пеньковых канатов: механическая скрутка делала канаты более плотными, отчего они значительно меньше вытягивались. Появление лучшей оснастки случайно почти совпало с открытием золота в Калифорнии, Около половины эмигрантов и все тяжелые грузы были доставлены туда морем. В те годы быстроходные парусники могли пройти путь от Нью-Йорка до Сан-Франциско за сто дней. В 1849-1850 годах 760 парусных судов обогнуло мыс Горн, провезя 27 тысяч пассажиров. Трудно определить, какая часть этих судов была оборудована стальными канатами, а какая - пеньковыми, ясно только, что покорение американского Запада во многом обязано улучшенным тросам*.

* Между прочим, шахтные стальные канаты появились в Германии в 1830 году, во многом определив безопасность и экономичность глубоких шахт.

Еще одним не менее важным шагом вперед явилась якорная цепь. Пеньковый кабельный трос имел определенные достоинства, однако для его хранения требовалось особое место на судне; весьма впечатляют громадные вентилируемые бухты на корабле "Виктория". Цепь, которая появилась на судах в 1811 году, могла храниться в небольших сырых помещениях; можно сказать, что цепь освободила место для машин и угольных бункеров.

Во времена малых скоростей, когда Новый Свет еще не имел судоверфей, серьезную проблему составляло обрастание днища судна растительностью и разрушение древесины животными-вредителями. Однако она была в основном решена медной облицовкой корпуса (примерно 1770 год). Это было самым крупным усовершенствованием XVIII века, увеличившим скорость и радиус действия судов, и настолько успешным, что судовладельцы впоследствии были весьма резко настроены против использования железа для корабельных корпусов - железо нельзя покрывать медью непосредственно из-за электрохимического взаимодействия между двумя металлами в соленой воде. Иногда железные корпуса обшивались деревом, а уже потом покрывались медью. Чаще других так строили корпуса военных кораблей, но конструкция получалась тяжелой. Много лучших быстроходных парусников имело комбинированный корпус. "Катти Сарк" (1869 год) была обшита тиком, обшивка болтами крепилась к железному каркасу с соответствующими подкреплениями против сдвига. Днище корабля было покрыто сплавом типа латуни, мунтц-металлом. Некоторые специалисты считают такую конструкцию наиболее совершенной для судов средних размеров. Вполне возможно, что это так, но она, к сожалению, еще и очень дорога.

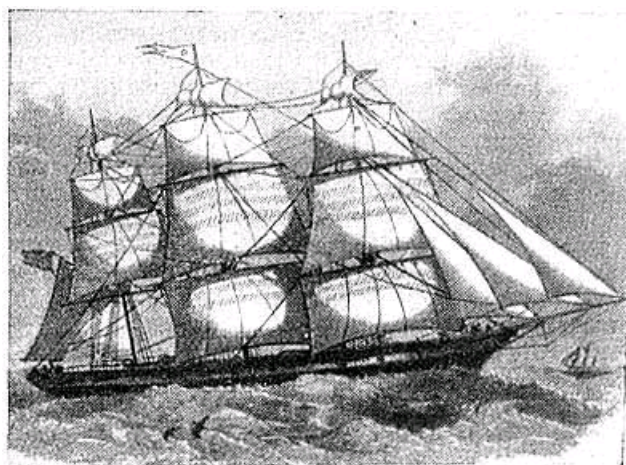


Рис. 40. Клипер "Великая Австралия"

Подешевление чугунных и стальных плит в 70-х годах прошлого века сделало постройку комбинированных корпусов неэкономичной, и к концу столетия большая часть морского грузооборота уже приходилась на большие парусные суда почти стандартной конструкции со стальными корпусами, стальными палубами, стальными рангоутами, стальной оснасткой. Такие суда были полностью герметичными, их мог обслуживать небольшой экипаж. Несколько меньшая скорость из-за более грубого днища компенсировалась возможностью идти под парусами в плохую погоду. Столетиями моряки привыкли лелеять деревянные суда, беречь их, никогда не перегружая сверх меры. Капитаны же стальных парусников считали свои корабли неуязвимыми просто потому, что они были стальными. Немало стальных кораблей затонуло в результате таких настроений.

Пароходы не составляли большинства на флоте примерно до 1890 года. Во всяком случае, они, как правило, использовались на более коротких маршрутах. Конечно, было построено предостаточно и деревянных пароходов, но тенденция к переходу на сталь выявилась здесь раньше, чем в случае парусных судов. Так получилось отчасти потому, что стальной корпус лучше деревянного сопротивлялся вибрациям паровых машин того времени, а также потому, что при непрерывном движении и более коротких маршрутах обрастание днища было не столь сильным. Ведь наиболее интенсивно обрастает попавший в штиль парусник.

Классическая деревянная конструкция все еще используется и сегодня для рыболовных судов, минных тральщиков и яхт водоизмещением до 400-500 т. Обычно она обеспечивает минимум веса для гоночных яхт; кроме того, это самая простая и дешевая конструкция яхты.

В простейших своих формах такая конструкция и сейчас страдает все тем же старым недугом - недопустимые течи в плохую погоду. Этот недостаток усугубляется намного большим весом современной оснастки и, следовательно, большими нагрузками на корпус. Конечно, все это можно преодолеть мастерством и усложнением конструкции, но тогда стоимость деревянного корпуса будет больше, чем стального или сделанного из пластика.

Глава 6

КЛЕЙ И ФАНЕРА, или СЛЮДА В ПЛАНЕРАХ

Если все летит к чертям, вбивай громадный гвоздь.

Тот факт, что прочность конструкционных материалов составляет обычно 1-5% от прочности химических связей, до недавнего времени не имел особого практического значения: соединения деталей и элементов в конструкциях были настолько плохими, что даже такая прочность материалов едва ли использовалась полностью. Правильно сделанные узлы и сплетения канатов дают от 40 до 80% прочности исходного каната. Соединения древесины гвоздями, шурупами, штифтами, шипами еще менее эффективны. Более прочные соединения дают такие операции, как связывание ремнями, шитье, заклинивание; ими пользовались еще первобытные люди и - до недавних пор - моряки; еще и сейчас так делают сани. В 20-е годы корпуса гидросамолетов сшивали, используя в качестве нитки медную проволоку,

Шурупы, которые с удовольствием применяют плотники-любители, являются самым плохим способом соединения. Между первой и второй мировыми войнами в Германии предметом серьезных исследований был гвоздь; немцами были разработаны новые и очень разумные формы механических соединений. Результаты этих работ используются иногда и сегодня в строительстве деревянных домов, но в целом механические соединения древесины сейчас отодвинуты на задний план операцией склеивания. Современные клеи позволяют использовать древесину с большей эффективностью, но вместе с тем возникли, конечно, и новые трудности, и новые проблемы.

Клеи

Стараниями многих ученых мужей и научных комитетов на проблему склеивания наброшен полог таинственности. В действительности же элементарная теория склеивания достаточно проста, трудна практика клейки. Как мы видели в [главе 2](#), любая поверхность обладает энергией - это следует из самого факта существования поверхности, твердой или жидкой. Если мы возьмем твердое тело и жидкость по отдельности - каждое вещество в контакте с воздухом, - то их поверхности будут иметь свои значения поверхностной энергии. Но если жидкость попадает на твердое тело и смачивает его, то энергия поверхности раздела между ним и жидкостью будет меньше суммы исходных энергий этих поверхностей в контакте в воздухе. Смачивание, таким образом, связано с понижением энергии и будет иметь место всегда при контакте жидкости с твердым телом*.

* Иногда при очень малой степени смачивания говорят об отсутствии смачивания.

Жидкость на поверхности твердого тела может тем или иным путем затвердеть, например она может замерзнуть. Энергия границы раздела при этом существенно не изменится. Следовательно, чтобы убрать затвердевшую жидкость с твердой поверхности механическим путем, придется воспользоваться энергией деформации, то есть приложить механическую силу. Таким образом, адгезия (приклеивание, прилипание) в принципе очень похожа на когезию (внутреннее сцепление). Принципиальной разницы между прочностью склейки и прочностью твердого тела нет. Обычно энергия поверхности раздела между клеем и твердым телом несколько меньше энергии свободной поверхности прочного тела, но эта разница не слишком велика. К тому же она и не имеет особого практического значения; реальная прочность все равно значительно меньше, чем, казалось бы, должна быть. Причины слабости адгезии сегодня мы понимаем, пожалуй, хуже, чем причины малой фактической прочности. Несомненно лишь одно - они имеют сходный характер.

Таким образом, любые два твердых тела можно приклеить одно к другому, если мы найдем жидкость, которая будет смачивать их обоих и затем затвердевать. Трудности здесь носят чисто практический характер. Дерево очень хорошо клеится замерзшей водой - такая склейка успешно пройдет большую часть обычных испытаний. Столярный, или мездровый, клей можно рассматривать как модификацию именно такого клея - лед, температура плавления которого поднята до более приемлемого уровня. Мездровый клей - то же самое, что и подаваемое к столу желе, лишь воды к желатину добавлено поменьше, а сам желатин может быть получен из костей, кожи, копыт, рыбы и т.д. Концентрированный раствор желатина размягчается при нагреве до 70-80°C. Намазанный на древесину, он прочно прихватывается к ней при охлаждении, и соединение вскоре готово. К сожалению, этот процесс легко обратим при нагревании или намокании. Кроме того, желатин - прекрасная пища для грибков и бактерий. Поэтому мездровый клей пригоден для использования только в закрытых помещениях. Несмотря на это, его применяли в первых самолетах. Места склейки покрывали защитным слоем лака, но это не всегда достигало цели. Тот же клей в спиннинговых удилищах защищается от воздействия внешней среды путем пропитки всего удилища в формалине. Такая обработка не могла

применяться к самолетам только из-за размеров их конструкции. Как бы плохи ни были желатиновые клеи, их конкуренты - гуммиарабики и клейстеры, которые варились из некоторых сортов муки, - уступали им. Но как ни странно, намного лучший клей был известен давным-давно, веками оставаясь в тени. Еще древние египтяне использовали в качестве клея казеин, а средневековые художники применяли его как растворитель для красок. Затем с начала XIX века им начали клеить в Германии и Швейцарии. Не ясно, почему казеин раньше не использовался в технике. Но примерно с 1930 года он стал признанным клеем для самолетов и яхт, сделав реальностью деревянные самолеты и современную оснастку яхт.

Казеин - это содержащаяся в молоке сыворотка, и, следовательно, он подобен сыру. Сыворотка растворима в щелочной воде, но не растворима в кислотах. Поэтому она выделяется из молока любой слабой кислотой, для детского питания казеин получают с помощью сока ревеня, для технических нужд - воздействием слабой соляной кислоты. Выделенную сыворотку можно снова растворить в воде, содержащей немного каустической соды. Казеин медленно реагирует с известью, образуя нерастворимый казеинат кальция.

Казеиновый клей продается в виде сухого белого порошка, состоящего из высушенной сыворотки, каустической соды (или другой щелочи) и извести. Если этот порошок замесить на холодной воде, он прежде всего растворяется, образуя белую, похожую на сметану пасту а затем медленно затвердевает. Этот клей очень прост в применении; единственное, о чем следует помнить, - это о том что крышка банки с клеем при длительном хранении должна быть плотно закрыта, так как в противном случае в банку будет попадать влага и преждевременно пойдет реакция образования казеината кальция. Казеиновый клей схватывается за один-два дня, причем швы получаются более или менее влагостойкими. Однако, хотя казеинат кальция и не растворим в воде, при намокании он немного размягчается. Казеиновые клеи очень широко использовались в самолетостроении во время войны, и вот однажды кто-то обнаружил, что разрывная прочность образцов влажного казеина составляет всего лишь пятую часть прочности сухого казеина. Не без оснований появились опасения, что прочность мокрых самолетов с казеиновыми склейками может быть в пять раз меньше прочности сухих самолетов. В смятении мы набрали сотню примерно одинаковых деревянных стабилизаторов на казеиновом клее. Половину из них опустили на 6 недель на дно пруда, вторую половину держали сухой. Тем временем подготовили установку, которая нагружала стабилизаторы примерно такими же силами, какие действовали на них в полете; когда все было готово, мы испытали всю партию. К нашему удивлению, все стабилизаторы ломались примерно при одной и той же нагрузке под аккомпанемент многочисленных вздохов облегчения. Причина такого счастливого исхода поучительна. Дело в том, что распределение напряжений в склейке далеко не однородно. В типичном случае, показанном на рис. 41, практически вся нагрузка воспринимается концевыми участками склейки и очень небольшая ее часть передается через центральные области шва. Это один из вариантов уже знакомой нам концентрации напряжений, которая так много значит в технике и науке о материалах. Между прочим, в результате прочность клеевого соединения зависит главным образом от его ширины, а не от площади. Кстати сказать, то же самое справедливо и для механических соединений: основную нагрузку несут первый и последний болты (или заклепки). Это одно из обстоятельств, которые отравляют жизнь конструктора.

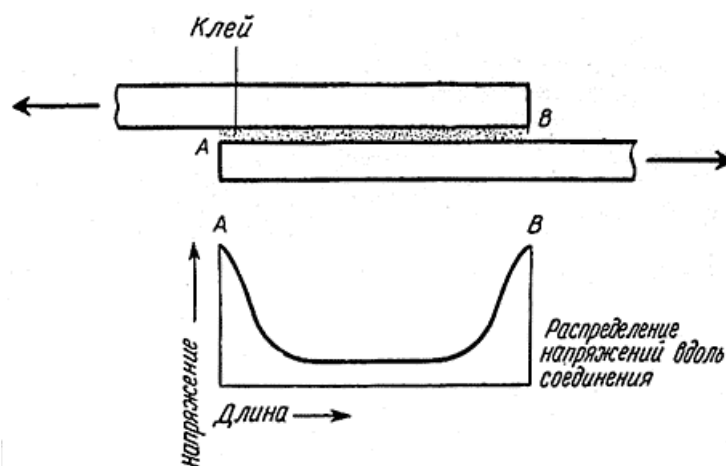


Рис 41. Клеевое соединение внахлестку; внизу показано распределение напряжений вдоль соединения. Максимальное напряжение - в точках А и В.

Итак, казеин в твердой хрупкой форме передает нагрузку в лучшем гуковском стиле. Когда напряжения на концах склейки достигают прочности сухого казеина, в соединении появляются трещины со своими собственными местными концентрациями напряжений, в конце концов трещина проскакивает через середину клеевого соединения примерно так, как это было бы в стекле.

Влажный казеин очень похож на мягкий сыр, и его поведение не имеет ничего общего с гуковским. В результате в местах концентрации напряжений, у концов склейки он интенсивно течет, передавая часть нагрузки на центральную часть клеевого шва. Поэтому подобные казеину клеи снимают некоторые проблемы, в частности прочность склейки в сухом и влажном состояниях почти одна и та же. Это, конечно, превосходная характеристика и одна из причин популярности казеина. Если бы мир был стерильным, казеин был бы практически идеальным клеем. К сожалению, казеин представляет собой, как мы уже говорили, смесь сыра и извести и с течением времени портится так же, как и сыр.

Его последние часы напоминают заключительный этап жизни камамбера: казеин превращается в жидкость с дурным запахом и выползает из соединений, оставляя после себя лишь грязные пятна. Интересно, что добавка фунгицидов в клей не улучшает его.

Все это заставило предпринять значительные усилия (на них ушли годы), чтобы разработать синтетические смолоподобные клеи, основанные на полимерных веществах. Пожалуй, лучшим и наиболее долговечным решением было использование в те годы фенол-формальдегидной смолы, или бакелита. В исходном состоянии бакелит представляет собой либо жидкость, напоминающую по виду патоку, либо сухой порошок. Под действием тепла и давления порошок становится жидкостью, которая со временем затвердевает, если действие тепла и давления продолжается. Получившееся твердое нерастворимое вещество практически не подвержено гниению. Фенол-формальдегид стал основой целой серии действительно великолепных клеев. Правда, использовать их можно лишь тогда, когда допустима тепловая обработка при температуре около 150° С. Важно также, чтобы при склейке не было заметного зазора в соединении. Поэтому операция склейки на практике должна выполняться на гидравлических прессах с подогревом. Такая склейка оказалась очень удобной только в производстве фанеры, где она имела огромный успех.

Фенол-формальдегидные клеи позволили получать хорошую водостойкую фанеру. Но проблема клеевых соединений в самолетах и на судах оставалась нерешенной, потому что на практике оказывается трудным аккуратно нагревать стыки в больших конструкциях. Вообще говоря, фенол-формальдегидные смолы могут твердеть и без нагрева, но для этого в них следует добавить большие количества химических катализаторов, способствующих твердению. Такими катализаторами служат сильные кислоты, которые разрушают древесину да еще и оказываются токсичными.

Первые синтетические клеи для сборки деревянных конструкций были основаны на карбамидной смоле, которая может твердеть со значительно более слабыми катализаторами. Эти первые клеи были довольно хорошими, но, надо сказать, таили в себе некоторые опасности для конструкций. Для предварительно хорошо пригнанного шва тонкая клеевая прослойка была достаточно надежной. Но когда соединение было подготовлено плохо, так что слой клея был толстым, усадка и внутренние напряжения, сопровождающие его твердение, разрушали склейку. Поскольку проверить качество подгонки шва после сборки и склепки невозможно, клеевые соединения были потенциальной причиной катастроф.

Другое неудобство состояло в том, что время твердения клея после добавки катализатора, а следовательно, и время, в течение которого с таким клеем можно было работать, ограничивалось несколькими минутами. Более того, о твердеющем клее нельзя было сказать, сколько минут назад в него был добавлен отвердитель. Эти обстоятельства в сочетании с известными человеческими недостатками часто приводили ко всякого рода ошибкам. Правда, впоследствии были разработаны отвердители, которыми можно было смазывать одну деталь, в то время как другая смазывалась самим клеем - твердение и схватывание начиналось лишь после того, как поверхности прижимались одна к другой. Дальнейшим шагом в сторону повышения надежности (учитывались все те же человеческие недостатки) была окраска клея и отвердителя в разные характерные цвета.

Положение дел с клеем к концу войны было, таким образом, следующим. Прекрасная и чрезвычайно водостойкая фанера стала универсальным материалом. В качестве сборочных клеев конкурировали казеин и карбамидная смола. Казеин был исключительно прост в использовании и обладал прекрасной прочностью как в сухом, так и во влажном состояниях, но в то же время при первой же возможности он катастрофически разлагался. Карбамидный клей не подвержен разложению, но сначала при склейке он требовал определенной сноровки, да к тому же случалось, что он ни с того ни с сего рассыпался. С тех пор карбамидные клеи были значительно усовершенствованы, а два теперешних синтетических клея, резорцин-формальдегидная и эпоксидная смолы, будучи, правда довольно дорогими, обладают практически всеми необходимыми достоинствами. Нужно лишь иметь в виду, что эпоксидная смола часто вызывает воспаление

Тогда необходимо сделать выбор из десятков современных клеев, то главными аргументами за и против обычно служат легкость применения, долговечность и стоимость. Правильно сработанное соединение при использовании любого хорошего клея бывает прочнее окружающей древесины. Как правило, разрушение происходит не по самому шву, и слой клея оказывается покрытым тонким слоем древесины.

Гвозди и шурупы не увеличивают прочности хорошего клеевого шва, но в процессе твердения всякий клей требует, чтобы склеиваемые поверхности были плотно прижаты одна к другой, а это проще всего достигается с помощью гвоздей и шурупов. Ну, а коль уж гвоздь забит, нет особого смысла вытаскивать его после схватывания клеем. Более того, если склейка по каким-либо причинам оказалась неудачной, механическое крепление будет полезной страховкой. В те времена, когда был еще только казеин, в тропиках о некоторых самолетах говорили, что они собраны на гвоздях без шляпок. В большинстве случаев это было, конечно, клеветой, но я сам несколько раз был свидетелем того, что это не так уж далеко от истины. Лично я, когда речь идет о клеях, не постеснялся бы надеть и ремень, и подтяжки.

Слоистая древесина и фанера

Использование древесины всегда было связано с заботами о том, чтобы получить материал нужных размеров и быть уверенным, что полученный материал не содержит скрытых дефектов. Давно прошли те времена, когда можно было купить огромные бревна сосны каури из Новой Зеландии или желтой сосны из-под Квебека, которые были практически совершенными. В наше время в технике чаще всего используется слоистая древесина. Бревна, как правило, разрезаются на сравнительно небольшие куски, которые затем склеиваются в пакеты; делается это обычно на гидравлических прессах с помощью синтетического клея. Таким способом можно получить листы любых размеров. При этом на деле

используется весь объем как больших, так и малых деревьев; любой серьезный дефект нетрудно выявить и провести отбраковку. Легко могут быть изготовлены клееные элементы изогнутой формы на дорогах Англии нередко создают помехи движению грузовики, перевозящие огромные деревянные арки для разного рода архитектурных сооружений. Нехватка высококачественной древесины для авиа- и судостроения могла бы стать серьезной проблемой во время войны, если бы обычная древесина не доводилась до нужных кондиций путем создания слоистых материалов.

Эти слоистые материалы были просто-напросто обычной древесиной, разрезанной на куски и затем снова склеенной. Но существовал, однако, печальный опыт материалов, известных как “улучшенная древесина”, свойства и судьба которой были, казалось, предопределены этим громким названием. Как “улучшалась” древесина? Сначала ее пропитывали некоторым количеством смолы, а затем прессовали до значительно большей плотности. Считалось, что при этом механические свойства материала должны улучшиться. И они действительно улучшались, но, как правило, лишь пропорционально увеличению плотности. В то же время у прессованной древесины значительно снижалась трещиностойкость. Что еще хуже, этот материал разбухал в воде до своих начальных размеров, и разбухание это было почти всегда непредсказуемым и необратимым. И все-таки какое-то время прессованная древесина использовалась для изготовления пропеллеров некоторых типов самолетов.

Совсем иное дело - фанера, которую, пожалуй, следует считать новым и чрезвычайно удачным материалом. Она получается путем склеивания трех или более листов шпона, то есть тонких слоев древесины с перекрестным направлением волокон. Шпон либо нарезается тонкими слоями из бревна на машине, очень напоминающей большой рубанок, либо получается с помощью лущения. Круглое бревно сначала прогревается в течение суток в паровой траншее, а затем устанавливается на специальном лущильном станке. Бревно вращается в станке, а длинный нож врезается в него и начинает по кругу снимать тонкие слои древесины с такой скоростью, что на это зрелище прямо-таки залюбуешься. Далее шпон режется, сушится, из него удаляются дефектные места, и наконец, спрессованный и склеенный на больших прессах, он превращается в фанеру.

Поначалу фанера склеивалась растительными или животными клеями, поэтому она совершенно лишена была влагостойкости и чуть ли не стала почти что бранным словом. Внедрение фенольных клеев все изменило и, между прочим, занятнейшим образом проиллюстрировало, как может трансформироваться отношение к материалу. Современная фанера на фенольных клеях совершенно не поддается воде - она не расслаивается, когда намокает. Поэтому она широко используется в судостроении.

Как и следовало ожидать, размер фанеры при колебаниях влажности изменяется вдвое меньше, чем у обычной древесины. Это значит, что максимальные изменения размеров в двух направлениях составят около 5%. На практике эта величина значительно ниже. Но если поверхностные слои высушиваются, например на горячем солнце, они оказываются под напряжением, растягивающим их поперек волокон. В результате фанера может покрыться густой сеткой малых трещинок. Сами по себе они не слишком страшны, но незакрашенные складки становятся ловушками для влаги и бактерий, что таит в себе известные неприятности. Горячее прессование убивает почти все бактерии и грибки, но после растрескивания попадающая на древесину инфекция в сочетании с водой приводит к быстрому ее гниению.

Аэропланы

Никогда не следует относиться с презрением к каким бы то ни было конструктивным формам, в том числе и к биплану, построенному на струнах и стержнях. Главный показатель, который определяет выбор материалов и конструктивных форм,- это отношение нагрузки на конструкцию к ее размерам. Когда нагрузки сравнительно невелики по отношению к размерам, обычно лучше сосредоточить сжимающие силы в нескольких компактных стержневых элементах (стойках) и распределить растяжение в обшивке и струнах. Именно так построены оснастка парусных кораблей, палатки, ветряные мельницы. С некоторыми оговорками это справедливо и для воздушных шаров. Любые другие решения в подобных случаях приводили бы к тяжелым, дорогим и менее удобным конструкциям.

По понятным причинам все первые самолеты имели очень малую нагрузку на крыло. Размеры во многих случаях были не намного меньше, чем у соответствующих современных самолетов, ну а вес такого самолета составлял менее 10% веса современной машины с жесткой обшивкой. В таких условиях конструкция из ткани, натянутой на каркас из древесины и бамбука, была и логичной, и эффективной. При мощности тогдашних двигателей аэроплан другой конструкции просто не поднялся бы с земли. Форма биплана позволяла построить отличную решетчатую ферму и кессоны - очень жизнеспособные и легкие конструкции. Массивные элементы были нужны только для того, чтобы воспринимать сжатие, и, поскольку главная опасность в таких условиях крылась в потере устойчивости, эти элементы должны были быть возможно более простыми: лучше всего этим целям служили бамбук и ель. Для растянутых элементов использовалась рояльная проволока. Однако соединение бамбуковых элементов, работающих на растяжение, всегда было серьезной проблемой.

Такой способ конструирования давал отличные прочные самолеты лишь тогда, когда конструктор твердо знал, какой элемент будет нагружаться растяжением, а какой - сжатием. Ведь если стойка при необходимости и могла принять на себя растяжение, то уж проволока никогда не сопротивляется сжатию. В некоторых бипланах посложней не всегда можно было проследить пути, по которым передается нагрузка. Недаром в ходу была банальная шутка: лучший способ проверить правильность оснастки крыла биплана - посадить в середину канарейку; если ей удастся вылететь наружу - в конструкции какой-то неполадок.

Печально известен случаи с бипланом “Кафедральный собор”. Его создатель С.Ф. Коуди питал пристрастие к сложной путанице расчалок, но ему не хватало технической грамотности. Мой дед, один из пионеров авиации, рассказывал мне, что однажды он долго спорил с Коуди по поводу того, будет ли в полете какой-то элемент испытывать растяжение или сжатие. Коуди настаивал, что элемент будет растянут, и поставил струну. Правота моего деда обернулась для Коуди трагически - он погиб через несколько минут после взлета. Есть какая-то ирония судьбы в том, что ситуация с “Кафедральным собором” была прямо противоположна неприятностям с кладкой каменных соборов: они рушились из-за того, что в тех местах, где, по предположению строителей, должно было быть сжатие, оказывалось растяжение.

Потребовалось немало времени и жизней, прежде чем были в достаточной степени изучены и поняты условия нагружения, в которых оказывается самолет в полете. Англичане во многом обязаны этим достижением группе одаренных людей, собравшихся в Фарнборо в первую мировую войну (знаменитая Чадлайфская кучка *).

** В эту группу входили Червелл, Тизард, Джонс, Тэйлор и Грин, в то время эти очень молодые люди жили неподалеку от Фарнборо все в одном домике, который назывался “Чадлайф”. Надо думать, не часто случается, что под одной крышей неказистого домика собирается такая коллекция умов. - Прим. автора к русск. изданию.*

Принципы расчета и испытаний самолетов на прочность остаются и сейчас, в эпоху сверхзвуковых истребителей, во многом теми же, что и в годы деревянных бипланов, хотя в практике этих операций появилось много нового,

Когда самолет спроектирован и построен, полноразмерный образец его должен быть проверен на прочность и жесткость. Испытания на жесткость сравнительно просты, но прочностные испытания иногда требуют громоздких и сложных приспособлений. В 1914 году самолет обычно переворачивали вверх ногами и затем на плоскости крыла укладывали мешки с песком или свинцовой дробью, распределяя их так, чтобы они представляли аэродинамическую нагрузку на самолет в самых опасных условиях полета, например в случае выхода из пике. Довольно скоро нагрузки на самолет стали слишком большими и воспроизвести их этим методом уже не удавалось (хотя мешки с дробью иногда все еще используются для кое-каких простых испытаний). В наши дни обычно прибегают к помощи гидравлического домкрата, который передает нагрузку на крыло через изошренную систему рычагов, напоминающую родословное древо. Каждая ветвь этого древа заканчивается креплением на поверхности крыла. Благодаря тому, что точек крепления много, распределенный характер аэродинамической нагрузки можно имитировать очень хорошо (рис. 42).

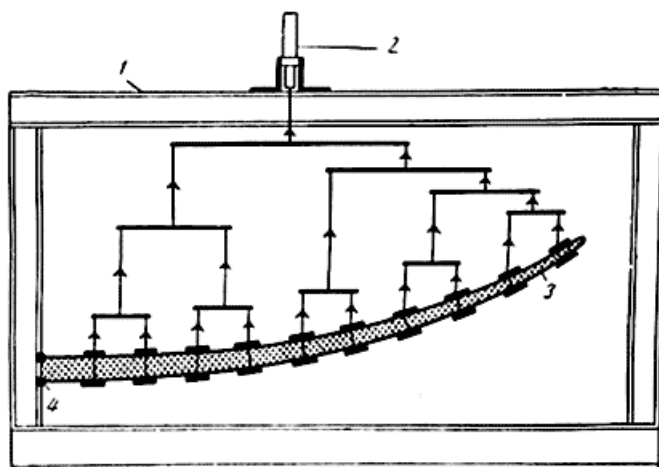


Рис. 42. Схема испытания крыла самолета. Нагрузка прикладывается к крылу в сотнях точек, распределенных по обеим поверхностям. 1 - стальная рама; 2 - гидравлический домкрат; 3 - крыло; 4 - имитация крепления к фюзеляжу.

Лучшие образцы деревянных бипланов, такие, как “Авро-504” и серия “Мотс” (“Мотылек”), были почти вечными. Разрушить их можно было, разве что врезав со всего маху в землю. Чувство конструктивной надежности в полете на таких самолетах, которые держались на стойках и расчалках, было очень приятным, настроение могли испортить лишь двигатели. Монопланы с консольными крыльями казались намного опасней.

Однако с ростом нагрузок общая тенденция проектирования твердо повернулась в сторону монококовой конструкции, то есть моноплана с жесткой обшивкой. Нагрузки в ней по возможности воспринимались обшивкой. Тонкая мембрана отлично сопротивляется растяжению; трудности связаны здесь с тем, как заставить ее воспринимать сжатие без выпучиваний. На практике этот вопрос решил компромисс: тонкая обшивка разделила нагрузку с лонжеронами и стрингерами. Вся эта довольно сложная конструкция образовала жесткую на изгиб, а следовательно, устойчивую против выпучивания оболочку.

Отличным примером первых таких самолетов был DC-3 позже известный как “Дакота”. Затем последовали “Спитфайер” и многие другие знаменитые самолеты второй мировой войны. Все они были металлическими, алюминиевые листы обшивки клепались к стрингерам уголкового профиля. Такая конструкция оказалась по весовой эффективности

практически эквивалентной деревянно-тканевой. Преимуществами ее были более гладкая наружная поверхность и силовая рама, почти полностью исключавшая уход за ней. Конструкция такого типа остается и сейчас основной при проектировании самолетов.

В 1939 году широко распространилось мнение, что деревянным самолетам пришел конец. Может быть, так оно и случилось бы, не возникни во время войны нехватка алюминия, а также оборудования и квалифицированных кадров. Кроме того, мебельные фирмы сократили производство, да и время разработки деревянного самолета всегда было намного короче, чем металлического.

Один многоопытный эксперт заработал своего рода славу, категорически заявив, что построить современный самолет из дерева технически невозможно. Едва успели просохнуть чернила на его бумагах, как появился “Москито”. Этот деревянный самолет был одной из самых удачных машин, он был построен в 7781 экземпляре. Быть может, немцы не любили его больше, чем любой другой английский самолет *.

* Советскому читателю памятен, конечно, знаменитый биплан ПО-2 конструкции Н.Н. Поликарпова. - *Прим. перев.*

Кроме “Москито” и учебно-тренировочных машин, огромную серию деревянных аппаратов составили планеры. Большинство планеров имело значительные размеры, размах их крыла доходил до 35 метров. Зачастую они предназначались для переброски танков и другого тяжелого снаряжения. Вначале предполагали строить планеры в расчете лишь на один полет. Однако это оказалось непрактичным: необходимы были машины для тренировок, нужно было перебазировать планеры с аэродрома на аэродром в связи с изменениями стратегической и тактической ситуаций и - что более важно - рука не поднималась строить аэроплан только для одного полета. Практически эти планеры были очень похожими на самолет, разве что не имели двигателя.

В целом деревянный самолет был чрезвычайно удачным и, я думаю, сыграл немалую роль в войне. Однако он задал в свое время немало разного рода технических задач, которые с головой завалили работу небольшую группу химиков-органиков Авиационного центра в Фарнборо. Значительным в этой работе оказался вклад молодого кембриджского биолога Марка Прайера, специально отозванного из прожекторной команды. Во многом благодаря Прайеру сократилось число аварий, и большинство планеров долетало до Франции в удовлетворительном состоянии. Немало солдат и авиаторов обязаны жизнью этому неутомимому биологу, который с аэродрома, мчался к микроскопу, от микроскопа - на самолетный завод, оттуда опять к микроскопу и так на протяжении нескольких лет.

Взвешивая сейчас все обстоятельства этой истории, трудно утверждать, что можно было бы заблаговременно предвидеть все возникшие тогда проблемы. К старым обтянутым тканью бипланам не было никаких претензий: их собирали из небольших кусков дерева, содержали в добротных сухих ангарах, они сами по себе хорошо вентилировались. С самолетами военного времени все было не так. Прежде всего новые машины имели монококовую конструкцию со сравнительно тяжелыми лонжеронами и стрингерами, жестко приклеенными к толстым фанерным стенкам и обшивке. (Мы еще поговорим позже о некоторых последствиях, к которым привело такое изменение конструкции). Самолет был разделен на большое число плохо вентилируемых и труднодоступных отсеков. В отсеках самолетов, оказавшихся под английским или тропическим дождем, воздух быстро становился затхлым, на дне их часто появлялись лужи. В таких условиях нескольких месяцев вполне хватало не только на разложение клея, но и на гниение древесины. Нелегко наладить вентиляцию, если конструктор о ней забыл, и очень часто самое лучшее, что можно было сделать, это оставлять все контрольные люки открытыми во время стоянки на земле.

Однако во многих аэропланах свободная вода собиралась часто в самых недоступных местах. Нужно было позаботиться, следовательно, о дренажных отверстиях, делать их следовало не где попало, а в самой нижней точке каждого отсека. Поначалу из этого почти ничего не получилось. Просверленные в фанере отверстия изнутри окружала небольшая корона из щепок, которую нельзя было не только удалить, но и увидеть. Щепки быстро забивались всяким пухом и грязью, блокировали отверстие, и снова появлялась лужа. Пришлось прожигать отверстия раскаленным прутом - казалось бы, очевидное решение, стоило лишь об этом подумать заранее. Такая процедура применялась как к самолетам, так и к торпедным катерам.

Проженные дренажные отверстия, безусловно, помогали, но возникла новая проблема - грязь, которая забрасывалась вместе с водой не только в дренажные, но и во все другие отверстия колесами самолета при взлете и посадке. Вода стекала, оставляя слой влажной грязи, часто содержащей семена различных растений. Семена попадали при этом примерно в те же условия, в которых прорастают семена огурцов или салата, завернутые во влажную тряпочку. Такой огород в самолете был, конечно, ни к чему.

В целом эти неприятности были особенно опасными в планерах. Самолеты, естественно, летают более часто, а сквозняки в полете идут на пользу конструкции и во вред грибку. Но планеров делали все больше и больше, в ангарах для них не было места, так что их держали под дождем на задворках аэродромов. Более 5000 планеров ожидали начала военных действий. “Эксперты” не могли уследить за состоянием всех этих машин, поэтому по инструкции Марка Прайера они должны были докладывать ему, учуяв исходящее от планера зловоние.

Причин зловония в деревянной конструкции может быть три: отсутствие дренажа, мыши и гниение. Все запахи одинаково неприятны и трудно различимы между собой. Дренажные запахи исходят от недренируемой сточной воды, повреждающей конструкцию. Мыши, забираются в самолет за добычей - под досками пола они находят крошки от

сэндвичей рабочих-сборщиков. К тому времени, когда грызуны съедают все крошки, они забывают путь наружу и, голодные, начинают пожирать изоляцию проводов. С мышами Прайер боролся с помощью кошек. Проблема гниения была более сложной и трудной. В тогдашних обстоятельствах некоторые типы разложения в той или иной степени были почти неизбежными в большинстве планеров. В военное время не до погони за совершенством, нужда заставляла отбраковывать лишь планеры, которые были поражены в опасной степени, пытаться приостановить гниение тех планеров, в которых оно только начиналось. Сделать это было непросто, так как существует около сорока различных типов гниения, степень повреждаемости от них неодинакова и не всегда пропорциональна внешним проявлениям.

Проблема гниения все время не давала нам покоя, но были и другие не менее серьезные проблемы. Как я уже сказал, общая схема конструкции этих аэропланов сильно отличалась от старых бипланов. Главные лонжероны и другие основные элементы конструкции представляли собой увесистые брусья слоистой древесины, имевшие несколько дюймов в поперечнике; с трех сторон к ним обычно примыкали фанерные стенки, воспринимавшие сдвиг, и обшивка. Но разбухание и усадка еловых лонжеронов вдвое превышают разбухание и усадку фанеры, к которой они приклеены. Естественно, в результате этой разницы возникают значительные напряжения в клеевых соединениях двух разнородных материалов (рис. 43).

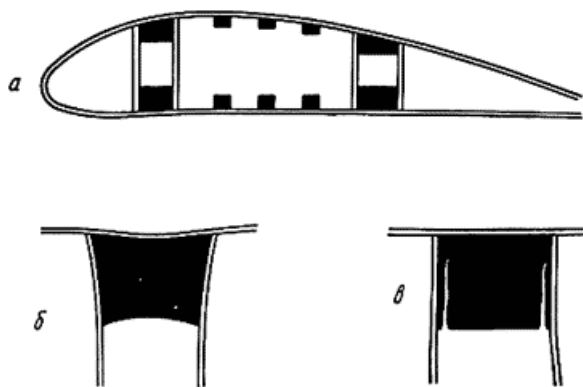


Рис. 43. Типичное для времени второй мировой войны деревянное крыло самолета.

Темная часть конструкции - из слоистой ели, светлая - фанера.

a - поперечное сечение;

б - еловая полка лонжерона деформировалась больше, чем фанерные обшивка и стенки,

в - разрушение полки лонжерона.

Большие куски древесины требуют довольно долгого времени чтобы прийти в равновесие с влажностью окружающей среды. Поскольку погода в Англии очень переменчива в деревянных деталях самолетов не успевали возникнуть большие напряжения и, пока самолеты были в Англии, особых оснований для забот не было. Но стоило им попасть за границу, ситуация резко менялась. Во многих странах долгие сухие периоды сменяются не менее длительными дождями, в течение каждого из этих отрезков времени древесина успевает как полностью высушиться, так и до предела пропитаться водой; усадка и разбухание огромны. Вот тут-то и начинаются серьезные заботы. Вдоль склейки появляются большие напряжения. При плохом состоянии клея разрушается соединение; если оно выдерживает, разрушается древесина вблизи склейки. Спасти эти самолеты от такой напасти можно было, лишь отправив их назад в Англию.

Неприятности со склейкой возникали не только от самих клеев, но и по другим причинам. Наихудшим случаем было так называемое “закалочное” разрушение. Вы представляете себе, конечно, что способов испытаний клеевых соединений, которые фактически являются неотъемлемой частью самолета, не существует. Испытать их можно только ценою поломки всего самолета, а это значило бы наносить ущерб самим себе. Поэтому остается полагаться в значительной степени на внешний вид склейки да на контроль в процессе производства. И вот вскоре после того, как было развернуто крупносериальное производство деревянных аэропланов, выяснилось, что некоторая часть авиационной фанеры вообще не склеивалась. Места склейки, выполненной со всей необходимой аккуратностью, выглядели вполне нормально, но не имели никакой прочности. В некоторых случаях их легко можно было разорвать руками. Хуже всего то, что невозможно было сказать, какой лист фанеры плох, а какой - хорош.

А дело оказалось вот в чем. Древесина состоит из трубочек с довольно тонкими стенками. Когда она разрезается, трубки на срезах очень редко бывают параллельны их поверхности. Поверхность образуется большим числом трубок, выходящих наружу под малым углом, то есть она представляет собой набор наклонных отверстий. В то же время операция разрезки в микроскопическом масштабе - действие довольно грубое, поэтому кромки среза у трубок повреждены и механически довольно слабы. Чтобы склейка была надежной, клей должен проникнуть в эти трубки на некоторую глубину, схватывание происходит тогда между их неповрежденными частями.

Если что-то мешает клею просочиться в трубки, склейка произойдет между их поврежденными кромками, которые при малейшей нагрузке легко разрушаются. В процессе изготовления “закаленной” фанеры кромки трубок загнуты внутрь горячими плитами пресса. Они преграждают путь клею внутрь трубок, и клеевое соединение не имеет прочности (рис. 44).

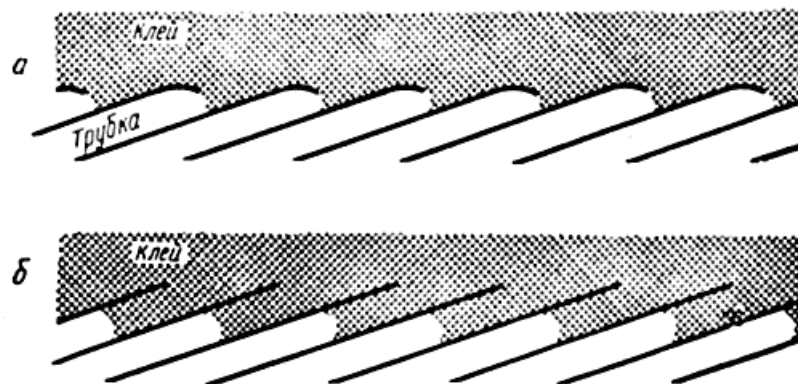


Рис. 44. «Закаленная» (а) и хорошо зачищенная (б) фанера. В первом случае выходящие на поверхность кромки клеток в процессе горячего прессования загнулись внутрь и клей не может попасть в трубочки древесины. Во втором случае клей попадает в трубочки на значительную глубину, обеспечивая надежную склейку

Такая фанера была смертельно опасной, в ней крылась причина многих аварий и жертв. Единственный путь избежать этих опасностей заключался в снятии поврежденного слоя фанеры путем зачистки поверхности шкуркой. Зачистка должна была быть основательной, легкое царапание ничего не давало. Определить, какие листы в дальнейшем не поддадутся склейке, заранее не удавалось, поэтому надо было зачищать всю фанеру, которая использовалась в самолетостроении. Оказалось, что это не так-то просто организовать. Полагаться на ручную зачистку оказалось невозможным, и была разработана система механизированной обработки, после которой на фанере ставился специальный штамп.

Древесина - не тот материал, который может все стерпеть, и громадным числом неприятностей деревянные аэропланы обязаны небрежности, которая могла встретиться на любом этапе их создания и эксплуатации. Некоторые конструкторы считали, что дерево "обязано" вести себя подобно металлу. И если они совершали ошибки по этой причине, то, по их мнению, виновным было дерево, а не они сами. Военные авиатехники, особенно новички, были воспитаны в почтении к металлу, и для работы с древесиной им зачастую не хватало терпения. Бывало и такое: один техник, в гражданской жизни - владелец гаража, каждое утро выстраивал свои самолеты на асфальтированной площадке и основательно поливал их из шланга.

На заводах не хватало опытных контролеров, они работали с перегрузкой. И если некоторые ошибки объяснялись непониманием каких-то тонкостей, то, боюсь, что остальные - только преступной глупостью и безответственностью. Всегда найдутся люди, для которых ничего не значат абсолютно очевидные технические нормы и последствия отступлений от них. Склеивание - работа, требующая не столько специальных навыков, сколько ответственности. Малейшая небрежность может иметь опасные последствия.

С этим, я думаю, связаны истинные трудности изготовления деревянных аэропланов. Нужны они были в больших количествах, и делали их в спешке неквалифицированные рабочие. Древесина же - материал для мастера, она не ответит добром на отступления, неизбежные в чрезвычайном положении.

По всем этим причинам деревянные самолеты теперь в немилости. Однако лишь очень смелый оракул скажет, что им никогда не вернуться. Нельзя предсказать, в какой области техники древесина появится в следующий раз. Сейчас есть очень хорошие автомобили с деревянной рамой. Говорят, их не обошел своей милостью коммерческий успех.

Глава 7

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, или КАК ДЕЛАТЬ КИРПИЧИ С СОЛОМОЙ

И пришли надзиратели сынов Израилевых и возопили к фараону, говоря: "Для чего ты так поступаешь с рабами твоими? Соломы не дают рабам твоим; а кирпичи, говорят нам, делайте. И вот рабов твоих бьют; грех народу твоему". Но он сказал: "Праздны вы, праздны; поэтому и говорите "Пойдем, принесем жертву Господу". Пойдите же, работайте. Соломы не дадут вам, а положенное число кирпичей давайте".

Библия. Исход. Глава 5

Со времен фараона, у которого были трудности с добавлением соломы в кирпичи, человек всегда использовал те или иные армированные материалы. Тем не менее особое положение как прочные материалы они заняли лишь совсем недавно.

Можно сказать почти наверняка, что добавление рубленой соломы в египетские кирпичи преследовало ту же цель, к которой стремились инки и майя, добавлявшие в свою керамику растительные волокна: предупредить растрескивание глины при быстрой сушке на солнце. Египтяне не обжигали свои кирпичи, да это и не имело особого смысла, потому что вряд ли в Египте стоило опасаться дождя. Глина во влажном состоянии образует отличную податливую массу, но ее усадка при сушке очень существенна и проблема сушки глины напоминает проблему выдержки древесины. Если не сушить медленно, глина будет растрескиваться. Египетское солнце сушит блестяще, но уж очень быстро, поэтому полезно добавить немного соломы чтобы уменьшить растрескивание. Возможно, что упрочняющее влияние волокон на глину после сушки было лишь побочным эффектом.

Однако даже довольно малые добавки волокна оказывают существенное влияние на прочность и вязкость сравнительно хрупких непрочных материалов. Можно привести много таких примеров. Вот один из них. Прежде у английских строителей был обычай добавлять в штукатурку стен немного волоса. Я помню даже, как в детстве один штукатур говорил мне, что для этой цели бычий волос гораздо лучше коровьего, потому что бык, конечно же, намного сильнее коровы. Я никогда не экспериментировал ни с бычьим, ни с коровьим волосом, так что собственной точки зрения на сей счет не имею. Но я добавлял сырую бумажную массу в алебастр. Великолепные результаты этой операции показаны на рис. 45.

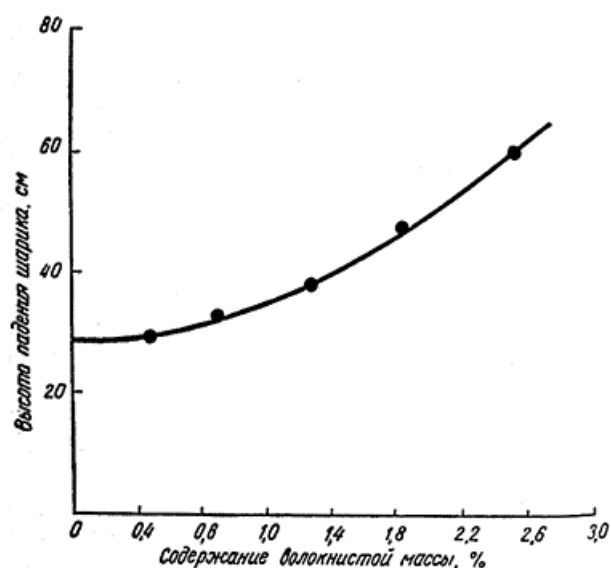


Рис. 45. Влияние добавки волокон на ударную вязкость алебастра (испытание падающим шариком)

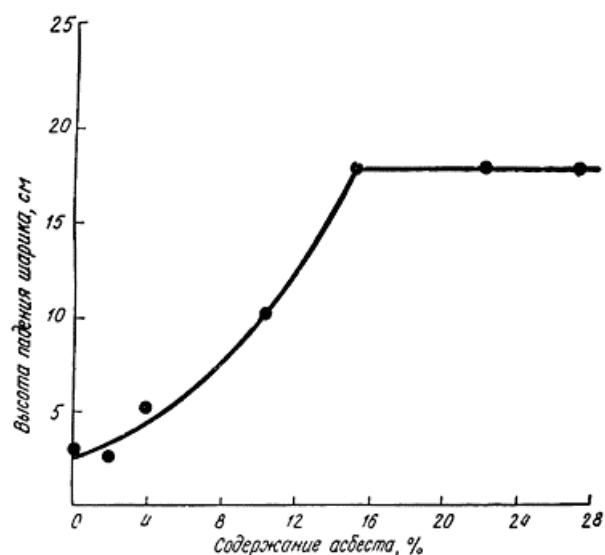


Рис. 46. Влияние добавки волокон на ударную вязкость фосфатного цемента (испытание падающим шариком)

Очевидна очень резкая тенденция к увеличению ударной вязкости, даже совсем небольшие добавки волокна дают весьма ощутимое улучшение. К сожалению, добавка волокон в мокрый алебастр ведет к его быстрому загустению, иногда смесь с 2-3% волокон уже невозможно перемешать. Правда, с этим злом можно как-то бороться, выбирая другие типы цементов и уплотняя полученную смесь под прессом. На рис. 46 показано влияние асбестовых волокон на ударную вязкость фосфатного цемента (этот цемент очень похож на тот, которым пользуются зубные врачи).

Картина напоминает предыдущую с той лишь разницей, что содержание волокон в этом случае может быть большим, следовательно, возрастут и прочность, и вязкость. Во время второй мировой войны самые тяжелые потери на море приходились на центральные районы Атлантики где невозможно было обеспечить прикрытие с воздуха Покойный Джеффри Пайк предложил довольно эксцентричный выход из положения: отбуксировать в Центральную Атлантику какой-нибудь айсберг чтобы использовать его в качестве базы для самолетов. Это была по-своему блестящая идея, но исследования показали что механические свойства естественного льда слишком неподходящи для ее реализации. Обычный лед очень не прочен при растяжении, трещины в нем распространяются легко (вот почему ледоколы могут зарабатывать себе на хлеб), и - что хуже всего - прочность льда очень не постоянна. Поэтому разбомбить или торпедировать айсберг не составило бы никакого труда. Но даже если бы он и не подвергся нападению, чтобы служить авиабазой он должен быть настолько большим, чтобы на его длине умещались по крайней мере две атлантические волны (во время шторма их бывает примерно 5-6 на милю) А расчеты показывали, что в этом случае он сломался бы, как балка при изгибе.

Пайк предлагал обойти эти затруднения, добавив в лед немного древесной пульпы. Ему удалось доказать, что около 2% обычной сырой бумажной массы, добавленной к воде перед замораживанием, резко улучшают свойства льда и вдобавок делают их более стабильными. Кривая прочности и вязкости льда в зависимости от добавок целлюлозного волокна очень похожа на кривые, показанные на рис. 45 и 46. Расчеты подтверждали, что в этом случае лед был бы достаточно прочным и весь проект оказался бы реальным. Предполагалось добавить древесную массу в воду и дать ей возможность

естественным образом замерзнуть в заливе Ньюфаундленда. Но с этой идеей пришлось расстаться, так как возросший радиус действия самолетов и общая военная обстановка на Атлантике сделали ее ненужной. Пожалуй, в некотором смысле об этом стоит пожалеть.

Вообще говоря, хрупкие материалы становятся более вязкими и прочными при очень малых добавках волокна потому, что само присутствие волокон тормозит и отклоняет трещины со своего пути. Вероятно, все это разыгрывается на внутренних поверхностях раздела. Сейчас трудно точно сказать, как это происходит, но, по-видимому, дальнейшие исследования прольют свет на механизм процесса. В той форме, о которой мы сейчас говорили, - довольно малый процент беспорядочно ориентированных волокон в хрупкой матрице, - комбинированные материалы не пользуются сейчас особым спросом (возможно потому, что сегодня никому не нужны кирпичи солнечной сушки или мобильные айсберги). Но я совсем не удивлюсь, если подобная идея, но в другом виде войдет в моду снова. В настоящее же время бытует мода на несколько иной способ использования волокон.

Те, кто работает в области волокнистых материалов, получают всякого рода доброжелательные предложения о схемах и принципах, которые следовало бы опробовать. Почти все эти советчики не учитывают того, что, если вы хотите получить новый материал, способный конкурировать с довольно хорошими существующими материалами, необходимо в заданный объем ввести большое число волокон. А вот здесь-то и начинаются реальные трудности.

Простые системы, о которых мы сейчас говорили, содержат примерно 2% коротких волокон, добавленных в матрицу. Такая матрица на некоторой стадии находится в более или менее жидком состоянии, и, чтобы ввести в нее волокна, достаточно размешать смесь ложкой. При большом содержании волокна такая операция оказывается на практике неудобной, процесс становится неуправляемым. Суспензии длинных тонких волокон в жидкости очень напоминают растворы, содержащие длинные тонкие молекулы. Оба типа веществ имеют тенденцию к загустению, с которой трудно справиться, пока не изучишь все ее особенности. В производстве бумаги (из которой сделана и эта книга) бумажная масса, то есть суспензия древесных волокон в воде, разбавляется до концентрации ~0,5% и именно в таком виде перерабатывается, так как все операции при этом облегчаются.

Папье-маше

Если содержание волокна превышает примерно 2%, добавлять волокна к матрице становится невозможным, приходится добавлять матрицу к волокнам. При этом все, естественно, изменяется. Почти всегда волокна плотно упаковываются, например в форме бумаги или ткани, а затем пропитываются в смоле или каком-либо другом связующем материале. Оказывается, что это тоже очень старая идея, принадлежащая все тем же египтянам. Оболочки египетских мумий, имевшие весьма сложные формы, делались из папье-маше. Этот материал получается наклейкой кусков бумаги на модель с помощью клейстера или гуммиарабика. Когда клей высыхает, оболочка снимается с формы и красится. В Египте в этих случаях зачастую в дело шли папирусы. Когда археологи отпаривают их по слоям, как правило, они уже непригодны для чтения, но, тем не менее, именно этот процесс помог обнаружить небольшое, по важному направлению в греческой литературе. Видимо, только так можно надеяться восстановить работы Сапфо.

Когда вышел из употребления папирус, исчезло и папье-маше. Возродилось оно, почти без всяких изменений, уже в XVIII веке. Особенно широко папье-маше из бумаги использовалось тогда во Франции для изготовления мебели. До самого последнего времени в Англии его применяли для рекламных макетов, а в войну из папье-маше делали топливные баки и другие части самолетов, Метод получения изделий из папье-маше вплоть до примерно 1945 года ничем не отличался от древнеегипетского, разве что вместо папируса использовалась бумага.

Поскольку подобные сведения могут оказаться полезными, стоит коротко рассказать, как делается папье-маше. Прежде всего из глины, пластилина или алебаstra должна быть сделана необходимая модель. Модель покрывается тальком, льняным маслом или силиконовым лаком, чтобы папье-маше к ней не прилипло. Можно использовать почти любую бумагу, но лучше всего мягкую. Самый хороший клей для наших целей - водянистая смесь мездрового клея и так называемой канцелярской пасты (крахмальной). По густоте эта смесь должна напоминать гороховый суп. Когда все готово, нарвите кусочков бумаги размером примерно в ладонь и замочите их в клее, пока они не станут совсем мягкими. Затем облепите этими листочками модель, продолжая занятие до тех пор, пока не получите нужную толщину. Когда все это полностью высохнет, вид у вашего изделия может оказаться не очень презентабельным, но не огорчайтесь - египтяне, наверное, испытывали то же чувство. Дело можно поправить, если зачистить все шкуркой и покрасить. Не поспешите на несколько слоев масляной краски, так как именно от этого зависит защита материала от непогоды. Влагостойкость такого изделия, конечно, неважная, но она не так плоха, как можно было бы предположить, а механическая прочность на удивление высока. Не пытайтесь использовать синтетический клей, иначе ваше изделие будет хрупким, возможно из-за хорошей адгезии.

Если бы у папье-маше сопротивление воде и грибкам не было бы хуже, чем даже у натуральной древесины, этот материал применялся бы гораздо шире, так как легкие и прочные оболочечные конструкции со сложными кривыми поверхностями всегда необходимы для изготовления автобусов, лодок, панцирей, ванн, мебели, тары, топливных баков и т.д. Однако столетиями использование папье-маше было ограничено отсутствием водостойких клеев, и человек вынужден был делать тяжелые легко уязвимые и трюедемкие оболочки из металла.

Пресс-порошки

В 1906 году доктор Бейкеленд обнаружил, что между фенолом и формальдегидом может протекать химическая реакция с образованием смолы. Вначале жидкая или немного тягучая, смола может стать после нагрева твердой, довольно тугоплавкой и нерастворимой. Бейкеленд был человеком весьма предприимчивым, к тому времени он успел уже сколотить некоторое состояние на изобретении и внедрении фотобумаги типа “Велоко”, но, по-видимому, _ даже он не очень-то рассчитывал на более или менее широкое применение своей смолы. Вначале она появилась в продаже в качестве заменителя натуральных смол в лаках и глазурях. Мне говорили, что огромная компания “Бакелит” начинала свою жизнь под вывеской “Лаковая компания Даммард”, выпустив на рынок три сорта глазурей: “Даммард”, “Даммардер”, “Даммардест”.

Сама по себе затвердевшая бакелитовая смола - твердое хрупкое вещество с небольшой прочностью, очень напоминающее натуральную смолу. Ее использовали как добавку к лакам, особенно в электротехнике для изоляции. Потом обнаружилось, что она превосходно клеит древесину в фанерном производстве. Но в чистом виде для конструктивных целей она не находила применения. Поворотным пунктом послужили наблюдения Бейкеленда - он обнаружил, что если к смоле до ее затвердевания добавить волокон, то это резко меняет ее прочность.

С этого и началось использование так называемых формовочных порошков. Они представляют собой смеси частично затвердевшей смолы и коротких целлюлозных волокон применяемых обычно в виде древесной муки. Такой сухой порошок насыпают в нагретую стальную пресс-форму. Здесь порошок размягчается, и под давлением получившаяся масса затекает во все уголки формы, после чего происходит необратимое твердение. Первой серийной деталью, сделанной по этой технологии, считается ручка рычага переключения скоростей автомобиля “роллс-ройс” (1916 год).

Этот материал, получивший название бакелита, быстро приобрел популярность, так как был легким и дешевым и делал нетрудоемким изготовление деталей даже очень сложных форм. Бакелит стал настолько популярным, что одно время серьезно обсуждался проект наводнения похоронного рынка бакелитовыми гробами. Применение бакелита сдерживалось тем, что обычный технический бакелит был слабым и хрупким, поскольку в нем использовались очень короткие волокна, лишь незначительно упрочнявшие смолу. Он был хорош лишь тем, что смесь легко формовалась, и поэтому стоимость производства была небольшой.

Пресс-порошки сразу же привели к сокращению производства бирмингемской бронзы. Следующим результатом была волна возмущений (пожалуй, бесплодных) со стороны потребителей, которым не нравились внешний вид и хрупкость нового материала. Частенько, отведя в сторону, мне шептали: “Говорят, сюда засунули опилки, чтобы сделать дешевле?” Нужно было объяснять, что без опилок было бы хуже и что в любом случае чего еще ждать при такой низкой цене. Ведь небольшие бакелитовые изделия вроде корпуса выключателя стоили три шиллинга сотня! Нужно сказать, что вскоре подобные изделия стали значительно лучше. Одной из причин этого явилась конкуренция со стороны намного более вязких термопластов, таких, как полиэтилен и нейлон.

Процесс получения изделий из пресс-порошков очень прост. Достаточно засыпать в горячую пресс-форму заранее взвешенную порцию порошка и нажать кнопку пресса. Какой бы сложной ни была форма, порошок заполнит ее, растекаясь подобно жидкости. Это очень удобный и эффективный процесс, особенно для производства небольших изделий электротехнического назначения. Например, при прессовании корпуса настенного выключателя пластичная масса должна растекаться вокруг многочисленных латунных деталей. Но, как вы уже знаете, для этого нужно использовать довольно короткие волокна, которые дают сравнительно непрочный и хрупкий материал. Ведь в смоле трещина, встретив на своем пути короткое волокно, может легко обойти его и продолжить свой путь дальше.

Слоистые материалы с целлюлозными волокнами

Если от материала требуется максимальная прочность, для армирования следует использовать длинные аккуратно уложенные волокна. Далеко не всегда, однако, можно заставить такой материал заполнить форму. Поэтому в слоистых пластиках, разработанных в 20-е годы, бумага или ткань пропитывались раствором фенольной смолы (обычно спиртовым). После сушки пропитанные слои укладывали между тщательно выверенными параллельными нагретыми плитами гидравлического пресса, где смола затвердевала под давлением около 150 кГ/см².

Такой материал был довольно дорогим, но хорошим по качеству, а некоторые его сорта обладали довольно высокой прочностью и вязкостью. Фенольные смолы имеют черный или грязно-коричневый. цвет, поэтому листы слоистых пластиков не использовали для декоративных целей. Вначале большая часть пластиков, наполненных бумагой (гетинаксы), использовалась в качестве электроизоляционных материалов; пластики на основе ткани (текстолиты), будучи очень вязкими, шли на изготовление шестеренок, подшипников, кулачков. В послевоенные годы появились меламиновые бесцветные смолы, а с ними и возможность делать поверхность листов цветной или узорчатой. Материал в толще листа оставался при этом прежним, на основе коричневой пропитанной фенольной смолой бумаги, что и прочнее, и дешевле. Такой комбинированный материал оказался очень подходящим для покрытий столов и панелей и сыграл большую роль в “кухонной революции”.

Декоративные листы пластика, которых сейчас много в продаже, сравнительно непрочны и хрупки, но, поскольку они почти всегда приклеиваются к достаточно жестким основаниям (например, к деревянной табуретке), это не имеет особого

значения. В наши дни трудно себе представить что до появления этих материалов просто не существовало действительно удовлетворительных покрытий для столов. Невероятное число женских человеко-часов тратилось на то, чтобы скрести деревянную поверхность, ведь по своей пористой природе она неотразимо притягивает к себе грязь.

Хотя целлюлоза в таких пластиках и сохраняет в основном свое пристрастие к воде, наименее вредный остаток воды в ней может быть уменьшен путем сушки волокон с последующей формовкой и отверждением материала в возможно более сухом состоянии. Если это сделано, каждое волокно зажато и ограничено в перемещениях матрицей и другими волокнами. Поэтому разбухание резко уменьшается, хотя через смолу и проникают пары воды. Поскольку бумага (или ткань) должна быть покрыта смолой на одной из первых стадий технологического процесса, а сушка производится непосредственно перед прессованием, то вместе с целлюлозой сохнет и смола. А ведь легкость, с которой фенольная смола заполняет горячую форму перед затвердеванием, очень сильно зависит от количества имеющейся воды; поэтому сухая смола требует более высоких давлений для равномерного распределения ее в объеме материала и получения нужных внутренних связей. Это приводит к тому, что получать такие материалы с приличной водостойкостью, используя небольшие давления (заметно меньше 150 кг/см^2), обычно невозможно. Общая нагрузка, которую нужно приложить к стандартной панели размером $240 \times 120 \text{ см}$, будет, следовательно, около 5000 т ; поэтому изготовление текстолита и гетинакса требует дорогого оборудования.

На влагостойкость текстолита и гетинакса влияют также некоторые химические особенности процесса пропитки. Можно значительно снизить захват влаги за счет правильного выбора смолы. Так часто и делают в производстве электротехнических материалов. К сожалению, хорошая влагостойкость означает блокирование гидроксидов в целлюлозе, а это делает ее хрупкой и потому малопригодной для конструктивных целей. Сразу после войны я видел самолет, построенный немцами из материала типа гетинакса. Чтобы обеспечить вязкость, они, насколько осмелились, снизили сопротивление материала влаге. Оказалось, что они перестарались: к тому времени, когда я его видел, он простоял под открытым небом три месяца и разваливался на куски.

Во время войны в Англии много работали над листовыми пластиками, армированными целлюлозными волокнами, для замены ими алюминия в обшивке самолета. Нам удалось, сохраняя достаточную вязкость, снизить вызванное колебаниями влажности полное изменение размеров в плоскости листа до $0,8\%$. Затем в порядке эксперимента мы обшили часть поверхности двенадцати находившихся в строю самолетов. Никаких аварий не последовало, но и положительных результатов мы не получили. Дело в том, что листы были, конечно, приклепаны к алюминиевому каркасу, который не мог ни разбухать, ни усыхать вместе с ними. И в результате на самолетах, летавших в пустыне, пластики так натягивались, что линия заклепочного шва оказывалась усыпанной трещинами; в то же время во влажном климате, особенно после таяния снега, листы угрожающе выпучивались и коробились. В конце концов пришлось от этой затеи отказаться. Практически колебания размеров армированных целлюлозой материалов всегда будут составлять около 1% . Это не согласуется ни с металлом, ни с древесиной, ни с фанерой - и потому делает невозможным применение таких материалов в широких масштабах.

Использование прочных слоистых пластиков сегодня практически ограничивается плоскими листами, которые можно прессовать между тщательно выверенными плитами. Для изготовления фигурных изделий необходимо иметь профилированную стальную пресс-форму, состоящую из двух половинок. В любом случае это довольно дорогое практически неизменяемое приспособление, но даже не оно делает профильное прессование на редкость трудным. Трудность здесь связана с тем, что такой материал почти не течет в процессе прессования. Поэтому должен очень точно выдерживаться зазор между двумя половинками пресс-формы. Если этого не обеспечить, то вся нагрузка придется на те участки, где зазор меньше нормы а остальной материал не будет прессоваться совсем.

Трудности и дороговизна этой операции вполне достаточны, чтобы отпугнуть инженеров, особенно сейчас, когда в их распоряжении есть другие, более простые пути получения прессованных изделий. Однако в конце 30-х - начале 40-х годов других путей не было, поэтому, несмотря на тяжелую и дорогую оснастку, несколько серьезных больших деталей пошло в производство по описанной технологии. Помнится, так было сделано стандартное кресло пилота для самолета-истребителя, которое использовалось в "Спитфайере" и некоторых других машинах. Эта довольно большая и сложная конструкция собиралась на болтах из нескольких профильных деталей, полученных прессованием. В работе она выдерживала нагрузки порядка тонны и никогда не доставляла беспокойства. С другой стороны, экономия веса и стоимости по сравнению с клепаным металлическим креслом не была очень уж велика.

Стеклопластики

Современные армированные пластмассы ведут свое начало от материалов на основе неорганических волокон, нашедших применение в конце войны. Впервые подобные материалы использовали для изготовления антенных обтекателей, которые представляют собой куполообразную конструкцию, где размещается антенна локатора. Обтекатель должен быть прозрачным для радиоволн, поэтому материал для него требуется неэлектропроводный. В качестве основы такого рода материала наибольшим успехом и по сегодняшний день пользуется стекловолокно.

Состав его немного изменился, но в остальном волокна похожи на те, которые вытягивал Гриффитс почти полвека назад. Процесс их вытягивания механизирован, сейчас стекло плавится в нагреваемом электротокотом платиновом контейнере, в дне которого имеется обычно 200 или 400 маленьких отверстий. Через каждое из этих отверстий тянется волокно, которое охлаждается и затвердевает по пути к расположенному под контейнером вращающемуся барабану, на который оно наматывается. Обычный диаметр волокон - от 5 до 10 мкм. Их прочность на разрыв сразу после вытягивания

составляет, по-видимому, 300-350 кГ/мм², но при последующих операциях она снижается. Поскольку свежие волокна имеют тенденцию склеиваться между собой, а за этим следует взаимное разупрочнение, волокна на пути от контейнера к барабану подвергаются специальной обработке, в результате которой на них появляется защитная пленка. Эта пленка предохраняет от повреждений при последующих операциях, например ткани. Перед операцией пропитки смолой эта пленка удаляется - ее растворяют или сжигают.

После того как волокна вытянуты и намотаны на барабан, дальнейший ход событий зависит от назначения будущего изделия. Мы уже говорили, что в форму нужно уложить как можно больше волокон просто потому, что они раз во сто (по крайней мере) прочнее смолы. Поэтому при прочих равных условиях прочность полученного материала будет пропорциональна содержанию волокон. В стекломате, содержащем отдельные волокна, их концентрация очень и очень мала, поэтому стекловолокно в таком виде используется редко, только в специальных случаях. Лучшая упаковка волокон получается в параллельных пучках, например в нитях или пряже. Нити обычно содержат несколько сотен отдельных волокон.

Поскольку волокна непрерывные, нет нужды использовать большую крутку нити, чтобы держать их вместе. Иногда после пропитки смолой такая пряжа используется для изготовления путем намотки - разного рода резервуаров, труб, сосудов давления. Для многих высококачественных изделий из стеклонити делают специальную ткань, которая выглядит как дорогой белый сатин.

Стеклопластики из ткани хороши своей прочностью, но изделия из них довольно дороги. И дело здесь не столько в высокой стоимости самого материала, сколько в том, что стеклоткань не очень удобна для автоматизации процесса получения профильных изделий. Поэтому наибольшая часть производимого стекловолокна применяется в виде мата из рубленой стеклопряжи. Пряжа рубится на куски длиной 5 - 8 см и идет главным образом на получение плоских матов путем нанесения этой волокнистой массы на проволочную сетку, покрытую слабым быстросохнущим клеем. Прижимается мат к сетке с помощью воздушной струи. Когда клей высыхает, мат снимается с сетки, и с ним можно обращаться, как с листом бумаги. Для изготовления фигурных изделий мат разрезается на подходящие куски, которыми обклеивают соответствующую модель, пока не получается деталь нужных размеров и конфигурации.

При изготовлении больших партий профильных изделий используют ту же технику обдувания воздушными струями, поскольку этот процесс можно автоматизировать. Он применяется при изготовлении таких изделий, как шлемы корпуса пишущих машинок и т.д. Вместо металлической сетки здесь используется сетчатая модель, на которую тем же способом наносится стекломат. Полученный стекломат автоматически перемещается в нагретую стальную пресс-форму, здесь к нему добавляется основная связующая смола, которая твердеет под давлением.

Помимо высокой прочности, стекловолокно имеет еще одно достоинство - оно не разбухает в воде, поэтому операцию формовки нет нужды проводить под большим давлением. Значит, можно использовать недорогие, легко изменяемые пресс-формы и отказаться от мощных гидравлических прессов.

При формовке стеклопластиков в качестве связующего можно использовать фенольные смолы, но обычно лучше применять смолы (например, полиэфирные), разработанные специально для этой цели. Многие из производимых смол твердеют не только при очень малых давлениях, но и при комнатной температуре - после добавления катализатора.

Это привело к технологии, которую можно было бы назвать "методом ведра и щетки". Очень популярный среди любителей и небольших фирм, такой способ почти ничем не отличается от египетского способа получения папье-маше. Слои холоднотвердеющей смолы и стекломата (или стеклоткани) попеременно накладывают на простую гипсовую модель и оставляют в таком виде на время, необходимое для отверждения. Если вся процедура проделана добросовестно и аккуратно, получится вполне нормальная конструкция. Правда, затраты труда будут великоваты, если потребуется сделать десятки таких изделий. Но для изготовления очень больших конструкций, например лодок, - это практически единственный путь.

Одна из трудностей этой технологии заключается в том, что она не позволяет получить двух совершенно одинаковых изделий, так как надлежащий контроль практически невозможен. Ну а поскольку прочность такой переменной конструкции предсказать довольно трудно, этот метод не совсем годен для изготовления самолетных конструкций.

Чтобы получить изделие хорошего качества, смола должна твердеть в сухой, теплой, контролируемой атмосфере, а это не всегда возможно в условиях полукустарных мастерских. Именно отсюда возникают жалобы на лодки из стеклопластиков - их зачастую делают в холодных сырых сараях. На хороших заводах эту операцию проделывают в обогреваемом (и дорогом поэтому) помещении, а кустари и любители с наибольшим эффектом могут приложить свои силы к доводке корпусов, изготовленных профессионалами на подходящем оборудовании.

Для больших конструкций вроде судовых корпусов становится важной стоимость модели, так как количество производимых изделий обычно невелико. В таких случаях лучше использовать недорогие модели, а смоле дать возможность медленно твердеть при комнатной температуре. Кроме того, при этом допустима длительная ручная доводка затвердевшей оболочки. Но если мы имеем дело с такими изделиями, как шлемы или чемоданы, экономическая картина меняется. В подобной ситуации обычно применяют состоящую из двух половинок стальную нагретую пресс-форму. Стекловолокнистую заготовку опускают в пресс-форму и перед самым захлопыванием добавляют в нее определенное количество жидкой смолы горячего твердения. Скорость затвердевания подбирается так, чтобы смола, прежде чем

затвердеть, успела равномерно пропитать стекломассу. Затем остается лишь извлечь из формы готовое изделие - почти никакой ручной доводки не требуется, так как пресс-форма тщательно отполирована. Весь процесс получения волокнистой заготовки, установки ее в пресс-форму, пропитки смолой и твердения может выполняться в одной большой машине в течение нескольких секунд, в то время как ручная укладка стекловолокна требует часов и даже дней.

В первых армированных материалах количество волокон было небольшим и волокно вводилось с целью нейтрализации грубых дефектов слабой хрупкой матрицы. О таких материалах правильно говорить как об армированных. Однако со временем назначение матрицы изменилось - она стала служить только для склеивания прочных волокон между собой; теперь мы стремимся использовать матрицу лишь в количествах, необходимых для надежного связывания волокон. Такие системы правильнее было бы называть связанными волокнистыми материалами.

Серьезное изучение свойств этих систем - предмет трудный и в высшей степени математизированный. В последнее время он получил признание и даже сделался модным в академических кругах. Не вдаваясь в детали, можно сказать, что свойства массы склеенных между собой волокон более или менее следуют предсказаниям, полученным с помощью элементарного расчета. Обычно трудно получить материал, содержащий более

50% волокон по объему. Прочность готового стекловолокна можно считать равной примерно 200 кГ/мм^2 , а его модуль Юнга - 7000 кГ/мм^2 . Пруток стеклопластика (например, спиннинговое удилице), в котором все волокна уложены параллельно оси, будет иметь прочность 100 кГ/мм^2 , а модуль Юнга 3500 кГ/мм^2 , поскольку смола почти не вносит своей доли ни в прочность, ни в модуль, хотя, конечно, увеличивает вес. Рассчитанный по простому правилу смесей, удельный вес материала составит $1,85 \text{ Г/см}^3$, если в нем не будет пор (а так и должно быть); удельный вес стекла - около 2,5, а смолы - $1,2 \text{ Г/см}^3$. Мы можем поэтому составить следующую сравнительную таблицу.

Материал	Удельный вес, г/куб.см.	Предел прочности, кГ/кв.мм.	Удельная прочность	Модуль Юнга, кГ/кв.мм.	Удельный модуль Юнга
Стеклопластик (параллельные волокна)	1.85	100	54	3500	2000
Стеклопластик (стеклоткань)	1.85	50	27	1750	1000
Мягкая сталь	7.8	40	5	21000	2700
Высокопрочная сталь	7.8	200	26	21000	2700

Из таблицы ясно, что сравнивать сталь и стеклопластик не очень просто. Грубо говоря, стеклопластики прочнее стали, особенно по отношению к удельному весу. Но по жесткости они хуже сталей, даже если принять во внимание намного меньшую плотность. В этом отношении они уступают и дереву,

Как и в случае с древесиной, сравнение в известной степени зависит от того, в скольких направлениях должен быть прочным материал. Конечно, наивысшие цифры дает материал, в котором все волокна и, следовательно, прочность, направлены вдоль одной оси; но технические приложения материалов такого типа сильно ограничены. Когда одинаковое число волокон пересекается под прямым углом, мы имеем материал, напоминающий фанеру: половина прочности однонаправленного материала под углами 0° и 90° и несколько меньшая прочность под углом 45° . Такой материал может быть получен при армировании стеклотканью.

Из теории следует, что если мы хотим иметь действительно одинаковые свойства во всех направлениях волокнистого листового материала, то этого можно достичь несколькими способами укладки волокон. Все эти способы армирования дают треть прочности и жесткости однонаправленных систем. Эксперимент очень хорошо подтверждает теорию. Однако на практике обычно используется стеклопластик с матами из рубленой пряжи. Таким армированием очень редко удается достичь содержания волокон 50% (волокна укладываются некомпактно), поэтому мы должны, пожалуй, рассчитывать на прочность, меньшую чем треть прочности однонаправленного материала. Такого рода стеклопластики обычно используются для сравнительно недорогих поделок, где большей прочности, возможно, и не требуется. Но даже и они, как правило, превосходят мягкую сталь по удельной (отнесенной к весу) прочности. Вот по жесткости армированные пластики - и в частности, стеклопластики - не могут конкурировать ни с металлами, ни с древесиной. В этом одна из главных трудностей применения стеклопластиков в больших конструкциях - судах, корпусах автомашин и т.д. По той же причине их вычеркивают в настоящее время из списка материалов, пригодных для силовых конструкций самолета. Правда, можно было бы повысить жесткость автомобильного кузова, подкрепив его изнутри стальными трубами, но стоит ли тогда связываться с пластиками?

Металлы - почти, изотропны, то есть их свойства примерно одинаковы во всех направлениях. Эта особенность очень важна для таких деталей, как коленчатый вал, где металлы поэтому незаменимы. Но там, где это свойство не столь существенно (оболочки, панели), лучше применять волокнистые пластики. Получить изотропные свойства в волокнистом материале практически невозможно, потому что очень трудно плотно уложить волокна в трех направлениях сразу. Даже стог сена - слоистая конструкция. Теория показывает, что прочность трехмерной беспорядочной упаковки волокон была бы равна $1/6$ от прочности материала с однонаправленными волокнами - вряд ли стоит стремиться получить такой материал.

Несмотря на все свои недостатки, материалы, подобные стеклопластику, постепенно завоевывают все новые и новые позиции. С течением времени по мере того, как мы лучше их узнаем, мы и используем их все шире. Стоимость сырья для пластмасс мало отличается от стоимости стали и алюминия. Однако если вы сравните стоимость обработки этих материалов, то увидите, что затраты на производство сложных изделий из пластмасс настолько меньше соответствующих затрат при использовании металла, что готовое изделие из пластмассы может быть намного дешевле. Но чтобы реализовать эту возможность, обычно нужно заново спроектировать все изделие, а подобные мероприятия часто натываются на сопротивление.

Строить из стали корпус большого судна - вполне резонно, по крайней мере если нет спешки и не нужно слишком заботиться о весе. Но сталь становится безнадежно неэффективной для судовых корпусов меньших размеров: толщина листа получается столь малой, что, если даже удастся решить проблемы выпучивания, вмятин и т.д., за несколько месяцев он насквозь проржавеет. В этой области стеклопластики, кажется, утвердились очень прочно, здесь они вполне могут конкурировать по стоимости с металлами.

За последние десятилетия было сделано много усовершенствований в автомобиле. Лично я не отношу к их числу штампованный стальной кузов. Очень уж он тяжел, а ведь вес увеличивает расход бензина и ухудшает характеристики машины. Такой корпус требует также тщательной звуковой защиты. Но, что хуже всего, он начинает ржаветь сразу же, как только вы начинаете ездить на машине, и, по-видимому, коррозия корпуса, а не механический износ приводит рано или поздно большинство автомобилей на склады металлолома.

Вероятно, две причины тормозят применение стеклопластиков для кузовов автомашин. Во-первых, их массовое производство все еще обходится дорого, а, во-вторых, по мнению тех, кто торгует автомобилями, потребителю нравится лоск полированной поверхности, трудно достижимый при использовании стеклопластиков. В то же время в мелкосерийном производстве почти все автомобили имеют стеклопластиковый кузов. В самом деле, - только такое решение позволяет в подобных случаях вести дело экономично, отказавшись как от дорогостоящих штампов, так и от старомодного кузова. Кузов из стеклопластика позволяет примерно вдвое уменьшить вес автомобилей, а это значит, что преимущество машины резко возрастает.

Несмотря на недостатки стеклопластика, мировое производство изделий из него достигло почти миллиона тонн в год и продолжает быстро расти (алюминия и его сплавов производится примерно 4,5 млн. тонн). Но в конце концов оно, наверно, затормозится из-за относительно малой жесткости материала.

Армированный бетон

Хотя между людьми, работающими с железобетоном, и специалистами по стеклопластикам никогда, по-видимому, не было сколь-нибудь серьезных связей, в этих двух областях много общего, и поэтому уместно закончить настоящую главу небольшим разделом, посвященным армированному бетону. Подобные материалы ведут свое начало с глубокой древности, а различия между ними заключаются главным образом в масштабах: в бетоне, например, арматура намного грубее, чем в пластиках. Еще в Древнем Вавилоне использовали тростник для армирования построек из высушенной грязи; а различные вариации "плетенки и глины" издавна применялись во всем мире. Деревенька в Эссексе, где я пишу эту главу, построена главным образом из грязи и штукатурки поверх сплетенных прутьев.

Вероятно, первыми стали применять железо в качестве арматуры греки. Мы уже говорили в [главе 1](#), что в нормальной кладке все должно быть в состоянии сжатия, поскольку кладка не может противостоять сколько-нибудь значительным растягивающим напряжениям. Это условие привело к использованию арок и куполов, позволяющих создавать большие перекрытия, в которых не возникают напряжения растяжения. Греки об этом отлично знали, но они, кажется, не признавали арок - по крайней мере в формальной архитектуре. Очень возможно что они исходили при этом из эстетических соображений. Греки далеко не всегда подчиняли свои поступки строго рассчитанной необходимости, особенно в архитектуре идущей от деревянных конструкций. Парфенон и все другие дорические храмы - точные мраморные копии деревянных строений вплоть до имитации в мраморе штифтов, скрепляющих между собой деревянные балки. Но так как творения греков блестящи, а наши собственные здания зачастую ужасны, не нам посмеиваться над античными архитекторами по этому поводу.

Деревянная архитектура, по существу, основана на балочных конструкциях, потому что ее строительный материал - разного рода длинные брусья. К тому же древесина обладает хорошей прочностью на разрыв. Греческая архитектура была, таким образом, архитектурой балок и колонн. То же самое прекрасно иллюстрирует американская "колониальная" архитектура. Строители здесь в избытке имели дерево, и потому они охотно и успешно обратились к классическому стилю. Готика и древесина несовместимы, поскольку готический стиль основан на напряжениях сжатия, которые под силу лишь каменным аркам.

Хотя мрамор, пожалуй, лучше других камней с точки зрения прочности на разрыв, его прочность все-таки слишком мала и непостоянна, поэтому делать из него балки какой бы то ни было длины невозможно. В ранних дорических каменных храмах это компенсировалось тем, что пролеты балок были короткими, а капители сверху колонн - широкими. Даже в Парфеноне (строительство началось в 447 году до н.э.) свободный пролет большинства балок не превышает 2,5 м, хотя и выглядят они длиннее. Однако, когда в 437 году до н.э. Мнесикл приступил к строительству входа в Акрополь (Пропилеи), ему потребовалось перекрывать намного большие пролеты. Их длина от 4 до 6 м определялась как

архитектурными пропорциями, так и необходимостью церемониала. Чтобы справиться с растягивающими напряжениями, Мнесикл решил замуровать в мраморе в специальных канавках железные стержни длиной около 2 м. Так появился армированный мрамор, который должен был по замыслу создателей вести себя подобно древесине.

Однако Мнесикл не сделал существенного шага вперед: греческие колонисты в Акрагасе (Сицилия) еще в 470 году до н.э. использовали железные армирующие брусья длиной 4,5 м и сечением 12Х30 см. Правда, остается тайной, как были получены такие поковки. Но это заставляет предположить, что греки не испытали бы технологических трудностей в изготовлении паровой машины и другого тяжелого оборудования, если бы до них додумались*.

** Но конечно, у них были бы трудности с топливом.*

Как мы уже говорили, готические церкви рушатся, если в них появляются растягивающие напряжения, а появляются они довольно часто. Выход - быть может, частичный - был найден в контрфорсах. Примерно тот же способ применялся и в поздней классической и романской архитектуре. Так, давление, действующее со стороны купола св. Софии в Константинополе (532 год), уравнивается силами, созданными двумя полукуполоми, на которых он покоится; правда, арки у его основания связаны железными стержнями.

Купола соборов св. Петра и св. Павла* покоятся на цилиндрических барабанах. Здесь не было возможности уравновесить силы, направленные наружу, вспомогательными куполами или контрфорсами: это совершенно нарушило бы замысел проекта с изолированными куполами. В обоих случаях проблема была решена, как известно, передачей нагрузки на замкнутую растянутую цепь, заделанную в кладку вокруг основания куполов.

** Крупнейший протестантский собор - собор св. Павла - был построен в Лондоне в XVII веке в противовес крупнейшему католическому собору - собору св. Петра. - Прим. перев.*

Более общий подход предложил француз Суффло (1713 - 1781), пытавшийся увеличить прочность кладки на растяжение путем замуровывания в нее железных стержней. Однако вдоль швов проникала влага, железо окислялось и расширение продуктов коррозии крошило кладку. Позже Брюнель пытался делать примерно то же самое, вставляя обручное железо (тонкие полоски железа, идущие на обручи для бочек) в соединения кирпичной кладки. Результат был в точности похож на предыдущий.

Затем, вероятно, сразу трое почти одновременно обнаружили, что коррозия железной арматуры в порландцементе не столь значительна, чтобы вызвать повреждения. Французский садовник Жозеф Монье (1823 - 1906) в 1849 году сделал цветочные горшки, а точнее - большие кадки для апельсиновых деревьев, заложив сетку из тонких железных стержней в цемент. Эти кадки оказались удачными и привлекли к себе внимание. Англичанин В. Вилкинсон в поисках применения старым шахтным канатам сделал армированные строительные балки (подобно грекам), расположив канаты на их растянутой стороне. Наконец, французский инженер Ж. Лямбо показал в 1855 году гребное судно, сделанное из бетона, армированного железными стержнями, - по-видимому, оно было первым в длинной веренице не очень удачных бетонных судов. Лямбо запатентовал (казалось бы, поздновато) использование комбинированного железобетонного материала в строительстве.

Железная арматура позволяет бетону довольно успешно нести растягивающие нагрузки. Но деформация растяжения, при которой бетон разрушается, очень мала; поэтому бетон растрескивается задолго до того, как арматура значительно деформируется. Если к такой комбинированной системе приложить сколь-нибудь серьезную растягивающую нагрузку, бетон будет пронизан сеткой трещин. Если эти трещины малы - через них проникнет внутрь вода, если они велики - бетон раскрошится. Лучший способ избежать как одного, так и другого - поставить бетон навсегда в условия сжатия, а арматуру раз и навсегда растянуть. Различные виды такого материала, известного как предварительно напряженный железобетон, начали появляться примерно с 1890 года; но, хотя его применение было вполне успешным, распространение он получил не сразу.

Серьезно и в широких масштабах предварительно напряженный железобетон стал применяться сравнительно недавно. Его использование дает возможность строить намного более эффективные и нагруженные конструкции, чем из обычного железобетона. Естественно, возникает вопрос, не лучше ли делать всю конструкцию из стали? Оказывается, нет. И не только из-за существенной экономии стали. Бетонная матрица предохраняет стальные стержни от потери устойчивости и коррозии. Благодаря последнему конструкция почти не требует ухода.

Ю.Н. Работнов. Предисловие

Введение. Новая наука о прочных материалах, или как задавать трудные вопросы

Часть I. Упругость и теория прочности

Часть II. Неметаллы

Глава 4. Торможение трещины, или как обеспечить вязкость

Глава 5. Древесина и целлюлоза, или о деревянных кораблях и железных людях

Глава 6. Клей и фанера, или слюда в планерах

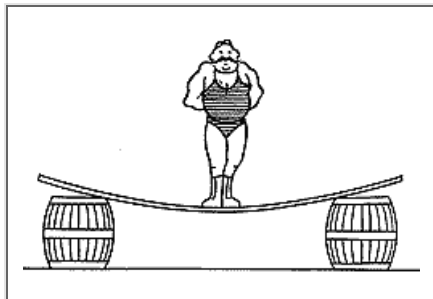
Глава 7. Композиционные материалы, или как делать кирпичи с соломой

Часть III. Металлы

Приложение I. О различных типах твердого тела, или кое-что о патоке

Приложение II. Простые формулы теории балок, или как сделать расчет на прочность

Сетевая публикация подготовлена учениками московской гимназии № 1543 Олегом Борисенко и Дмитрием Бегизовым



Дж. Гордон

Почему мы не проваливаемся СКВОЗЬ ПОЛ

Перевод с английского С.Т. Милейко
Опубликовано издательством "Мир", Москва, 1971

Часть III. МЕТАЛЛЫ

Глава 8. Пластичность металлов, или интимная жизнь дислокаций.

Чем плохи вязко-упругие материалы

Торможение трещин дислокациями и коррозия под напряжением

Пластичность кристаллов

Краевые и винтовые дислокации

Наблюдение дислокаций

Ползучесть и жаропрочность

Глава 9. Железо и сталь, или Гефест среди чертовых мельниц.

Железо

Чугун

Пудлинговое железо

Сталеварение

Бессемеровская сталь

Мартеновская сталь

Глава 10. Материалы будущего, или как ошибаться в догадках

Чего можно ожидать от материалов будущего?

Ближайшее будущее

Глава 8

ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ, или ИНТИМНАЯ ЖИЗНЬ ДИСЛОКАЦИЙ

Железные рудокопы доставляют человеку превосходнейшее и зловреднейшее орудие. Ибо сим орудием прорезываем мы землю, сажаем кустарник, обрабатываем плодовые сады и, обрезая дикие лозы с виноградин, принуждаем их каждый год юнеть. Сим орудием выстраиваем мы дома, разбиваем камни и употребляем железо на все подобный надобности. Но тем же самым железом производим брани, битва и грабежи и употребляем оное не только в близи, но и мечем окрыленное в даль, то из бойниц, то из мощных рук, то в виде оперенных стрел. Самое порочнейшее, по мнению моему, ухищрение ума человеческого. Ибо, чтобы смерть скорее постигла человека, сделали ее крылатою, и железу придали перья. Того ради да будет вина приписана человеку, а не природе. Некоторыми опытами доказано, что железо может быть безвредно. В мирном союзе, дарованном Порсеною римскому народу, по изгнании Царей, нахожу я именно сказанным: чтобы железо употреблять не на иное что, как на земледелие.

Плиний Старший.
"Естественная история"

Перевод В. Севергина, С.-Петербург, 1819.

Выше мы говорили о том, как можно повысить вязкость упругих материалов, подчиняющихся закону Гука вплоть до момента разрушения. Описанный в [главе 4](#) механизм является практически единственным для получения полезной вязкости неметаллических материалов, и, как мы уже говорили, живая природа, по-видимому, целиком уповает на него, по крайней мере в своих достаточно жестких материалах, таких, как древесина и кость. Другое дело вязкость металлов - она не имеет, насколько мне известно, аналогий в живых организмах. Механизм сопротивления металлов хрупкому разрушению обычно называют пластичностью.

Пластичность определяется тем, насколько форма кривой напряжение-деформация отклоняется от закона Гука. В [главе 3](#) мы уже подробно говорили о концентрации напряжений, этом проклятии для инженеров, с которым должна бороться

вязкость. Как правило, в оценках концентрации исходят из того, что материал следует закону Гука. Мы говорим о концентрации напряжений, но все вычисления дают нам, по существу, концентрацию деформаций. Следовательно, если мы нашли в результате расчетов, что в непосредственной близости от кончика трещины деформация материала раз в 200 больше, чем средняя деформация в конструкции, то мы полагаем далее, что местное напряжение также в 200 раз выше среднего. Мы говорим, что в этом случае коэффициент концентрации напряжений равен 200. Однако эти рассуждения верны лишь в том случае, если для материала вблизи кончика трещины соблюдается закон Гука.

Металловеды пользуются классическим способом торможения трещины, который основан на свойстве материала пластически деформироваться. Этим свойством как раз и обладают металлы. Небольшие отклонения от закона Гука, связанные, например, с формой кривой сил межатомного взаимодействия (глава 1), здесь бесполезны, так как локальные деформации у кончика трещины обычно в сотни раз превосходят среднюю деформацию. Существует несколько разновидностей отклонений от закона Гука. Может быть, полезно поэтому рассмотреть вначале материал, в котором практически отсутствует сопротивление распространению трещин.

Чем плохи вязко-упругие материалы

Если оставить густую жидкость под постоянной нагрузкой, то через достаточно длительный промежуток времени она может практически неограниченно деформироваться. Иными словами, она будет течь. Подобно болотной топи, такая жидкость потечет, если вы будете на нее давить долго, но она успешно сопротивляется внезапным кратковременно действующим нагрузкам. Наиболее густые жидкости трудно отличить от твердых тел. К такого рода веществам относятся вар и гудрон, конфета ириска и различные пластики.

Мы уже говорили, что ириску довольно легко расколоть, а вот медленным приступом ее можно не одолеть и большей силой. То же самое относится и к вару и, что уж совсем плохо, к пластикам. Дайте пластикам время, и они будут действительно очень вязкими: они потекут вокруг головки трещины, и концентрация напряжений снизится. Но как конструкционные материалы они объединяют в себе худшие качества как пластичных, так и хрупких материалов. Если их медленно нагрузить, то через некоторое время они начинают течь во всем объеме, постепенно уходя от выполнения своих прямых задач. Под внезапной нагрузкой они неспособны вовремя деформироваться и их поведение походит на поведение твердого стекла. А коль скоро побежала трещина, она вскоре достигает такой скорости, за которой механизм пластического течения уже не сможет успевать, - и материал раскалывается.

Такие материалы, как древесина и армированные пластики, при больших напряжениях тоже немного ползут, то есть ведут себя на манер вязко-упругих материалов, и это, конечно, их недостаток. Кроме того, они не вполне "гуковские": их кривая напряжение - деформация выглядит так, как показано на рис. 47. Однако отклонения от закона Гука слишком малы, чтобы как-то понизить хрупкость этих веществ, поэтому они должны полностью полагаться на слабые внутренние поверхности, тормозящие трещины.

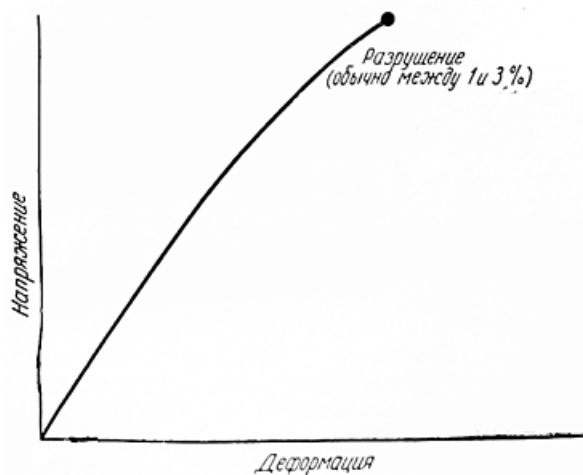
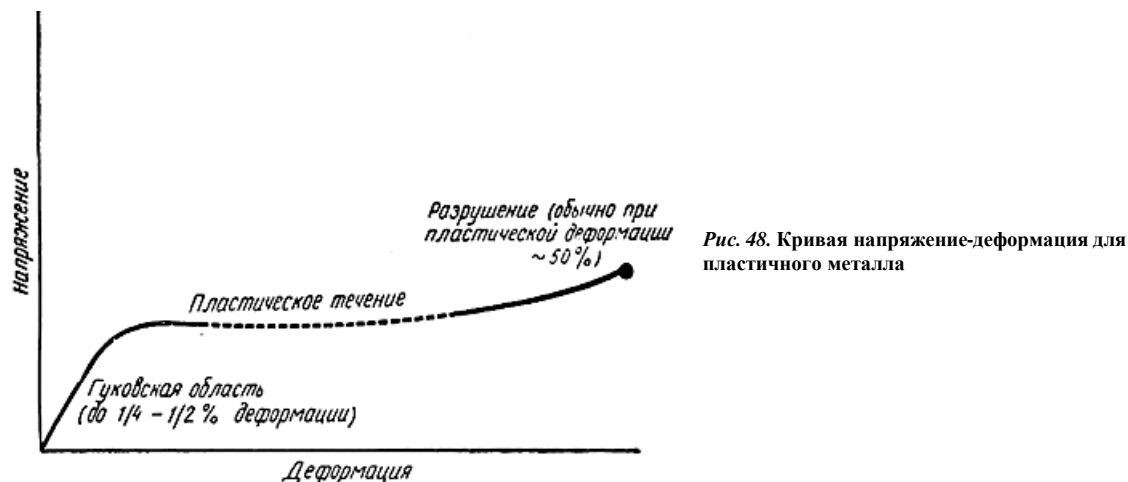


Рис. 47. Кривая напряжение - деформация типичного неметаллического конструкционного материала (например, древесины или стекловолокна). Отклонение от закона Гука определяется, как правило, не формой кривой межатомных сил, а небольшими эффектами ползучести.

Торможение трещин дислокациями и коррозия под напряжением

Дислокационный механизм обеспечивает весьма удачную комбинацию упругости при малых деформациях с интенсивным течением - при больших. Типичная кривая напряжение - деформация для пластичного металла схематически показана на рис. 48. Упругая деформация в таких металлах составляет намного меньше 1%. Далее их поведение напоминает пластилин, они текут при почти постоянном напряжении до удлинений 50% и более (на самом деле локальные деформации бывают значительно большими). На этом участке пластического течения материал не разупрочняется. С увеличением деформации напряжение не возрастает; но, с другой стороны, металл серьезно и не повреждается. Средняя рабочая деформация, сознательно допускаемая в технических конструкциях, редко превышает примерно 0,1%, а поскольку металл может течь локально до 100% и более, то допустимы концентрации деформаций в кончике трещины что-нибудь около 1000.



На рис. 49 видно, что по обе стороны от кончика трещины есть малые области очень большого сдвига - концентрация напряжений сдвига. Напряжения здесь достаточны, чтобы заработали источники дислокаций, и, действительно, новые дислокации рождаются здесь в изобилии. В двух главных плоскостях, торчащих из трещины, словно уши, под 45° к ее поверхности, возникает сдвиг, и самая опасная концентрация напряжений снимается. Грубо говоря, это равносильно округлению головки трещины. Следовательно, хотя гриффитсов баланс энергии (глава 4) остается в пользу распространения трещины, механизм, движущий ее, оказывается бессильным из-за отсутствия нужной концентрации напряжений.

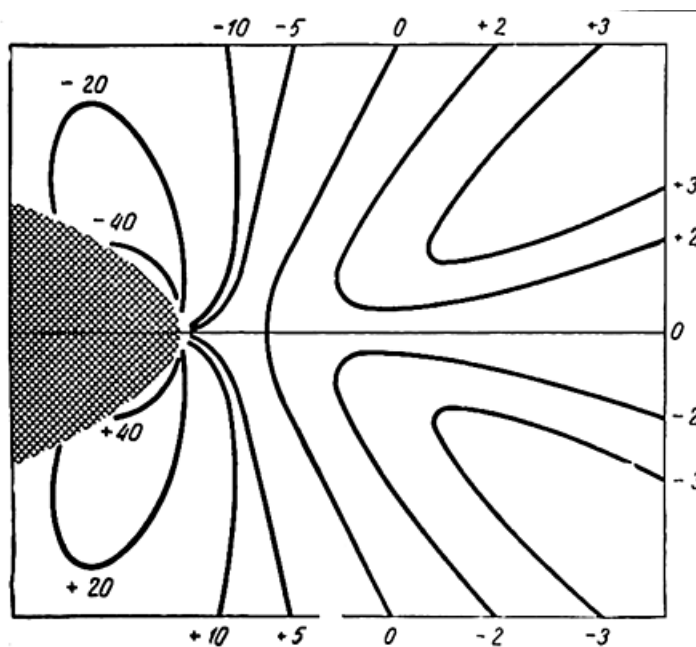


Рис. 49. Концентрация касательных (сдвиговых) напряжений у кончика трещины.

Таким образом, трещине не удастся подрасти по чисто механическим причинам, и материал будет в безопасности, пожалуй, практически в 99% случаев. Работая с материалами, мы должны всегда помнить, что не существует четких и ясных линий раздела между химией, физикой и теорией упругости. Эксперты в своих замках из слоновой кости любят проводить это разделение, но ведь межатомные- то связи о них ничего не ведают. Связь может быть разрушена химическим, физическим или механическим путем, а также любой комбинацией этих способов. Упруго натянутая связь более уязвима по отношению к физическим и химическим воздействиям. По этой причине области с высоким напряжением особенно слабо сопротивляются растворителям и коррозионным средам.

Мы уже подчеркивали, что в вязких материалах баланс энергии обычно остается в пользу распространения трещины. Трещина стоит на месте лишь потому, что из-за снижения концентрации напряжений отсутствует и механизм распространения. В то же время, хотя рождение многочисленных дислокаций сильно понизило напряжения у головки трещины, оно не сбросило их полностью.

Более того, сильно исковеркан и жизненный путь находящихся здесь атомов, и сохранились деформации микрообъемов. Поэтому связи между атомами в этой области более чем где-либо чувствительны к воздействию агрессивных растворов и

хникалиев, которым случится соприкоснуться с материалом. Вот почему металлы, вязкие на воздухе и в других сухих газах, могут растрескаться под нагрузкой, если их замочить в морской воде. То же самое случается и на химических заводах. Причем без нагрузки металлы могут служить годами в той же самой коррозионной среде, а время действия роковой нагрузки может быть и очень большим, и очень малым. В этом отношении некоторые латуни могут оказаться ловушками для несведущих любителей.

Пластичность кристаллов

Пластичность металлов имеет два чрезвычайно полезных следствия. Во-первых, она затрудняет распространение трещин, а во-вторых, делает металл ковким. Последнее означает, что куску металла можно придать нужную форму путем горячих или холодных операцийковки, прессования, гибки. Вообще говоря, для обработки металлов давлением (ковки, прокатки) способность к течению должна быть больше, чем для того, чтобы обеспечить сопротивление материала развитию трещин. Но обработке подвергается, как правило, нагретый металл, а в таком состоянии практически все кристаллы намного более пластичны.

Пластичность - исключительная привилегия кристаллов, поскольку истинные дислокации могут существовать только в виде нарушений идеальной кристаллической решетки. Большинство твердых тел обладают кристаллической структурой, и дислокации присутствуют почти во всех кристаллах. С другой стороны, в подавляющем большинстве кристаллов при комнатных температурах дислокации либо недостаточно подвижны, либо характер их подвижности не тот.

Почти все кристаллы содержат дислокации, порожденные самой природой кристаллизации. Но эти дислокации распределены по всему объему материала более или менее равномерно, а концентрация напряжений у кончика трещины - явление очень резко выраженное и локализованное, и их, этих врожденных дислокаций, расположенных в непосредственной близости к трещине, для такого сдвига, который бы сгладил ситуацию, обычно не хватает даже если эти дислокации очень подвижны. Следовательно, нужно, чтобы масса новых дислокаций возникла прямо на месте происшествия, их должна породить сама концентрация напряжений. Более того, размножение должно идти очень быстро, иначе материал будет уязвимым в случае ударных нагрузок.

В реальном материале трещины совсем не похожи на плоские картинки на листе бумаги, это сплюснутые объемные клиновидные поры, пытающиеся втиснуться в трехмерный материал. Поэтому для того, чтобы должным образом уменьшить концентрацию напряжений, необходим сдвиг в пяти плоскостях.

Число кристаллов, которые удовлетворяют всем перечисленным условиям сразу, очень мало: какая-нибудь дюжина металлических кристаллов из тысяч существующих кристаллических веществ. Сегодня ни один неметаллический кристалл (подозрительное исключение составляет хлористое серебро) мы не можем считать истинно пластичным.

Хотя за последние тридцать лет проделана огромная работа по изучению дислокаций и существует поистине необъятное количество как теоретических, так и экспериментальных сведений, нам все еще полностью не понятно, что определяет подвижность дислокаций в различных веществах. Но все же, наверное, будет полезно рассказать о некоторых более понятных сторонах этого явления.

Прежде всего, легкость, с которой межатомная связь может быть разрушена и восстановлена, для разных веществ весьма различна. А ведь мы знаем, что каждый раз, когда дислокация прыгает на один шаг, должны рваться старые связи и устанавливаться новые. В этом отношении наиболее гибкими должны быть такие связи, которые обеспечивают одинаковое притяжение во всех направлениях. Здесь на первое место нужно поставить металлическую связь, а за ней - ионную. Наихудшей будет, наверное, ковалентная связь, которая часто бывает в высшей степени направленной. Она имеет характер типа "все или ничего". К сожалению, ковалентная связь в то же время является и наиболее прочной, и наиболее жесткой, и наиболее желательной из всех химических связей. Но при нормальной температуре дислокации в ковалентных кристаллах малоподвижны.

Очень важную роль играет также кристаллическая структура вещества, то есть геометрия взаимного расположения атомов или молекул в кристалле. Если элементарная ячейка (то есть такая минимальная ячейка, простым повторением которой можно "собрать" кристалл) велика, то прыжок дислокации будет, как правило, затруднен. Даже если элементарная ячейка и мала, но упаковка атомов геометрически усложнена, число направлений легкого скольжения будет чересчур ограничено. Обычно кристаллы с кубическим расположением атомов деформируются легче, чем кристаллы с гексагональной упаковкой атомов. Далее, важную роль играют размер ячейки, а также примеси.

Громадное большинство кристаллических веществ не обладает достаточно высокой пластичностью при нормальных температурах, а те кристаллические вещества, которые пластичны, оказываются слишком уж пластичными. Кристаллы чистых металлов (железа, серебра, золота и т.п.) слишком мягки, настолько мягки, что практически их просто нельзя использовать. Поэтому задача металловедения - искусства и науки-заключается главным образом в том, чтобы придать таким кристаллам твердость и прочность, не сделав их при этом слишком хрупкими. Это следует делать, ограничивая движение дислокаций, но в то же время не надо тормозить его слишком уж сильно.

Инженеры любят толковать об "удлинении", даже используют его в качестве меры пластичности. Это очень грубый практический прием определения величины пластической деформации металла перед полным его разрушением. Величина эта не имеет ничего общего с упругой деформацией при разрыве материала, которая обычно не превышает 1%.

Для измерения удлинения на образец наносятся две метки на расстоянии, положим, 5 см; после разрушения образца две половинки его складываются и расстояние между метками измеряется вновь. Если, например, новое расстояние окажется 7,5 см, то говорят, что удлинение равно 50% и т.д. Как и результаты большинства других популярных инженерных испытаний, удлинение очень трудно более или менее стройным образом связать со свойствами пластического течения материала. Точно так же трудно такие результаты использовать. Однако многие инженеры придерживаются стойкой почти религиозной веры в силу таких испытаний, и если вы скажете им, что древесина и стеклопластики, обладая вязкостью, дают нулевое удлинение, то в ответ можете услышать, что именно поэтому они их и не применяют. Как и большинство верований, основанных на эмоциях, эта вера зиждется на страхе, вполне понятном страхе перед хрупким разрушением.

Для большинства металлических сплавов удлинение порядка 5-10% оказывается достаточным для того, чтобы обеспечить удовлетворительную вязкость. Чаще всего на практике используют малоуглеродистые стали, имеющие удлинение до 50-60%, но довольно низкую прочность. Частично это объясняется перестраховкой из-за боязни трещин, но, кроме того, есть еще и две другие причины. Многие конструкции делают из металлических листов, прутков, труб, и обычно бывает очень удобно и дешево придать им нужную форму путем гибки в холодном состоянии. Подгоняя одну часть конструкции к другой, можно также использовать и другие довольно грубые методы. Во время войны мне говорил как-то один сборщик самолетов, что подгонку крыльев “Спитфайеров” к фюзеляжам можно выполнить только при помощи кувалды. Своими глазами я такого никогда не видел, поэтому не могу ручаться за достоверность, но подобного рода вещи случаются, хотя, пожалуй, и не в авиационной промышленности и не в мирное время.

Вторая причина связана с тем, что перераспределение напряжений в конструкции может сгладить опасные напряжения. Дело в том, что иногда бывает очень трудным сколько-нибудь точно определить нагрузки во всех элементах сложной конструкции, а кое-кому это может показаться просто слишком обременительным занятием. Если же материал течет и имеет большой пластический участок, то перегруженный элемент может просто больше деформироваться, что не так уж и опасно для него. Многие инженеры свято верят в такие “самопроектирующиеся” конструкции.

Теперь нам понятны преимущества пластичных металлов в реальном мире с его несовершенствами и соображениями коммерции. Легко объясняется теперь и широчайшее распространение мягких сталей, алюминия, меди. Но вместе с тем с пластичностью связаны и два недостатка. Пластичность даже самых мягких металлов не бесконечна, и так как способов измерить, какая доля пластичности уже исчерпана при изготовлении детали, обычно нет, остается лишь догадываться, сколько же пластичности сохранилось на то, чтобы обеспечивать вязкость в ходе эксплуатации. Когда ломаются изделия массового производства, именно в этом незнании кроется корень зла. Отжиг - операция достаточно прихотливая, к тому же она связана с дополнительными расходами, а малые детали имеют грошовую цену, поэтому трудно воспротивиться стремлению деформировать металл в таких случаях вхолостую.

Другой недостаток заключается в том, что максимальная пластичность неизбежно сочетается с малой прочностью, поскольку металловеды должны сделать так, чтобы дислокации начали двигаться при малых напряжениях. А в итоге конструкции часто получаются намного тяжелее, чем следовало бы.

Краевые и винтовые дислокации

Теория дислокаций чрезвычайно сложна и в конце-то концов наибольший интерес она представляет, по-видимому, для узких специалистов. Однако нам следует упомянуть о двух основных типах дислокаций - краевой и винтовой. Краевая дислокация была введена в обиход Дж. Тэйлором в 1934 году. Она проще и легче для понимания. Как мы уже говорили о ней в [главе 3](#) (рис. 28), она создана, по существу, лишним слоем атомов, вдвинутым в кристалл словно лист бумаги, наполовину вложенный между страницами книги. Краевые дислокации могут возникнуть в процессе образования кристалла. Примером их могут служить так называемые “малоугловые границы”: когда два растущих кристалла встречаются под небольшим углом и соединяются вместе, образуя сплошное тело, линия их соединения оказывается цепочкой краевых дислокаций, которые впоследствии могут, конечно, перебраться на новые места.

Существование винтовых дислокаций предсказал в 1948 году Франк. Они понадобились ему не столько для объяснения механических свойств кристаллов, сколько для объяснения их роста. Переход атомов или молекул из раствора или из пара и более или менее непрерывное осаждение их на растущем твердом кристалле сопровождается изменением энергии системы. Пойдет или не пойдет такой процесс - зависит от так называемого пересыщения, грубо говоря, от того насколько охотно молекулы покидают раствор или пар. Можно, например охладить раствор сахара или соли значительно ниже температуры, при которой должны расти кристаллы, а кристаллы не появятся, пока не окажется для них подходящей поверхности.

Для гладкой плоской поверхности можно вычислить степень пересыщения, которой можно достичь без выпадения материала. Она оказывается довольно большой. Франк занимало, что на практике многие кристаллы растут себе на здоровье при пересыщениях, которые намного меньше теоретически рассчитанных для присоединения атомов к плоской поверхности. И в самом деле, если бы нам всегда пришлось осажждать кристаллы только на плоскую поверхность, многие кристаллы вряд ли вообще были бы получены. Но можно показать, что если поверхность имеет нерегулярность, неровность, такую, как, например, ступенька высотой хотя бы в одну молекулу, - осаждение будет намного легче.

Ступенька дает довольно уютное пристанище блуждающим молекулам, которые стремятся осесть именно здесь. Так и каменщик кладет кирпичи на уступе кладки. И точно так же, как и в случае кирпичной кладки, добавив один элементик,

мы не уничтожим ступеньку, а лишь переместим ее вдоль верхушки стены. Этот механизм в действии наблюдали Банн и Эммет в 1946 году. Напомним, что именно так получаются ступеньки, которые ослабляют поверхность усов и других кристаллов (глава 3).

Франк рассуждал примерно так. Допустим, что ступеньки роста существуют. Что же тогда получается, когда движущаяся ступенька доходит до кромки кристалла? По-видимому, она должна исчезнуть, как исчезает уступ на кирпичной стене, когда каменщик достигает конца стены. Если так, то как могла бы возродиться ступенька, чтобы начал расти следующий слой?

Ответ Франка был блестяще прост. Кристаллы никогда не строятся, как дома, из слоев кирпича. Ступенька роста никогда не исчезает на кромке, потому что кристалл строится подобно винтовой лестнице. Значит, кристалл просто “накручивается” сам на себя, все время используя одну и ту же ступеньку. Подобно тэйлоровой гипотезе о краевых дислокациях, идея о винтовых дислокациях покоряла своей логикой, и интуитивно казалось, что она должна быть верной. Так оно и получилось. Вскоре Форти и другие экспериментаторы подтвердили существование винтовых дислокаций (рис. 50).

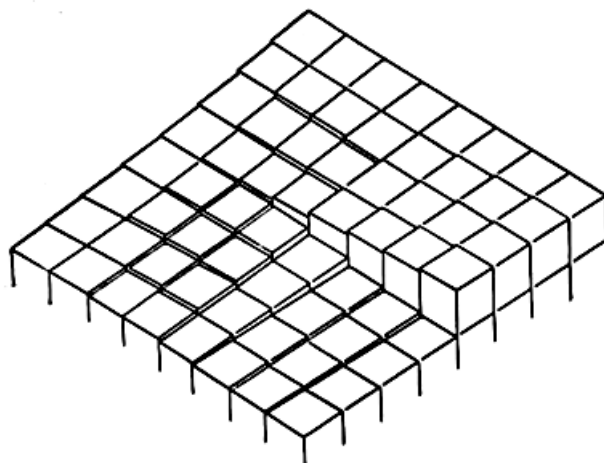


Рис. 50. Схема винтовой дислокации.

В схеме винтовой лестницы самой труднообъяснимой была ситуация в центре. Здесь, конечно, существует какой-то пробел, нестыковка, образующие некоторую линию по оси винта. Это и есть сама дислокация. Как и в случае краевой дислокации, межатомные связи здесь сильно деформированы, хотя ничего подобного отверстию, в обычном смысле этого слова, нет. Но вот усы довольно часто бывают полыми, трубчатыми. Возможная причина этого в том, что такие усы росли с винтовой дислокацией, ступенька которой была высотой не в одну, а в несколько молекул. Если так, то тогда деформации в ядре дислокации могут быть очень большими. Следовательно, кристалл может предпочесть энергии деформации поверхностную энергию, то есть расти с отверстием посередине.

Как случается с большинством удачных гипотез, с гипотезой о винтовой дислокации перестарались: с нею связывался почти каждый аспект роста почти каждого вида кристаллов. Сегодня, по-видимому, ясно, что многие кристаллы обходятся в своем росте без механизма Франка, но факт остается фактом - очень многие кристаллы используют этот механизм, винтовая дислокация - вполне реальное и очень важное явление.

Совсем не обязательно, чтобы дислокация была целиком краевой или винтового типа. Дислокационная линия может начинаться как краевая, а закончиться - как винтовая, и наоборот. А между началом и концом она может быть отчасти винтовой, а отчасти - краевой. В таких случаях говорят, что дислокация имеет винтовую и краевую компоненты. Но правила движения двух типов дислокаций неодинаковы, и в этом одна из причин сложностей поведения реальных дислокаций, представляющих собой обычно искривленные пространственные линии.

Сегодня теория дислокации - тщательно разработанная и поощряемая наука, которая, несомненно, пролила свет на поведение твердых тел, особенно металлов. Теперь мы в значительной мере понимаем реальное поведение металлов. С другой стороны, нельзя сказать, что знания о дислокациях привели к каким-то радикальным усовершенствованиям механических свойств материалов. Что касается металлов, то можно, пожалуй, сказать, что большая часть возможных и важных улучшений была сделана еще традиционными эмпирическими методами, а роль дислокационной теории свелась к объяснению того, почему и как эти улучшения получились.

Наблюдение дислокаций

Какой правдоподобной и логичной ни была бы научная гипотеза, для большинства людей она остается все-таки голой абстракцией, пока нельзя будет что-то потрогать собственными руками или увидеть собственными глазами. Косвенных или математических доказательств для них недостаточно. Примером может служить тепловая теория. Из элементарной физики каждый знает, что температура вещества определяется непрерывным и беспорядочным движением его молекул.

Но поскольку в том же курсе физики говорится еще, что молекулы слишком малы, чтобы их видеть, а также потому, что ощущения тепла и холода никоим образом не связываются с представлением о движущихся частицах, - мысль о теплоте, как о молекулярном движении, обычно не ощущается нами как реальность.

Ботаник Броун в 1827 году, наблюдая в микроскоп пыльцу некоторых цветов, обнаружил, что она находится в непрерывном приплясывании. Броуновское движение мельчайших твердых пылинок, взвешенных в воде, легко можно увидеть. Капните, например, обычной китайской туши или акварели на предметное стеклышко микроскопа и, накрыв каплю другим стеклом, взгляните на нее при довольно большом увеличении обычного оптического микроскопа. Вы увидите, что частицы помельче носятся в совершенно сумасбродной джиге. Сколько бы вы ни смотрели на этот танец, он будет продолжаться. А за танцем кроется вот что. Сами частицы туши или краски имеют что-нибудь около микрона в поперечнике, то есть они в несколько тысяч раз больше окружающих их молекул жидкости. Молекулы носятся взад-вперед совершенно беспорядочным образом. Наши частицы вовлекаются в эту толчею. Те частицы, что покрупнее, никак не реагируют на толчки, а вот для частиц помельче молекулярные толчки оказываются чувствительными, они прыгают от них в разные стороны так, что все это видно в обычный оптический микроскоп.

После того как вы увидели своими глазами броуновское движение, ваше представление о природе теплоты будет уже совсем иным. Теперь вы можете сказать, что не просто заучили какие-то объективные научные истины, а уже на ты с кинетической теорией тепла. Разница примерно такая же, как читать о заходе солнца и самому наблюдать закат.

То же самое и с дислокациями. Абстрактная теория становилась очень осязаемым явлением. Но как же увидеть дислокации? Прежде всего с помощью химического травления. Мы уже говорили, что деформированные межатомные связи более уязвимы для химических и физических воздействий, чем недеформированные. Следовательно, если протравить кристалл (обычно в кислотном растворе), то места, где дислокации выходят на поверхность, протравятся более интенсивно, чем окружающий материал. В результате на поверхности кристалла появится серия так называемых ямок травления, которые обычно легко просматриваются в оптический микроскоп. Такая техника наблюдения дислокаций очень распространена, и специалисты, наблюдая полученные путем травления оспинки, могут сделать довольно далеко идущие выводы. Одним из ухищрений здесь является раскалывание кристалла надвое. Любая дислокация, существовавшая в кристалле до начала эксперимента и проходившая через плоскость раскола, будет, конечно, одной и той же на обеих половинках. Одна из половинок выбирается как контрольная и травится немедленно, чтобы выявить исходную дислокационную картину, а другая половинка деформируется (либо с нею ставится какой-то другой эксперимент), а уж затем травится. Сравнивая картину ямок травления на двух поверхностях, можно видеть, какие из дислокаций образовались в ходе эксперимента, а какие - передвинулись.

Травление - полезный прием, но его нельзя считать способом прямого наблюдения дислокаций. Следующий шаг в этом направлении был сделан Хиршем в Кэвендишской лаборатории (Кембридж). Он использовал свойство очень тонкой металлической фольги быть практически прозрачной в электронном микроскопе, а вот любые нарушения кристаллической решетки дают темные образования. Поэтому дислокации представляются здесь темными линиями на белом фоне.

Все это хорошо, но было бы интереснее взглянуть на движущуюся дислокацию, а для этого на нее нужно воздействовать, создав какое-то напряжение. Нелегко приложить механическое напряжение непосредственно к фольге, которая настолько тонка, что становится прозрачной для электронного пучка. Поэтому Хирш использовал для нагрева фольги, расширения и, стало быть, нагружения образца энергию самого электронного пучка. Все сработало очень хорошо, и Хирш смог снять кинофильм о дислокациях в движении. Фильм получился очень впечатляющим. Дислокации являли собой таинственную картину суестьихся мышей.

Опыты Хирша, однако, не преследовали цель увидеть индивидуальные атомы или трехмерную шахматную доску кристаллической решетки. Дислокации у Хирша были всего лишь черными линиями деформации на белом или сером фоне. Но, как мне кажется, чего мы действительно хотим, так это увидеть слой атомов, обрывающийся где-то в кристаллической решетке. Однако, прежде чем увидеть дислокацию в кристаллической решетке, нужно бы увидеть ... саму решетку. В металлах и в большинстве обычных кристаллов параметр решетки близок к 2 А. А в те времена, о которых я сейчас говорю (середина 50-х годов), самое лучшее разрешение электронного микроскопа было около 10 А. Стало быть, не было никакой надежды увидеть атомные слои обычными средствами. Эту трудность первым преодолел Джим Ментер, работавший в Хинкстон Холле близ Кембриджа. Он приготовил тонкие кристаллики вещества, называемого фталоцианином платины. Молекула этого органического соединения - плоская, примерно квадратная, около 12 А в поперечнике. В середине квадрата - дырка, а в этой дырке в случае фталоцианина платины - атом платины. В кристалле эти плоские молекулы упаковываются так, что расстояние между слоями молекул оказывается 12 А, и центре каждого ряда молекул проходит линия тяжелых атомов платины, стоящих особняком от легких атомов панической молекулы. Таким образом получают линии платиновых атомов в регулярном кристаллическом расположении, расстояние между которыми 12 А вместо обычных 2 А. Органическую часть молекулы можно считать прозрачной набивкой, которая держит на нужном расстоянии плотные, с неясными очертаниями атомы платины.

Настраивая микроскоп на максимальное разрешение, можно было увидеть решетку этого кристалла. Пожалуй, она была похожа на нарисованные угольком слегка лохматые полосы на более светлом сероватом фоне - что-то вроде строк на телевизионном экране. Бросалась в глаза невероятная регулярность кристалла. При большом, увеличении бесчисленные рыхловатые полоски тянулись идеально прямо. Конца им, казалось, нет. Число слоев было огромным. Миллионы миллионов молекул, каждая точно на своем месте.

Потребовалось внимательно пересмотреть громадное число фотографий, прежде чем была найдена краевая дислокация. Она выглядела точно так же, как ее рисовали вот уже двадцать лет: одна темная расплывчатая полоска оборвалась, а соседние сомкнулись, чтобы ликвидировать зазор (рис. 51). Ментер успел послать эту фотографию Дж. Тэйлору как раз вовремя - к его семидесятилетию.

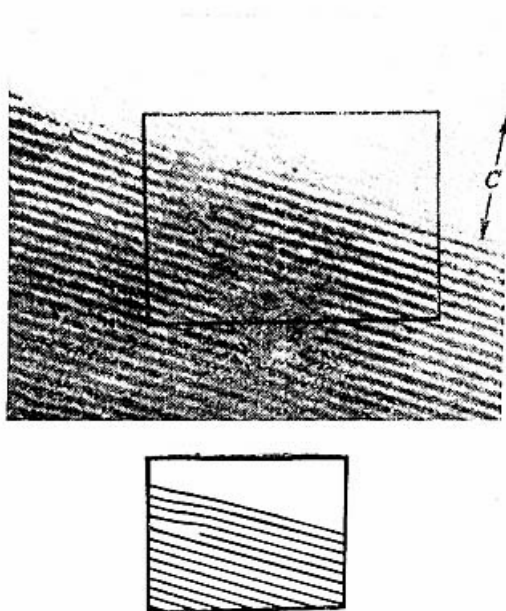


Рис. 51. Первая прямая фотография краевой дислокации, полученной Дж.В. Ментером. Большой размер молекулы фталоцианина платины позволил увидеть в электронном микроскопе расстояние между атомами.

Нужно сказать, на нас, работавших в Хинкстоне в то время, эти картинки, выходявшие мокрыми из фотокомнаты, оказывали магическое воздействие.

Опыты Ментера по визуализации атомных слоев и дислокаций в них с помощью электронного микроскопа были очень убедительными, это сделало их знаменитыми.

Однако существует и другой подход к той же задаче. В главе 3 мы говорили о сделанной Маршем очень чувствительной разрывной машине для усов и других тонких волокон. Эта машина может обнаруживать удлинения по порядку 4-5 А, что примерно равно разрешению современного электронного микроскопа. Сдвиг, вызванный инициальной дислокацией, дает перемещения около 1 А и, следовательно, не может быть замерен на этой машине. Но источник дислокаций порождает их в таком количестве, которого хватает, чтобы произвести перемещение в 100-500 А, а это уже легко может быть зафиксировано машиной Марша.

Когда мы проводим обычное испытание на растяжение образца осязаемых размеров из любого пластичного материала (например, мягкого металла), то получаем диаграмму напряжение - деформация в виде плавной кривой, изображенной на рис. 52, которая хорошо знакома инженерам и металловедам. Если мы возьмем теперь чрезвычайно тонкий, но пластичный образец (например, большой ус) и испытаем его на машине Марша, то получим нечто совершенно другое.

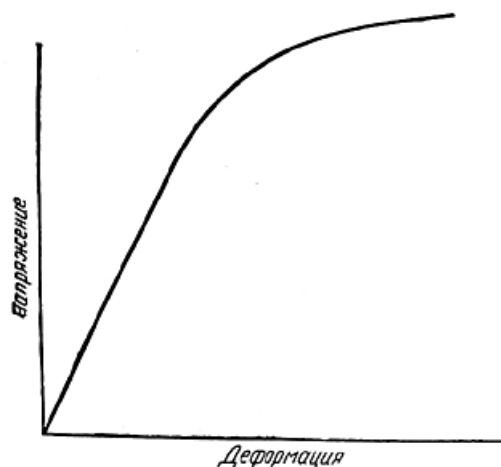
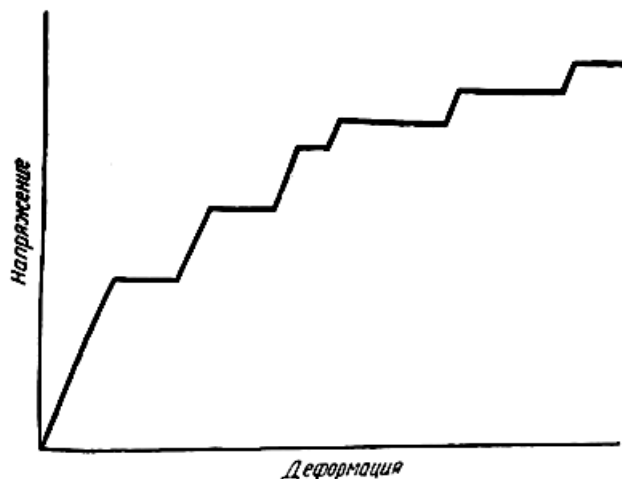


Рис. 52. Обычная кривая напряжение - деформация при испытании макроскопического пластичного образца.

Типичный результат испытания показан на рис. 53. Здесь мы видим упругое удлинение, прерываемое внезапными включениями источников дислокаций. Источники работают совершенно беспорядочно, и вызываемые ими сдвиги протекают практически мгновенно. Именно поэтому диаграмма напряжение-деформация имеет серию ступенек. Дело в

том, что на каждом уровне напряжений существуют источники, готовые породить сотни дислокаций. Но эти источники пускаются в ход беспорядочными тепловыми толчками, подобными тем, которыми возбуждаются частицы в случае броуновского движения. То же самое происходит и в большом образце, но в столь многих местах и столь часто, что суммарный эффект выражается плавной кривой. Поведение малого образца с его беспорядочными и внезапными движениями еще раз убеждает нас в реальности дислокаций.

Рис. 53. Кривая напряжение - деформация для очень малого макроскопического образца (уса) материала, испытанного на машине Марша. Пластическое удлинение происходит ступенчато, каждая ступень соответствует работе источника дислокации.



Ползучесть и жаропрочность

Следствия из всего сказанного для поведения металлов в рабочих условиях довольно очевидны. Когда металл нагружается намного ниже предела упругости, то есть работает где-то в глубине гукковского участка кривой напряжение-деформация, удлинение материала не подвержено влиянию времени. При необходимости мы могли бы оставлять материал под нагрузкой в течение веков, не вызывая каких-либо деформаций или повреждений материала. Однако вблизи предела упругости материал становится заметно подверженным влиянию как времени, так и температуры. Мы видели, что даже при комнатной температуре тепловые толчки активируют источники дислокаций, так что пластическая деформация со временем накапливается: материал удлиняется, а в некоторых случаях может разрушиться. Иными словами, мы не можем назвать прочность такого материала, пока не укажем также и скорость нагружения или не уточним, как долго будет действовать на материал нагрузка. Следовательно, такие конструкции, как подвесные мосты, нагруженные непрерывно в течение многих лет, должны быть рассчитаны на меньшие напряжения, чем те конструкции, которые нагружаются ненадолго и от случая к случаю. Используемые на практике металлы обнаруживают некоторую ползучесть даже при довольно малых напряжениях, и на это следует обращать внимание, когда важно обеспечить точность размеров.

Нетрудно представить себе, что напряжения, при которых с ползучестью надо считаться, сильно зависят от температуры. В то же время температура часто определяет вид машины в целом. Особенно она важна для тепловых машин, например таких, как газовые турбины. В целом, чем горячее нагретые части машин, тем большего полезного эффекта можно ожидать от всей конструкции, особенно в отношении экономии горючего. Так как железо плавится при температуре, несколько превышающей 1500°C , а есть и более тугоплавкие металлы, то можно было бы подумать, что не существует особых трудностей в эксплуатации машин при температуре, скажем, 1200°C . Ведь это намного ниже температуры плавления. Но дело обстоит далеко не так.

Верно, что железо не плавится ниже 1500°C . Но ведь расплавленный металл течет под действием собственного веса, то есть при ничтожных напряжениях. А стоит нам приложить механическое напряжение, даже совсем малое, как течение и неизбежное разрушение появляются задолго до плавления. Прочность резко снижается даже при сравнительно быстрых нагружениях (например, при испытаниях на обычных установках). Более того, когда элементы машин подвергаются длительному нагружению в одном направлении (например, турбинные лопатки под действием центробежных сил), мы должны пристально следить за ползучестью.

При кратковременных нагружениях прочность металлов изменяется с температурой приблизительно так, как показано на рис. 54. Можно сказать, что материал умирает медленно, постепенно. В качестве очень грубого рабочего правила, верного для большинства металлов, можно принять, что материал не может использоваться при температурах выше половины его температуры плавления, выраженной в градусах Кельвина (градусы Кельвина = градусы Цельсия + 273; см. приложение).

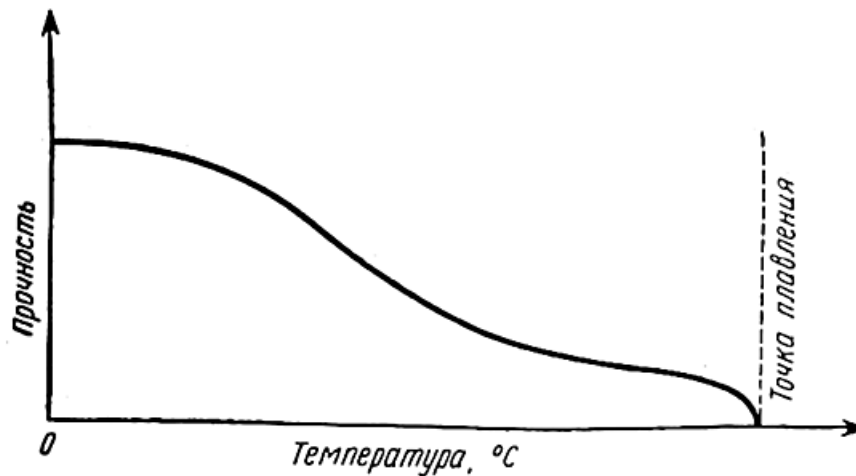


Рис. 54. Зависимость “кратковременной” прочности металла от температуры испытания.

Конечно, можно поднять рабочие температуры сплавов. Для этого нужно тем или иным способом затормозить движение дислокаций. Трудность здесь заключается в том, что большинство добавок, которые можно было бы использовать с этой целью, сами стремятся стать подвижными при высоких температурах. Все это дело чрезвычайно трудное, и, наверное, металловеды неплохо поработали, чтобы достигнуть рабочих температур около 950-1000°С на очень специальных сплавах для турбинных лопаток. Рабочие температуры обычных сталей намного ниже.

Во многих керамических материалах дислокации практически неподвижны при температурах до 1500°С, но эти материалы, как правило, чрезвычайно хрупки при сравнительно низких температурах. Поэтому керамические материалы очень хороши для неподвижных конструкций, например в качестве огнеупоров для печей, где они могут работать под нагрузкой при температурах, поразительно близких к точкам плавления. Но они обычно не годятся для изготовления подвижных деталей машин.

Глава 9

ЖЕЛЕЗО И СТАЛЬ, или ГЕФЕСТ СРЕДЬ ЧЕРТОВЫХ МЕЛЬНИЦ

Я пошлю им локомотив, он будет Великим Миссионером.

Дж. Стефенсон

Древесина и камень всегда были наиболее распространенными материалами конструкций, металлы же - относительно новое приобретение техники. Поэтому все мы осознаем новаторскую роль металлов, хотя, как мы видели, общий тоннаж используемых металлов все еще уступает старым материалам. Но металлы, особенно железо, как нельзя лучше подошли для того рода машин, которые были проклятием и славой промышленной революции. Именно благодаря разработке дешевых методов получения и обработки железа в больших количествах появилась возможность механизации труда. Сталь, как известно, стала дешевым материалом только во второй половине XIX века, когда главные события промышленной революции были уже позади.

Однако, будучи материалом необходимым, железо использовалось в большинстве первых машин, даже в паровых машинах, все же весьма ограниченно. В первом фултоновском пароходе, плававшем по Гудзону, даже котел (невероятно!) был деревянным; нагрев воды производился в отдельном устройстве из железных труб. Правда, американцы считали, что это уж чересчур, но и на американских речных пароходах дерево использовалось тогда в такой степени, которая современному инженеру кажется почти невероятной. А ведь такие пароходы обеспечивали большую часть внутриамериканского грузооборота вплоть до 60-х годов прошлого столетия.

Вообще говоря, использование металлов требует решения двух проблем. Во-первых, металл должен быть получен из руды, этим занимается металлургия. Во-вторых, нужно перевести металл в наиболее полезное состояние с точки зрения твердости, прочности и вязкости; подсказать здесь необходимые пути призвано металловедение. Как мы уже видели, чистые металлы обычно очень мягки, поэтому металловеды занимаются в основном торможением дислокаций, но лишь в такой мере, чтобы упрочнить металл, не вызвав его охрупчивания. Поскольку металлы из руды часто получаются в нечистом виде, их экстракция (извлечение) и последующая обработка должны рассматриваться совместно.

Химические и технологические особенности обработки могут варьироваться очень широко, но в каждом случае цепь остается одной и той же: управление подвижностью дислокаций путем изменения структуры и размеров кристаллов (дислокации могут пересекать границы между отдельными зернами, но для этого они должны преодолеть определенное сопротивление) или с помощью добавок легирующих элементов. Легирующие сплавы могут дать такой результат, который затормозит дислокации как раз в нужной степени. Очень малые частицы, даже единичные атомы примеси, могут застопорить продвижение дислокационной линии, если эта линия натолкнется на них. Можно вычислить напряжение, необходимое для того, чтобы сначала выгнуть дислокацию в дугу между точками закрепления, а затем и оторвать ее от них. Это напряжение зависит от расстояния между этими точками, которое становится, таким образом, полезным и мощным средством управления свойствами сплава. Почти любая добавка к металлу будет влиять на его механические свойства в лучшую или худшую сторону, а иногда и в ту и в другую сторону сразу: некоторые добавки полезны, когда они рассеяны по всему объему, и вредны, когда, собираясь на границах зерен, серьезно ослабляют металл (см. главу 3).

Если мы возьмем число всех пластичных металлов и умножим его на число возможных механизмов упрочнения, то окажется, что количество взаимосвязей и комбинаций в металловедении будет весьма большим, отчего сам предмет покажется уже очень сложным. Однако для неспециалиста, интересующегося лишь принципами и конечными результатами, все следствия происходящих в металлах процессов можно представить в достаточно простом виде.

Посмотрите на табл. 2 (гл. 10). В нее внесены многие технические металлы, и хотя плотность их весьма различна - от $10,5 \text{ г/см}^3$ у молибдена до $1,7 \text{ г/см}^3$ у магния, - модуль Юнга, деленный на плотность, удельный модуль Юнга, оказывается для них всех величиной постоянной. Существуют, правда, некоторые широко применяемые металлы и сплавы (например, медь и латуни), для которых удельный модуль упругости немного ниже. Но пластичных металлов с более высокой удельной жесткостью нет. Таким образом, почти все используемые металлы дают ту жесткость, за которую заплачено их собственным весом, - ни больше, ни меньше.

Как уже говорилось, все эти металлы в чистом состоянии очень мягкие, и задача металловедов состоит в том, чтобы поднять их прочность и твердость, не допуская чрезмерного охрупчивания. Если судить по деформации, успехи металловедения отличаются удивительным постоянством. Обычно максимальная упругая деформация, которую можно получить на металле без придания ему недопустимой хрупкости, колеблется около 1%. Однако в большинстве случаев инженеры считают металлы в таком состоянии малопластичными и потому малопригодными и, как правило, вынуждены ограничиться максимальной упругой деформацией между 0,25 и 0,5%, тогда, как остаточное удлинение может доходить до 50-60%.

Следовательно, весьма приближенно все металлы можно считать членами одного семейства с очень схожими удельными жесткостями, удельными прочностями и удлинениями. Конечно, это очень грубое обобщение, и уж совсем не так стоит вопрос для металловедов, которые упорно продолжают предпринимать попытки получить лучшие комбинации удельной прочности и вязкости (с удельной жесткостью ничего не поделаешь), хотя возможности их здесь довольно ограничены. Металловеды достигли успехов в попытках сохранить прочность с повышением температуры. Во многих случаях это важнее, чем повышение прочности при комнатной температуре.

Нет нужды описывать здесь специальные металлургические процессы и различные виды обработки всех металлов и сплавов. На эту тему написано множество книг. Однако огромная социальная и техническая значимость железа и стали заставляет рассказать о них немного подробнее. Приступая к делу, я слишком хорошо отдаю себе отчет в размерах и трудностях этого предмета. Возможно перед началом я должен принести какую-то жертву Гефесту, кузнецу и оружейнику Олимпа, единственному технологу, принятому в круг главных богов.

Железо

Прочность железа и стали определяется чрезвычайно сильным влиянием углерода, содержащегося в кристалле железа, на движение дислокаций. Конечно, дислокационные явления оказались понятными лишь совсем недавно. Да что там дислокации, даже сравнительно простая химия процесса получения железа из руды была осознана к концу периода промышленной революции. Однако практическая металлургия железа была разработана и без этого, и сейчас она во многом остается традиционным процессом. Подобно тому как текстильное дело с его прядением и ткачеством уходит в доисторические времена, а вклад современных фабрик сводится к механизации и рационализации простых ручных операций, так и производство стали основано сейчас на усложненных схемах, которые сами по себе существуют с незапамятных времен. Именно поэтому процессы черной металлургии лучше всего понимаются на историческом фоне.

Величайшая трудность древних металлургов (исключая, конечно, их научное невежество) была связана с получением достаточно высокой температуры в печи. Современное металлургическое оборудование дает в руки металлурга высокую и регулируемую температуру. Это сокращает время получения металлов и сплавов, так как позволяет объединять в один процесс несколько операций. Естественно, сейчас и масштабы другие. Современная печь может дать тысячу тонн стали в день, тогда как средневековый мастер был бы доволен, получив килограммов пятьдесят металла.

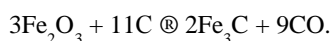
Не в пример бронзе, которая может плавиться при $900-1000^\circ \text{C}$, что как раз обеспечивают обыкновенные дрова, чистое железо плавится при 1535°C , а эта температура веками лежала за пределами технических возможностей. Однако уже довольно малые добавки углерода значительно понижают температуру плавления железа, а углерод всегда под рукой - ведь для нагрева руды использовали в качестве топлива древесный уголь. Самая низкая температура плавления,

достижимая на этом пути, - около 1150° С, она получается, когда 4-4,5% углерода продиффундировало (то есть просочилось) в металл *. Достижение такой температуры представляло определенные трудности для древних, но все же ее можно было получить на древесном угле, поддувая в него воздух мехами.

* Количество углерода в железе и стали кажется удивительно малым. Нужно помнить, однако, что эти количества выражаются обычно в весовых процентах, а атом углерода намного легче атома железа, грубо говоря, в пять раз. Поэтому в атомных процентах доля углерода значительно больше и может достигать 20%.

Железные руды состоят в основном из окислов железа; чаще всего встречается красный железняк Fe₂O₃. Между прочим, окислы железа используются в красках (охра, железный сурик, мумия).

Первое, что необходимо сделать с рудой, - удалить кислород. Если нагревать руду с помощью древесного угля или кокса, это получается почти автоматически:



Кислород вместе с частью углерода уходит прочь в виде окиси углерода (угарного газа), оставляя карбид железа, называемый обычно цементитом (в нем содержится 6,7% углерода). На практике вместе с первой идет и другая реакция:

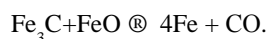


Таким образом получается также и некоторое количество чистого железа, в конце процесса мы имеем смесь железа и карбида железа, содержащую в целом около 4% углерода. Железо и карбид могут взаимно растворяться, и именно этот раствор, имеющий низкую температуру плавления, был ключом того процесса, который использовали древние для получения железа. Он же идет и в современной домне.

Железные руды содержат не только окислы железа, но и различные минеральные примеси - главным образом, окислы других металлов. Сами по себе они имеют высокие температуры плавления, и если бы руда нагревалась в контакте только лишь с углеродным топливом, то вряд ли удалось расплавить ее полностью. Здесь на помощь приходит флюс, который добавляют обычно в виде извести (СаО) или известняка (СаСО₃). В данном случае известь выполняет те же функции, что и в стекловарении, то есть она снижает температуру плавления нежелезных окислов, образуя вместе с ними легкоплавкую стекломассу. Эта масса называется шлаком. На вид она грязно-коричневого или серого цвета. По нынешним временам она иногда перерабатывается в шлаковату, используемую для теплоизоляции.

Таким образом, на дне печи получается смесь железа, карбида железа и шлака. В самых первых печах эта смесь проплавлялась неполностью, ее извлекали в виде тестообразного куска, слитка, содержащего древесный уголь и другие включения. Включения эти составляли самостоятельную проблему, а, кроме того, из карбида железа негоже было делать оружие и инструмент - карбид очень хрупок. Причина хрупкости карбида железа в том, что в отличие от кристаллов почти чистого железа, построенных на металлической связи, которая благоприятствует движению дислокаций, он частично построен на ковалентных связях, которые не обеспечивают заметной подвижности дислокаций вплоть до температуры около 250° С. Поэтому в таком виде металл куется лишь в горячем состоянии, при комнатной температуре он хрупок.

Такое железо и попадало в руки первых кузнецов. Нагревая это железо до 800-900° С, они ковали его с громадным трудом. Вначале труд был ручным, затем начали использовать силу воды (“кузнечные пруды”!). Ковка имела два следствия. Во-первых, она механически выдавливала большинство включений и часть шлака и снижала содержание углерода в железе. Второе следствие заключалось в следующем. Железо, нагретое до умеренных температур на воздухе, образует окисную пленку, обычно FeO. Нагретое и расплющенное ударами молота железо кузнец стибал вдвое и снова начинал по нему бить. Пленка окисла попадала между слоями горячего слитка, контакт между слитком и пленкой под ударами молота становился практически идеальным, в результате чего начиналась реакция



Когда требовалось железо высшего качества, поочередное расплющивание и складывание вдвое повторялось многократно, порой тысячи раз. Вот почему на мечех заметен изящный волнистый рисунок - это тонкие слои металла и следы ударов молота. Если вся работа выполнялась надлежащим образом, то удалялся почти весь углерод. Такое кованое железо (его называют сварочным или ковочным) с небольшими примесями кремния, в целом полезными, содержало также прожилки шлака, тоже до некоторой степени полезные. Дело в том, что очищенное железо было, вообще говоря, слишком мягким, и стекловидные волокна шлака несколько ограничивали его текучесть. Кроме того, сварочное железо обычно прекрасно сопротивлялось коррозии. Частично это объясняется чистотой самого железа, но существует и другое объяснение. Многие полагают, что начальная пленка ржавчины удерживалась на поверхности с помощью шлаковых включений. Она не отлетала со временем и служила защитой от последующей коррозии.

Сварочное железо прямо с наковальни было слишком мягким, чтобы делать из него оружие и инструмент, поэтому его нужно было сделать потверже, увеличив содержание углерода; для этого достаточно было насытить углеродом поверхность. Почти этот же процесс находит широкое применение и до сих пор. Он называется “цементацией”. Мечи

(или другое оружие) погружались в среду, содержащую в основном углерод, а также некоторые секретные приправы сомнительной эффективности. Все это нагревалось в течение такого времени, которое необходимо, чтобы углерод проник на глубину 0,5-1,0 мм.

Поверхностное науглероживание резко повышает твердость, но еще лучший результат дает последующая закалка быстрым охлаждением в жидкости. Механизм закалки очень сложен. Коротко дело обстоит так. Горячая сталь состоит из аустенита, то есть из раствора углерода в такой модификации железа, которая нестабильна при комнатной температуре. Процесс распада аустенита с выделением углерода определяется особенностями охлаждения. При сравнительно медленном охлаждении получается перлит. Под микроскопом структура такой стали выглядит переливчатой, отсюда и название - "перлит" значит жемчужный. Переливы дают чередующиеся полосы или слои чистого железа (феррит) и карбида железа (цементит). Сталь с такой регулярной структурой получается вязкой и довольно прочной, но не особенно твердой. Если аустенит охлаждать очень быстро, то в основном получится мартенсит - другой вариант железоуглеродистого кристалла, в котором положение атомов углерода среди атомов железа таково, что исключает возможность движения дислокаций, и кристалл получается крайне твердым. Обычно аустенит превращается в мартенсит с очень высокой скоростью (что-нибудь около 5 км/час), для получения большого количества мартенсита охлаждать изделие нужно с наибольшей возможной скоростью.

Закалку можно производить в воде, обычно так и делается; но исторически, вероятно, всегда отдавалось предпочтение разным биологическим жидкостям, например моче*. Оказывается, действительно такая практика имеет два преимущества. Первое состоит в более быстром охлаждении металла. Когда горячий металл попадает в воду, вокруг него образуется оболочка из пара, которая не позволяет жидкой воде касаться металла, что затрудняет передачу тепла. Если при закалке применяется моча, на поверхности металла при испарении воды образуется слой кристалликов. Это улучшает теплопередачу, поскольку паровая прослойка уменьшается. Более того, содержащиеся здесь соединения азота - мочевины и аммиак - разлагаются и азот проникает в железо, то есть происходит азотирование поверхности, при этом образуются твердые иглоподобные кристаллы нитрида железа Fe_2N , а отдельные атомы азота внедряются в кристаллическую решетку железа, становясь так называемыми примесями внедрения, которые закрепляют дислокации. Правда, степень азотирования в процессе такой закалки очень невелика. В современной практике азотирование проводят путем выдержки изделия в течение двух-трех дней в моче или аммиаке. Столь продолжительная выдержка делает эту обработку довольно дорогой, поэтому ее применяют только в случаях крайней необходимости**.

* В книге "Схемы различных искусств" Теофила Пресбрайтера (XI век) приводится следующая рекомендация:

"По другому способу закалка железа ведется тем же путем, которым режутся стекла и размягчаются камни. Возьми трехлетнего черного козла и держи его взаперти на привязи трое суток без корма. На четвертый день накорми его папоротником. После того как он два дня поест папоротник, помести его на очередную ночь в бочку с решетчатым дном. Под бочку поставь сосуд для сбора его мочи. Набрав за двое - трое суток достаточное количество жидкости, выпусти козла на волю, а в этой жидкости кали свой инструмент..."

** Конечно, железо должно быть нагретым, чтобы в него проникал азот.

Интересно заметить, что весь металлургический процесс состоит из ряда стадий, каждая из которых заходит дальше, чем нужно, и на каждой последующей стадии полученные результаты корректируются. Так, сначала получают чугун, который содержит слишком много углерода, а потому слишком тверд. Потом удаляют почти весь углерод и обнаруживают, что железо стало слишком мягким, и поэтому снова в него следует добавить углерод. Если мы хотим получить твердый инструмент или оружие, то полученная сталь должна быть закалена быстрым охлаждением в жидкости. Закаленные стали (и цементованное железо) часто слишком хрупки, и требуется еще одна, на этот раз последняя, обработка - отпуск.

В процессе отпуска закаленный металл нагревается до температур 220-450° С и после этого охлаждается на воздухе. Отпуск делает сталь несколько мягче, в процессе отпуска часть мартенсита переходит в более мягкую и пластичную структуру. С повышением температуры эффективность отпуска увеличивается. Между прочим, существует традиционный способ определения температуры отпуска по цвету окисной пленки на поверхности металла - по цветам побежалости. С ростом температуры цвет окисной пленки изменяется от желтого до коричневого, затем становится фиолетовым и, наконец, синим. Ясно, что простые углеродистые стали нельзя использовать при повышенных температурах, так как их свойства при этом резко ухудшаются.

Чугун

Мы уже говорили о том, что вряд ли в первых домнах железо всегда проплавлялось, его извлекали из печи в виде грязноватого кома. Однако к середине V века до н. э. (времена Перикла) греки уже научились плавить железо и даже выливали его из печи в изложницы. В античной Греции чугун уже был известен, но из-за своей хрупкости использовался он ограниченно и значительной роли в экономике не играл. В дело шло преимущественно сварочное железо.

С падением Римской империи упала и температура в печах и, по-видимому, в Западной Европе чугун не делали вплоть до XIII века. Однако после изобретения пороха положение изменилось. Правда, вначале стволы пушек ковали из сварочного железа и стягивали железными обручами подобно бочкам. Но росло умение, росли и объемы печей. Пушки начали отливать. Первые литые стволы рвались почти так же часто, как и стволы из кованых плит. Но литье обходилось намного дешевле*. Традиционные сорта чугуна не только очень хрупки, но содержат еще малые прослойки, прожилки, углерода в форме графита, которые действуют как внутренние трещины. В результате чугун был непрочен и ненадежен при

растяжении. Именно поэтому он был малоподходящим материалом для пушечных стволов, ведь ствол работает как сосуд давления. Однако примерно до 1860 года чугун продолжал оставаться единственным недорогим материалом, так как цены на латунь и бронзу были, как правило, слишком высокими. Чугунные стволы приходилось делать очень толстыми, поэтому пушки были чрезвычайно тяжелы. Например, пушка, стрелявшая 32-фунтовыми ядрами (основное вооружение английского корабля “Виктория”, сражавшегося при Трафальгаре), весила около 4-5 т. Таким образом, вес пушек составлял около 15% от водоизмещения боевого корабля **.

* Литые чугунные пушки так никогда и не стали надежными. В сражении при Трафальгаре французский корабль “Грозный” капитулировал после того, как на нем взорвались две пушки. Немногим лучше были и пушки времен Крымской войны.

** Со временем “Виктория” оказалась не в состоянии выдерживать вес собственных пушек, их пришлось заменить деревянными копиями.

Было время, когда отливки получали непосредственно из домы. Сейчас это не практикуется. Отчасти потому, что доменные печи стали намного больше, и разливать из них чугун в малые формочки было нерационально, а отчасти потому, что такой чугун обычно тверд, хрупок и непрочен. Сейчас почти весь чугун первоначально отливается в чушки. Часть этих чушек перерабатывается в сталь, часть переплавляется, при этом состав чугуна регулируют, чтобы получить нужные свойства. В настоящее время ценой небольших ухищрений можно получить достаточно вязкий чугун с довольно хорошей прочностью на разрыв. Ну а поскольку детали сложной формы, например, блоки цилиндров автомобильных двигателей) обычно дешевле получать путем отливки чугуна, чем штамповкой стали, то до сих пор ведутся работы по улучшению свойств чугуна.

В Англии железо вначале получали из руды с помощью древесного угля. Но в первой половине XVIII века взамен древесного угля, ресурсы которого постепенно скудели, научились использовать кокс. В Англии переход на кокс был практически завершен примерно к 1780 году, в континентальной Европе это произошло позже.

К концу XVIII века англичане могли сравнительно легко делать большие отливки, длиной до 20 м, и транспортировать их по воде. По современным меркам у этих отливок была довольно низкая прочность на растяжение, поэтому их можно было применять в конструкциях, работающих главным образом на сжатие. Например, в мостах. Здесь из чугуна можно было делать арки, подобные каменным. Каменные арки выкладывали из клинчатых камней, каждый такой камень нужно было вырезать из камня-заготовки, на что затрачивалось много ручного труда. Первые чугунные мосты делали из такой же формы литых полых элементов, которые подгонялись один к другому, как и в каменной кладке.

Знаменитый *Железный мост*, переброшенный через реку Северн у Колбрука в 1779 году, был как раз примерно такого типа. Это было первое большое железное сооружение. Его пролет несколько больше 30, общая длина 60, а высота 15 м. На него ушло 378,5 т чугуна, строили его три месяца. Стоил мост 6000 фунтов стерлингов и даже по ценам 1799 года был намного дешевле такого же моста из любого другого материала.

Железный мост получился удачным, но вместе с ним возникли и новые проблемы. Арочный мост, как и любая арка, давит на опору с силой, направленной наружу. В готических соборах эта сила компенсировалась контрфорсами, в мостах - кладкой и земляной насыпью. Нам как-то не приходит в голову, что чугун можно назвать легким материалом; а между тем в сравнении с камнем, который использовался для мостов до него, так оно и оказалось (с учетом прочности). В результате арка Железного моста обнаружила - по-видимому, впервые в истории техники - недостаток, противоположный обычным особенностям каменных арок и куполов: она оказалась слишком легкой, чтобы противостоять давлению земляных насыпей, которые, стремясь сползти в реку, давили на чугунную арку. Поэтому обычные насыпи пришлось заменить чугунными вспомогательными арками. Наверное, здесь инженеры впервые почувствовали, к чему приводит попытка залить новое вино в старые бутылки.

Пудлинговое железо

После того как в доменных печах с механическим поддувом начали применять кокс, чугун стал сравнительно дешевым. Получали его теперь вполне достаточно. Но использование чугуна в таком виде ограничивалось его хрупкостью и низкой прочностью на разрыв. Для большинства изделий требовалось более прочное и вязкое сварочное железо, а посколькуковка требовала больших затрат труда, такое железо оставалось дорогим и дефицитным материалом даже после появления молотов, приводимых в действие водой. И все же основным материалом промышленной революции было железо, так называемое пудлинговое железо. Сталь с ее различными сортами появилась в нужных количествах гораздо позже, и ее социально-экономическое воздействие было менее важным.

По-видимому, пудлингование (по крайней мере в его практических формах) было изобретено Генри Кортон (1740-1800), который запатентовал этот процесс в 1784 году. Корт сконструировал работающую на каменном угле пламенную печь. В мелкую ванну пудлинговой печи заваливали чугун, который, расплавляясь, окислялся кислородом газовой среды печи до образования двойного силиката. Последний стекал под слой шлака, оставшегося от предыдущей плавки, и окалины, специально заброшенной в печь. Для увеличения поверхности соприкосновения металла со шлаком прибегали к перемешиванию (пудлингованию) ванны длинной железной клюшкой, по форме несколько напоминающей мотыгу.

При перемешивании окись железа, содержащаяся в шлаке и окалине, реагировала с углеродом чугуна и образовывался угарный газ, который выходил на поверхность в виде пузырей. Выход газа сопровождался “кипением” металла, при этом из печи удалялась большая часть шлаков. С удалением углерода температура плавления железа увеличивалась, а

поскольку температура печи оставалась около 1400° С, железо начинало “успокаиваться” и затвердевало. Из полученного таким образом железа “накатывали” крицы весом около 50 кг каждая. Затем крицы одну за другой извлекали из печи. И хотя пудлингование было очень тяжелой работой, оно позволяло одному человеку выплавить около тонны железа в день, то есть производительность труда при этом процессе была в 10-20 раз выше, чем при производстве сварочного железа. В то же время новый процесс требовал и опыта, и навыков. Так что после наполеоновских войн английские металлурги долго еще зарабатывали на этом в европейских странах.

Вслед за пудлингованием нагретое железо пропускали через валки. За несколько проходов здесь получались плиты или прутки. В процессе прокатки горячая поверхность железа окислялась. Когда железо остывало, окалина отслаивалась, и ее отправляли обратно в печь. Таким образом, химически весь процесс был эквивалентен процессу получения сварочного железа в старые времена, но он был значительно более производительным. В наше время пудлингование практически не применяется, так как даже механизированная пудлинговая печь может дать до сотни тонн металла в день, а производительность бессемеровского конвертера, в котором воздух продувается через расплавленное железо, может доходить до 800 т стали в день. Да и спрос на железо сейчас невелик, потому что сталь и дешевле, и прочнее его.

Решение многих технических проблем зависит от того, какую прочность и вязкость материала можно получить при заданных затратах. Вся промышленную революцию в целом следует рассматривать и оценивать на фоне постепенно падавших цен на железо и малоуглеродистую сталь. Этот процесс очень ярко иллюстрируется историей железных дорог.

Железные дороги начинались с деревянных шахтных рельсовых путей, которые укладывались для того, чтобы облегчить перемещение вагонеток на конной тяге. К концу XVIII века такие деревянные рельсы стали заменять чугунными, более долговечными и с меньшим трением качения для колес. Чугунные рельсы позволили одной лошади тянуть по горизонтальному пути 4-5 груженых вагонеток. Для перевозки породы это считалось вполне удовлетворительным, и, может быть, вскоре дальнейших улучшений и не потребовалось бы, если бы в период наполеоновских войн резко не поднялись цены на корм для лошадей. Пришлось задуматься об использовании для привода вагонеток добываемого в тех же шахтах угля. На шахтах к тому времени уже интенсивно использовались паровые машины для откачки и для привода лебедок, но эти слишком громоздкие и тяжелые (по отношению к их мощности) стационарные машины низкого давления (0,2 ат) для транспортных целей совсем не годились.

Изобретателем локомотива повышенного давления был Ричард Тревитик (1771-1833), гений, умерший в бедности. Стефенсоны в отличие от него оба жили и скончались в почете и богатстве. Первый локомотив с повышенным давлением (3,5 ат) Тревитик построил в 1804 году, второй - в 1805 году (рис. 55). Обе машины были удачными, но обе оказались заброшенными. Корень зла был один - рельсы.

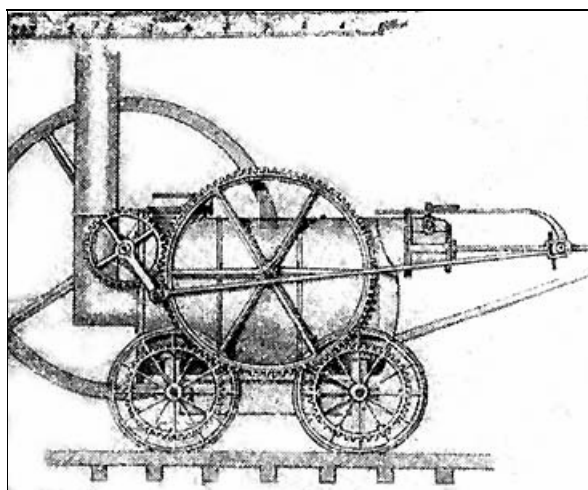


Рис. 55. Локомотив Тревитика (1805 год).

Локомотивы были дороги как в постройке, так и в эксплуатации. Стоимость годовой эксплуатации паровоза, включая амортизацию и т.д., оценивалась почти в 400 фунтов стерлингов. Несмотря на большую разницу цен на сено и уголь, это, конечно, намного превышало стоимость содержания одной лошади, хотя стоимость одной “лошадиной силы” паровой машины была меньше цены на живую лошадь. Локомотив мог быть экономичным лишь тогда, когда он либо тянул свой груз быстрее, либо тянул больший груз. Но увеличить скорость мешали работавшие на тех же линиях лошади, поэтому машина должна была потащить больше вагонеток.

Как известно, получить достаточное сцепление между гладкими металлическими колесами и рельсами, необходимое для того, чтобы тянуть любой заданный груз, не так уж трудно. Для этого на ведущие колеса должен приходиться такой вес, который не позволит им буксовать. Но именно тут и заключалась трудность. Прочность тогдашних чугунных рельсов была небольшой - они надежно выдерживали лишь вес бывшей тогда в ходу трехтонной вагонетки. Паровоз, который сам весил три тонны, естественно, не мог потянуть тридцать вагонеток такого же веса. А более тяжелый паровоз не выдерживали рельсы, так что локомотивы Тревитика пришлось переделать для стационарного использования.

После этого в истории развития железных дорог начинается период поисков такого сцепления колес с полотном, которое не разрушало бы рельсы. Сложность в том, что первые машины не имели рессор - не было достаточно прочной пружинной стали. Следовательно каждый толчок давал перегрузку на рельсы. Паровозы строили с восемью ведущими колесами, так что нагрузка распределялась между ними (рис. 56). Одним из наиболее популярных решений той же задачи были литые рельсы с зубцами, которые сцеплялись с зубьями колес, как это делается на современных горных дорогах (рис. 57). Эти сооружения имели много недостатков и никогда не работали нормально.

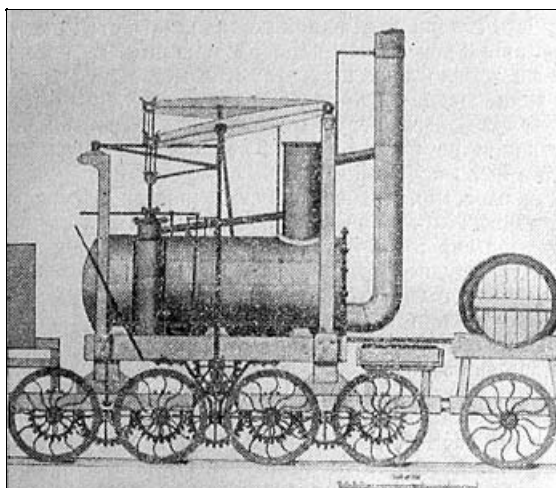


Рис. 56. Локомотив, в котором нагрузка распределялась между восемью связанными между собой колесами. Амортизация обеспечивалась только гибкими спицами.

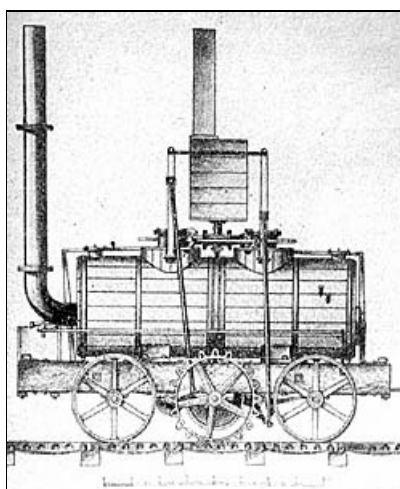


Рис. 57. Паровоз Бленкинсопа.

Джордж Стефенсон обошел отсутствие пружинной стали, снабдив свои машины “паровыми пружинами”: он подвесил оси на поршнях, плавающих в цилиндрах, заполненных острым паром - такая подвеска была очень похожа на подвеску, недавно примененную в автомобилях. Однако как только появились пружинные стали, Стефенсон отказался от таких подвесок из-за трудностей с уплотнением поршня*.

В 1821 году Дж. Биркеншоу запатентовал метод получения рельсов двутаврового сечения путем прокатки пудлингового железа. Одним из первых эти рельсы применил Стефенсон, который занимался тогда строительством железнодорожной линии Стоктон-Дарлингтон. В паровозе Стефенсона “Ракета” (1829 год) паклевую набивку заменили поршневые кольца.

Стоимость тонны железных рельсов Биркеншоу была примерно вдвое выше стоимости чугунных. Однако эффективная стоимость на милю пути оказывалась примерно такой же, потому что железные рельсы были прочнее, что позволяло делать их более легкими. Длина каждого рельса была 4,5 м. (Напомним, что длина кованых прутков, сделанных в Акрагасе в 470 году до н.э., была такой же.)

Некоторое время спустя в Америке ту же проблему решали уже иначе. Правда, американцы, по-видимому, вернулись к системе, использовавшейся на шотландских шахтных линиях что-нибудь в 1785 году. Так, на массивный деревянный рельс они укладывали сверху тонкую полоску сварочного железа. Пути получались довольно хорошими, но из-за того,

что полосы железа крепились к дереву гвоздями и костылями, такие крепления, ослабевая, время от времени выходили из строя. В этом случае конец полосы под тяжестью вагонов нередко завалился вверх, пробивая при этом пол идущего над ним вагона (порой с роковыми последствиями для сидящих там пассажиров).

Позже такого типа пути были реконструированы. Комбинированные рельсы заменили обычными железными. Но в Америке еще очень долго они были более легкими, чем в Европе, и опирались на очень часто уложенные шпалы. Это отражало соотношение цен на древесину и железо в Америке.

Примерно к 1860 году появилась дешевая сталь, но, чтобы вытеснить пудлинговое железо, потребовалось почти тридцать лет. В 1883 году примерно 70% доменного чугуна, произведенного в Великобритании, переделывалось на пудлинговое железо, вряд ли на сталь шло более 10%. К 90-м годам сталь и железо, если можно так сказать, поменялись местами. Железо так долго не сходило со сцены, надо думать, потому, что, будучи слабее, а иногда дороже стали, оно не без оснований считалось более надежным.

Первый сенсационный успех новой бессемеровской стали связан с прорывом блокады северян во время гражданской войны в Америке. Стальные пароходы южан (а среди них и знаменитый “Банши”) были построены в начале 60-х годов. Имея скорость около 20-22 узлов, они с почти пренебрежительной легкостью отрывались от флота северян, самые быстроходные суда которых развивали скорость не более 15 узлов. Некоторые из этих стальных пароходов закончили свою службу сравнительно недавно. Но хотя применение стали давало очень большую экономию в весе судов, нередко бывали и катастрофы, поэтому не случайно Британское адмиралтейство не использовало сталь в судовых корпусах примерно до 1880 года.

Первым примером использования стали в действительно больших и ответственных конструкциях следует считать, по-видимому, железнодорожный мост через реку Форт в Шотландии, построенный из мартеновской стали в 1889 году.

Сталеварение

Производство стали, особенно современной, - дело весьма сложное. Мы расскажем о нем лишь весьма кратко. Углеродистыми сталями мы называем сплавы железа с углеродом, содержащие до 2% углерода. Кроме углерода, в стали может быть немного шлаковых включений, а также контролируемые добавки других элементов (например, кремния и марганца). Традиционное сварочное железо, как вы уже знаете, почти не содержало углерода, но имело значительные шлаковые включения, в небольшом количестве входили в него и другие элементы. Как мы уже говорили, самая большая трудность первых железоделателей состояла в том, что, удаляя углерод из чугуна, они повышали точку плавления его примерно с 1150 до 1500° С, то есть за пределы возможностей их печей. Поэтому нельзя было удалить шлак, а чтобы получить нужную прочность и твердость, следовало вернуть в железо часть углерода; это можно было сделать, насыщая углеродом горячую, но уже твердую поверхность железа кузнечными методами.

Однако со временем температуру печей удалось несколько поднять, и примерно в 1740 году Бенджамин Хант научился плавить сварочное железо с небольшой добавкой углерода в установленных в печах глиняных тиглях. Ему удавалось проплавливать до 40 кг металла. При этом шлак, будучи более легким, всплывал на поверхность и его удаляли. Оставалось железо с небольшим количеством углерода и с прежними включениями. Содержание углерода можно было подогнать, так чтобы получить желаемую прочность и твердость, а свободную от шлака сталь вылить в изложницу.

Тигельная сталь была дорогой, отчасти потому, что исходным сырьем для нее служило довольно дорогое сварочное железо. Кроме того, качество ее было не всегда одинаковым, потому что никакие примеси, кроме шлака, не удалялись и не контролировались. Но даже и в таком виде тигельная сталь обычно была и дешевле, и лучше большинства “сталей”, из которых кузнецы ковали мечи, из нее делали высококачественный инструмент.

Если инструмент и оружие из прежних сталей имели дьявольски твердую поверхность и мягкую сердцевину, то из тигельной стали получались “насквозь” прочные изделия. Однако в некоторых случаях и эта сталь подвергалась науглероживанию (цементации), с тем чтобы уменьшить износ режущего лезвия. Так делается иногда и до сих пор. Правда, никто сейчас не получает обычную углеродистую сталь в тиглях, разве что делают это в экспериментальных целях или при выплавке дорогих легированных сталей в небольших количествах.

Бессемеровская сталь

Вплоть до середины XIX века тигельная плавка была единственным способом получения стали, для больших конструкций использовались лишь чугун и сварочное железо. Начало широкого промышленного производства стали связано с именами Генри Бессемера (1813-1898) и Роберта Мюшета (1811-1891). Бессемер был плодовитым изобретателем. Чутье бизнесмена позволило ему успешно запустить в дело несколько изобретений, в том числе способ изготовления “золотой” краски и уплотнения графита для изготовления карандашей. Получением стали он заинтересовался после истории с непрочными стволами чугунных пушек во время Крымской войны.

Поставив несколько опытов, Бессемер пришел к совершенно новой идее - удалять избыток углерода и других включений, продувая воздух через расплавленный чугун. В 1855 году он запатентовал этот способ. Вначале качество получаемой Бессемером стали было очень плохим, так как она содержала избыток окислов и серы. Но в 1856 году Мюшет получил

патенты на очень сходный с бессемеровским процесс, отличие которого состояло в том, что содержание включений, не выжигаемых полностью потоком воздуха, регулировалось добавкой так называемого зеркального чугуна, содержащего марганец. Именно добавка марганца в конце продувки обеспечила успех бессемеровского процесса.

Весь процесс ведется в устройстве, называемом конвертером, который представляет собой тигель грушевидной формы, установленный на цапфах так, что его можно наклонять. Конвертер не имеет наружных источников тепла. Воздух продувается через отверстия в его дне.

Чтобы запустить конвертер, его наклоняют и через горловину заливают в него расплавленный чугун (от 5 до 30 т железа, содержащего около 4,3% углерода и небольшие добавки кремния и марганца при температуре около 1200° С). Наполненный конвертер остается лежать на боку, при этом его содержимое располагается так, что не блокирует донных отверстий, в которые под давлением подается воздух. Затем конвертер поворачивается в свое рабочее вертикальное положение - в этом положении воздух должен “пробулькивать” через расплавленное железо. Вначале он окисляет содержащиеся в расплаве марганец и кремний. Образующийся шлак всплывает на поверхность. По традиции процесс контролируется наблюдением за цветом и характером пламени, вырывающегося из горловины конвертера. На этой стадии оно короткое и красновато-коричневое.

Через несколько минут марганец и кремний полностью окислены, доходит очередь до углерода. Цвет пламени изменяется до слегка желтоватого, языки его становятся длиннее и беспокойнее. Наконец, весь углерод удален, пламя спадает, и продувка выключается. В период продувки сжигание углерода, марганца и кремния, которые все вместе составляют до 6% плавки, дает очень много тепла. Его с избытком хватает для того, чтобы поднимать температуру в конвертере и поддерживать ее выше точки плавления, возрастающей в процессе выгорания углерода, приходится даже добавлять железный лом, чтобы немного охладить расплав, иначе повреждается огнеупорная футеровка конвертера.

К концу продувки получается почти чистое железо. Обычно в него требуется добавить немного углерода и марганца, иногда - кремния. Для этого используется твердый углерод в том или ином виде и зеркальный чугун, который имеет высокое содержание названных элементов. Марганец нужен в стали сам по себе как легирующий элемент, а кроме того, он регулирует содержание серы которая не удаляется бессемеровским процессом.

Сера доставляет много забот сталеварам. Она не окисляется до SO_2 , как можно было бы ожидать а образует сульфид железа FeS , который имеет ту особенность, что растворяется в жидком железе и не растворяется - в твердом. Поэтому сульфид железа выделяется на границах зерен при охлаждении стали и ослабляет сталь (см. главу 3). Добавка марганца превращает FeS в MnS , который нерастворим в жидкой стали и поэтому переходит в шлак. Марганец снижает также растворимость кислорода в стали, что опять-таки полезно, поскольку кислород стремится осесть на границах зерен.

На конференции сталеваров в 1856 году Бессемер описал свой процесс в докладе “О производстве ковкого железа и стали без топлива”. Энтузиазм аудитории и авторитет Бессемера были таковы, что немедленно было собрано по подписке в счет патентного вознаграждения 27 тысяч фунтов стерлингов, после чего участники собрания разъехались по домам и принялись за устройство своих конвертеров.

Но случилось так, что никто из них не смог получить сколько-нибудь удовлетворительной стали: бессемеровский процесс был очень чувствительным к сорту чугуна и, кроме того, требовал некоторых навыков. Не удивительно, что репутация Бессемера значительно пострадала. Тогда он построил полноразмерную действующую модель своего конвертера у себя в лаборатории на Сент-Панкрас и стал демонстрировать процесс сталеварения тем, кто купил у него лицензии. Но при этом он не столько стремился “обменяться опытом”, сколько старался показать некомпетентность слушателей и зрителей. Поэтому антибессемеровские настроения росли, и новый способ получения стали никто не хотел внедрять. В конце концов в 1850 году Бессемер построил собственный сталелитейный завод в Шеффилде, его сталь пользовалась большим спросом. Особенно покупали ее французское и прусское правительства для производства пушек. Явный успех бессемеровской стали заставил металлургов всего мира покупать у него лицензии.

Часть доходов Бессемера пошла на строительство парохода “Бессемер”, который должен был курсировать через Ламанш. Его большой роскошный салон первого класса был подвешен, подобно конвертеру, на цапфах. Предполагалось, что он будет всегда сохранять одно и то же положение относительно уровня моря. Борьба с морской болезнью пассажирам должен был помогать свежий воздух, в изобилии подававшийся в салон с помощью прихотливой системы труб, заделанных в пол. Однако на практике оказалось, что даже при весьма спокойном море салон раскачивался совершенно угрожающе. Едва судно вышло в свой первый рейс, как раздались истошные крики пассажиров. Салон “Бессемера” сохранился и до наших дней, но в качестве... оранжереи в каком-то саду неподалеку от Дувра.

В настоящее время сталь, полученная прямым бессемеровским путем, составляет лишь около 10% общего производства стали, но непрерывно развиваются модернизированные и более сложные варианты бессемеровского процесса. В процессе Калдо, например, конвертер продувается не воздухом, а кислородом; добавочное тепло, получающееся при этом, используется как для плавки флюса, изгоняющего из стали серу, так и для переплавки лома. Однако большой износ огнеупоров и стоимость кислорода могут свести на нет преимущества этого процесса.

Мартеновская сталь

Можно сказать, что бессемеровский процесс погубил сам себя. Дело в том, что он сделал сталь обычным и дешевым материалом. Столь же обычным и столь же дешевым стал и стальной лом. Наличие лома оказало важное влияние на всю экономику сталеварения. Это и понятно, ведь в настоящее время около половины выплавляемой стали возвращается на металлургический завод в виде лома. Бессемеровский процесс, однако, в своей традиционной форме в основном перерабатывает в сталь доменный чугун. В нем используются лишь небольшие количества лома для поглощения избытка тепла.

В мартеновском процессе большую часть шихты составляет стальной лом, его преимущества в том, что он дешев и из него уже удалены излишки углерода и других примесей. Кроме того, он содержит полезную в данном случае ржавчину. А бессемеровский конвертер не мог перерабатывать много лома, так как это потребовало бы больше тепла, чем получается при продувке.

В 1856 году братья Фредерик Сименс (1826-1904) и Чарльз Вильям Сименс (1823-1883), подобно Бессемеру наделенные изобретательским талантом и духом предприимчивости, разработали регенеративную печь. В этой печи вход и выход попеременно меняются ролями, они имеют форму извилистого лабиринта и насадки из огнеупорного кирпича. Дым из печи проходит по одной из насадок, отдавая кирпичу значительную часть своего тепла. Благодаря тому что газ подается в печь поочередно то через одну, то через другую насадку, он всегда проходит между нагретыми кирпичами, забирая с собою в печь часть тепла отработанных газов. Обычно эти печи топят газом, и их конструкция позволяет поднять рабочую температуру до того предела, который может выдержать огнеупор. На практике она оказывается несколько выше 1500° С, что достаточно для плавки чистого железа.

Вначале использование печи Сименсов в сталеварении рассматривалось лишь как удобный и экономичный способ плавки тигельной стали. Но позже Сименсы применили регенеративный принцип к традиционному методу пудлингования и получали сталь, расплавляя чугун с железной рудой. В 1864 году Пьер Мартен предложил вводить в состав шихты большое количество лома.

Мартеновская печь загружается примерно равными количествами стального лома и чугуна, некоторым количеством железной руды (например, Fe₂O₃) и флюса (обычно известняка). При нагревании все расплавляется, и железная руда удаляет содержащийся в чугуне углерод. Флюс переводит в шлак не только нежелезные окислы руды, но также и содержащуюся в стали серу. Поэтому добавка марганца может оказаться ненужной. Одним из преимуществ мартеновского способа является возможность точнее следить за составом стали. В настоящее время в мартеновских печах получают около 85% рядовых углеродистых сталей.

Для еще более точного управления составом и чистотой стали применяют электрические печи. В таких печах выплавляется сравнительно небольшое количество очень важных высококачественных сталей.

Глава 10

МАТЕРИАЛЫ БУДУЩЕГО, или КАК ОШИБАТЬСЯ В ДОГАДКАХ

Мы не должны принимать вещи, даже на первый взгляд самые простые, как нечто ниспосланное свыше. Мы должны учиться, понимать природу, и не только для того, чтобы созерцать и терпеть то, чем она дает на нас. Глупость из невинного порока отдельных индивидуумов становится социальным злом.

Джон Бернал
New Scientist. 5.1.1967

Наука о материалах - изучение материала как целого, а не отдельных его физических, химических и технических свойств - довольно молода. Она прочно стала на ноги лишь совсем недавно. Но, несмотря на молодость, новая наука достигла известных успехов, и, я думаю, будет справедливым сказать, что сегодня мы значительно лучше, чем всего лишь несколько лет назад, понимаем механическое поведение твердых тел. Быть может, это произошло потому, что мы располагали уже большим количеством сырых необработанных наблюдений. Немало было накоплено физических и химических знаний и инженерного опыта, правда, в разрозненном виде. Собрать все это воедино, заставить одно объяснить и подтвердить другое - для этого потребовалось не так уж много новых экспериментов и свежих идей, стоило лишь достаточно большому числу людей серьезно заняться проблемой. Как это часто бывает, главная трудность состояла в том, чтобы осознать само существование проблемы.

Естественно, первым делом нужно было понять наблюдаемые явления - почему твердые тела вообще и широко используемые материалы в частности имеют те или иные свойства. Можно сказать, что с этим вопросом сейчас в основном покончено, хотя довольно много белых пятен все еще остается. Проблема, которая теперь возникла перед материаловедами, заключается в том, как использовать эти знания. Возможности здесь не беспредельны. Результаты

предыдущих исследований как раз и убеждают нас в том, что значительная часть наших желаний просто невыполнима. Те же исследования показали, что некоторые пути улучшений были уже не только нащупаны, но и почти исчерпаны чисто эмпирическими методами еще до того, как они раскрылись перед учеными. Некоторые наши познания годны лишь на то, чтобы подсказать инженерам, чего они должны избегать - например, какого рода концентрация напряжений опасна.

Однако пытливые исследователи стремятся найти в материаловедении какие-нибудь радикальные пути - существенно изменить старые или изобрести новые и, быть может, лучшие материалы. Положение дел в сегодняшней науке таково, что сделать выбор среди множества возможных направлений работ очень нелегко. Как мы увидим, такой выбор рано или поздно может вызвать далеко идущие последствия за стенами лаборатории.

Прежде чем начать разговор о новых материалах, мы должны спросить себя: «Что в действительности мы разумеем под словами лучшие материалы? Лучшие - в чем?»

Ответ здесь далеко не очевиден, а сам вопрос вполне может быть центральным в современной науке о материалах. Технические проблемы, о которых мы поведем разговор, сами по себе очень трудны, но вопрос о целенаправленных изменениях материалов нельзя считать чисто техническим. Если мы интересуемся, а я думаю, мы должны интересоваться, возможностями получения новых или изменения старых материалов, мы должны учитывать социальные и экономические аспекты их производства. В конце концов техника призвана всего лишь обслуживать социальные и экономические потребности. О доминирующей роли материалов в обществе говорят названия исторических эпох - «каменный век», «бронзовый век» и т.д.

Чрезвычайно сложные переплетения технического, социального и экономического аспектов еще более затрудняют всю проблему в целом. Правда, предприниматель твердо знает, что ему нужно: ему нужны дешевые материалы. Материаловеды значительную часть усилий вынуждены направлять на то, чтобы снизить стоимость производства материалов. Конечно, есть неоправданно дорогие материалы, их можно и должно делать подешевле. Однако это мое личное мнение, я не думаю, что то же самое справедливо для таких ходовых конструкционных материалов, как, например, сталь. Сталь сейчас очень дешева, и оставшиеся для нее резервы экономии, которые могут быть реализованы в будущем, не оправдывают затрачиваемых сегодня громадных научных усилий, особенно при нынешнем дефиците научно-технических кадров.

Если даже большое снижение стоимости конструкционных материалов было бы технически достижимым в недалеком будущем, то кто бы от этого выиграл? Прежде всего в большинстве изделий стоимость материала составляет малую долю стоимости готового изделия. Поэтому, даже если бы материал стал бесплатным, выигрыш потребителя по сравнению с другими изменениями, которые могли бы вслед за этим последовать, оказался бы невелик.

Далее, сама дешевизна материала в действительности может иметь отрицательное влияние и на проект, и на характеристики готового изделия. Когда материал чересчур дешев, у конструктора нет стимула его экономить, а это может повлечь за собой не только утяжеление конструкций (которые, например, из-за этого будут впустую тратить горючее, повреждать дороги и т.п.), но и снижение профессионального уровня инженеров. Часто причиной плохого, тяжелого, неуклюжего проекта служит стремление снизить стоимость обработки, но, думается, порой это связано еще и с желанием конструктора уберечь себя от лишних размышлений. Экономисты утверждают, что существует оптимальное соотношение между стоимостью земли и труда, которое стимулирует развитие, и мне представляется, что те же соображения применимы к ценам на материалы.

Есть и еще одна важная сторона вопроса о ценах. Стоимость различных процессов обработки, материала часто во много раз выше стоимости исходного материала, но конечно же, стоимость обработки зависит не от цены, а от характеристик материала. Например, дешевле будет купить пластик по 8 шиллингов за килограмм и затем затратить еще 2 шиллинга на формовку его для получения конечного продукта, чем покупать сталь по 1 шиллингу за килограмм и тратить потом 25 шиллингов на штамповку, механическую обработку и доводку изделия. В этом корень коммерческого успеха пластиков, которые всегда были относительно дорогим исходным материалом.

Новые материалы должны обеспечить экономию именно на процессах обработки, производства и доводки готовых изделий.

С внедрением пластмасс наметилась четкая тенденция к уменьшению сложности и стоимости изготовления изделия. Большинство легко формуемых пластмасс довольно непрочны и нежестки, но принципы их обработки, очевидно, могут быть распространены на более прочные и жесткие вещества. Многие дешевые процессы формовки в настоящее время требуют значительных затрат на станки и штампы, но опять-таки я не уверен, что такое положение дел сохранится навсегда.

Можно дать лишь некоторые очень общие наброски того большого влияния, которое могут оказать принципиальные изменения материалов на общественную жизнь. Следствия здесь столь сложны, что были бы слишком опасными попытки выступить в роли пророка, предсказывающего в деталях возможный ход событий. Но я убежден, что мы должны быть достаточно мудры, чтобы не отвергать с легкостью возможность новой технической революции.

Моя работа отчасти связана с тем, чтобы выяснить, чего же на самом деле хотят (или думают, что хотят) люди от новых материалов. Меня угнетают здесь уж очень малые запросы в отношении долговечности материалов. Считается, что, если машины будут служить бесконечно долго, это может привести к технической и экономической застойности. Но я не думаю, что, если так называемая потребительская долговечность изделий будет продолжена, все будут роптать (исключая коммерсантов). В конце концов 20%-ное увеличение срока службы изделия более или менее эквивалентно 20%-ному повышению производительности.

Не сомневаюсь, сколько приложений имеют материалы, столько существует и определений “лучшего” материала. В то же время, если спросить нескольких конструкторов одного и того же изделия, какое именно качество используемого материала не позволяет им проектировать и делать лучшие изделия, ответы будут самыми разными, часто противоречивыми. Один и тот же конструктор через неделю может дать уже совсем другой ответ. Видимо, эти диалоги не поднимаются до уровня сократовых.

Все это на первый взгляд кажется удивительным, но, я думаю, найдет объяснение примерно в следующем. Вопреки обычным представлениям материал выбирается для изделия, а скорее наоборот - изделие проектируется в расчете на материал. Следовательно, любое существенное изменение материала может повлечь полное переосмысление изделия. В этом и кроется возможное объяснение того, в чем заключаются трудности конструктора, полагающегося только на интуицию. Основываясь на собственном опыте проектирования, я думаю, что обычно приходится выбирать какой-то удобный материал, а затем конструировать изделие с учетом его качеств и возможностей, которые он предоставляет. Свойства материала в значительной степени видятся как нечто неделимо связанное, и мысли об изменении отдельных этих свойств даже не возникает.

Так или иначе, но конструктор почти не направляет материаловед в его работе. Больше того, даже подсказки конструктора материаловед обычно игнорирует. Я думаю, что причина здесь в том, что инженеру трудно оценить, сколь сложна разработка совершенно нового материала. Ведь она требует по крайней мере пятилетнего труда и стоит больших средств. К тому времени, как материаловед что-то сделает, вполне возможно, что инженер уже многое передумает. Следовательно, обычно материаловед должен подходить к разработке нового материала, полагаясь лишь на собственные познания и опыт.

Однако картина в целом не так уж беспросветна. Прежде всего область применения новых материалов ограничена их высокой первоначальной ценой и высокой стоимостью исследований. Позволить себе роскошь использовать такие материалы обычно могут лишь те, кто делает изделия для военных целей и авиации*.

* Фирма, в которой я одно время служил, разработала уплотнение для водяного насоса автомобиля, которое гарантировало пробег 160 000 км. Цена его была лишь несколько выше обычной, но ни одна из автомобильных фирм этим не заинтересовалась.

Стоимость разработки экзотических материалов может быть очень высокой, но порой такие материалы могут сберечь не только большие средства, но и жизни. И потом- вспомним историю. Сталь была получена как дорогой материал для мечей; алюминий пошел в ход для кавалерийских касок, когда килограмм его стоил 150 фунтов стерлингов; полиэтилен был разработан как дорогой материал для использования в локаторах.

Потенциальное воздействие новых, необычных для сегодняшнего времени материалов иллюстрируется некоторыми цифрами, приведенными ниже (табл. 1). Эти цифры показывают изменение веса самолета и полезной нагрузки с внедрением новых материалов, появление которых можно предвидеть. Они относятся к дозвуковым самолетам трансатлантических линий. Следовательно, полезная нагрузка самолета может увеличиться втрое, равно как втрое может, вероятно, уменьшиться и цена билета.

Таблица 1. Доля в общем весе самолета, %

	Горючее	Двигатели	Планер	Полезная нагрузка
“Боинг-707”	47	9	33	11
Проектируемый самолет	40	4	23	33

Ясно, что подобное приложение новых материалов стоит внимания, поэтому оно является сегодня целью многих материаловедческих исследований. Каким же путем можно достичь нужных результатов? Какого сорта материалы необходимы?

Практически мы не в силах сколько-нибудь заметно повлиять на свойства природной древесины. Но, может быть, мы способны изменить свойства металла, например алюминия, или заменить его другим металлом, получше? На первый взгляд кажется, что стоит лишь увеличить прочность нашего металла - и все проблемы решены: ведь в конце концов

самолеты проектируются так, чтобы запасы прочности были бы по возможности меньше, лишь бы обеспечить надежность. Следовательно, если бы материалы были прочнее, части самолета можно было бы делать более тонкими, а потому и более легкими. До известной степени это верно, но только до известной степени.

Следует помнить, что, хотя мы и можем значительно изменять прочность и вязкость твердых тел, их жесткость не поддается нашему контролю. Модуль Юнга зависит исключительно от химической природы твердого тела, и как с данным веществом ни возись, модуль упругости его не изменить. Если нам нужен другой модуль, мы должны взять другое вещество. Следовательно, если мы увеличиваем прочность какого-либо тела, например металла, то делаем это путем увеличения предельной упругой деформации. Поэтому, чтобы использовать более высокую прочность, мы должны работать при больших деформациях. Это означает, что перемещения в конструкции возрастут, и, если мы резко повысим напряжения с целью экономии веса, мы получим намного большие перемещения. Последствия такого рода усовершенствований видны на рис. 5; ясно, что такие формы крыла недопустимы.

Многие элементы конструкции самолета находятся в состоянии сжатия. Более того, сжатые элементы обычно имеют вид стержней и пластинок, тонких в сравнении с их длиной. А как уже говорилось в [главе 1](#), элементы такого рода теряют несущую способность не потому, что они разлетаются на куски, а вследствие упругого выпучивания, связанного не с недостатком прочности, а с пониженной жесткостью. Это явление называется эйлеровой потерей устойчивости.

Кроме того, некоторые элементы самолетной конструкции выходят из строя не под нагрузкой, постоянно действующей в одном направлении, а вследствие так называемого флаттера. Это означает, что в определенных условиях обшивка ведет себя в потоке воздуха подобно полощущемуся на ветру флагу. Борьба с флаттером следует путем увеличения жесткости, а не прочности.

Получается так, что, когда мы начинаем увеличивать прочность материала, то есть вытаскивать нос, хвост оказывается увязшим - слишком мал модуль Юнга. Следовательно, увеличить модуль упругости столь же важно, как и увеличить прочность.

Далее, когда мы имеем дело с конструкциями минимального веса - например, с самолетом, - нас интересуют не столько абсолютные свойства материалов, сколько их удельные свойства; мы должны знать, сколько прочности и жесткости приходится на единицу веса. Удельные величины получаются делением абсолютных величин на удельный вес или плотность материала. С этой точки зрения полезно взглянуть на модули Юнга обычных технических материалов, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Материал	Удельный вес g, г/см ³	E, кг/см ² Ч 10 ⁻⁴	E/g условные единицы
Молибден	10,5	3,0	2,9
Железо	7,8	2,1	2,83
Титан	4,5	1,2	2,7
Алюминий	2,7	0,75	2,8
Кварц и обычное стекло	2,5	0,70	2,8
Магний	1,7	0,45	2,7
Древесина (ель, параллельно волокну)	0,5	0,135	2,7

Из таблицы видно, что удельный модуль упругости E/g всех этих материалов практически одинаков. Вероятно, в этом нет какого-либо глубокого философского смысла, совпадение здесь - дело случая. Но так или иначе, а сам по себе факт совпадения удельных модулей ставит инженеров и материаловедов в весьма затруднительное положение. Ведь как бы мы ни старались улучшить прочность принятых материалов, мы оказываемся привязанными к одному и тому же удельному модулю. Это означает, что, если мы хотим достичь поставленных целей, мы должны отказаться от всех ходовых материалов, в обращении с которыми накоплен большой опыт.

Что же остается делать? Что это за вещества, которые имеют более высокие модули? Оказывается, таких веществ не так уж много, но все же они есть. Лучшие из них приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вещество	Удельный вес g, г/см ³	E, кг/см ² Ч 10 ⁻⁴	E/g усл. единицы	Темп. плавл., °C
Нитрид алюминия	3,3	3,5	10,6	2450

Оксид алюминия	4,0	3,9	9,8	2020
Бор	2,3	4,2	18,0	2300
Оксид бериллия	3,0	3,5	11,6	2530
Бериллий	1,8	3,1	17,2	1350
Углерод, усы	2,3	7,7	33,5	3500
Оксид магния	3,6	2,9	8,0	2800
Кремний	2,4	1,6	6,7	1400
Карбид кремния	3,2	5,6	17,5	2600
Нитрид кремния	3,2	3,9	12,2	1900
Нитрид титана.	5,4	3,5	6,5	2950

Эта таблица в некотором смысле обнадеживает; она показывает, что есть в природе твердые тела, у которых удельный модуль Юнга больше, чем у традиционных технических материалов, грубо говоря, в десять раз. По-видимому, эти материалы открывают захватывающие перспективы. В то же время их список обескураживает. Все эти материалы в нормальных условиях весьма непрочно и хрупки, получать их можно обычно только при очень высоких температурах, некоторые из них токсичны.

Единственным металлом в этом списке является бериллий. Тот самый бериллий, который в опасной степени токсичен. Предположим на время, что нам удастся побороть его токсичность, но сможем ли мы сделать бериллий прочным и вязким? По-видимому, в некоторых случаях бериллий может быть довольно прочным, предел прочности его может достигать 80-160 кГ/мм². Но сделать его достаточно вязким очень и очень трудно. Причина этого главным образом в том, что при нормальных температурах дислокации в кристалле бериллия подвижны только в четырех плоскостях, в то же время, как мы видели в [главе 8](#), кристалл должен иметь пять плоскостей скольжения, чтобы сопротивляться трещинам, бегущим в любой его плоскости. Несмотря на упорные попытки ученых заставить бериллий вести себя, как подобает “настоящему” металлу, заметных достижений в этой области нет. По-видимому, препятствия на этом пути связаны с особенностями кристаллической структуры этого металла. Остается подойти к проблеме по-иному. Может быть, можно уменьшить хрупкость бериллия, добавив в него немного волокон, как в случае льда и древесной пульпы ([глава 8](#)). Если такой эксперимент оказался бы успешным, можно было бы, я думаю, придумать какую-нибудь защиту от токсической опасности. Но тогда выплыло бы очередное препятствие: бериллий дорог, и с этим, кажется, ничего не поделаешь (отчасти из-за предосторожностей, необходимых при работе с ним). Остается только уповать на то, что последующий ход событий что-то из сказанного опровергнет.

Если нам не удастся приручить бериллий, что бы мы могли предпринять еще? Ясно, что можно бы взяться за один из керамических материалов, приведенных в табл. 3. Из всех них только в окиси магния дислокации подвижны при комнатной температуре. И действительно, в лабораторных опытах можно получить очень правдоподобную имитацию пластичного поведения на достаточно чистых кристаллах окиси магния. На практике, однако, эта пластичность не заслуживает доверия: такие кристаллы рассыпаются под ударными нагрузками. Причина все та же - недостаточное число плоскостей скольжения.

Дж. Форти удалось придать пластичность куску хлористого натрия (поваренная соль). Для этого он добавил в поваренную соль золото (процесс диффузии шел в тщательно контролируемых условиях), атомы золота расположились на решающих позициях в кристалле и обеспечили движение дислокаций в нужных направлениях. Не исключено, что идея Форти поможет превратить окись магния в полезный материал.

Что бы мы ни предпринимали для управления подвижностью дислокаций в тех кристаллах, где они при нормальных условиях не очень подвижны, всегда остается общая трудность - вопрос чистоты кристалла. Обычно такие кристаллы должны быть очень тщательно очищены от примесей, чтобы обеспечить движение дислокаций. Если какие-либо примеси и допустимы, то их содержание должно быть строго ограничено. Вполне возможно, что такая чистота не только дорого обойдется в процессе производства, но и во время службы материала ее будет очень трудно поддерживать. Многие кристаллы впитывают в себя чужеродные атомы (особенно атомы газов) намного охотнее, чем принято думать. Этот процесс может понемногу идти уже при комнатной температуре, но он особенно ускоряется с нагревом материала. Поскольку многие ответственные детали эксплуатируются при повышенных температурах, есть опасность охрупчивания материала в работе. Достаточно совсем небольшого количества включений, чтобы задержать дислокации, которые и без того двигаются не так-то легко.

Лично я не считаю, что попытки заставить экзотические материалы вести себя подобно металлам очень уж многообещающи.

Допустим, все это верно. Что же нам тогда делать? По-моему, чтобы ответить на этот вопрос, надо забыть нашу приверженность (даже больше, чем приверженность) к металлам и обратиться к материалам вроде древесины или армированных пластиков. В этом случае придется оставить попытки повысить пластичность за счет увеличения подвижности дислокаций и обратиться к волокнистым материалам, в которых внутренние поверхности могут тормозить развитие трещин. Конечно, если мы решим связать волокна между собой с помощью пластичного металла, то получим какой-то выигрыш и от его пластичности, но опыт показывает, что этот вклад может быть и незначительным.

Какие вещества следует нам выбирать для волокон? С точки зрения дислокационной подвижности мы должны требовать всего или ничего. Если дислокации по-настоящему подвижны, мы можем получить обычный пластичный материал, и нам нет смысла связываться с волокнами. Но если уж мы принялись за волокна, то нам нужно исключить какое бы то ни было движение дислокаций. Пользы от такого движения не будет никакой, а вреда может быть много - оно разупрочнит волокна. Поэтому бериллий и окись магния здесь не подойдут.

Большинство остальных веществ, приведенных в табл. 3 имеют направленные ковалентные связи, при нормальных температурах дислокации в них остаются неподвижными. Как раз это-то нам и нужно. Но почти во всех других отношениях эти вещества представляют собой, мягко выражаясь, крепкий орешек для материаловедов. Их получение связано, вообще говоря, со значительными трудностями и возможно лишь при высоких температурах. Даже если они сами по себе и нетоксичны, то содержат одну, две или более добавок, которые могут сделать их токсичными. Наконец, некоторые из соединений, которые необходимы при получении этих веществ, почти наверняка будут разрушать стенки технологических аппаратов.

В главе 3 подчеркивалось, что задача теории прочности не столько в том, чтобы объяснить, почему материалы прочны, сколько в выяснении причин их разрушения. Все тела прочны "от природы", если они не ослаблены дефектами; но дело в том, что дефекты почти всегда присущи твердым телам. Напомним, что в случае хрупких тел, в которых дислокации неподвижны, ослабляющими дефектами являются небольшие геометрические искажения, на которых возникает концентрация напряжений. В тех случаях, когда внутри кристалла все обстоит более или менее благополучно, опасность могут представлять поверхностные дефекты. Большинство ковалентных керамических материалов, приведенных в табл. 3, существует в виде порошка или неправильной формы кусков. Дело теперь за тем, чтобы получить эти вещества в форме нитей, однородных внутри и гладких снаружи.

Как раз над этим и работают последнее время многие лаборатории в разных странах, теперь мы знаем довольно много путей, которые ведут к получению прочных жестких волокон, но ни один из них не легок и не очень дешев. Достаточно упомянуть, что для получения таких волокон требуется температура в пределах от 1400 до 3500° С. Сейчас волокна обычно обрабатываются при высокой температуре в течение часов и даже дней. Сделать печь, которая работала бы при этих температурах в коррозионных условиях и позволяла бы поддерживать приемлемую химическую чистоту в реакционной камере,- очень серьезная техническая задача.

Такие "сверхволокна" обычно делятся на два больших класса - непрерывные волокна и усы. Непрерывные волокна имеют, конечно, большую длину; часто их можно наматывать на бобину, как нейлон или стекловолокно. Они могут иметь любую толщину, но чаще всего она лежит в пределах от 5 до 100 мкм. Обращаться с ними можно, как со стекловолокном, но более толстые волокна жестче на изгиб, и работать с ними, понятно, труднее. Толщина усов обычно 1 мкм, а длина порядка миллиметра, хотя некоторые усы вырастают длиной до нескольких сантиметров.

Модули упругости большинства этих волокон лежат где-то в области между $3,5 \cdot 10^4$ и $7,0 \cdot 10^4$ кг/мм², а поскольку их плотность колеблется примерно от 2 до 4, то удельные модули вполне оправдывают ожидания в десять раз превышая соответствующие константы обычных технических материалов. Прочность всех непрерывных волокон довольно высока, но в настоящее время ее нельзя назвать исключительно высокой. Обычно она лежит между 175 и 350 кг/мм² - эти величины близки к прочности обычных стекловолокон и отражают чрезвычайные трудности изготовления длинных волокон, свободных от микродефектов. Усы часто намного прочнее, их средняя прочность может достигать 700-1000 кг/мм², то есть они могут быть раза в три прочнее большинства непрерывных волокон.

Сравнивать преимущества и недостатки обоих типов волокон довольно трудно. К тому же эти сравнения могут быстро устареть. В некоторых случаях требуется очень тщательно уложить армирующие волокна в одном направлении, иногда этого добиваются путем намотки непрерывных волокон и пропитки их связующей смолой, то есть делают своего рода кокон. Часто так делают сосуды давления и трубы. Это, казалось бы, преимущество непрерывных волокон, но вот недавно был разработан способ, по которому короткие волокна (например, усы) сортируются, разбраковываются, а затем во влажном состоянии перерабатываются в непрерывную пряжу, вроде хлопчатобумажной, с которой потом можно обращаться так же, как с непрерывными волокнами. В ряде случаев из усов получают суспензию в какой-нибудь жидкости, которую можно легко формовать, как бумажную массу.

Выбор волокон зависит в некоторой степени от типа матрицы, которую решено использовать. Пластики и смолы имеют малый удельный вес и с ними легко работать, их нетрудно формовать, они вообще обладают многими преимуществами. С другой стороны, их прочность и модуль упругости малы, поэтому они не очень хорошо передают нагрузку от одного волокна к другому, то есть их нельзя пожалуй, считать хорошими связующими материалами. По этой причине в тех случаях, когда в качестве матрицы используется смола, применяются длинные непрерывные волокна. Смола позволяет очень эффективно использовать свойства непрерывных волокон и не годится в качестве матрицы для коротких волокон - например, усов.

Металлические матрицы заведомо лучше смол ведут себя, начиная примерно со 150° С. Они и нагрузку от волокна к волокну передают лучше смолы и потому более подходящи для связывания усов: позволяют лучше использовать прочность и жесткость усов. Однако армировать металлическую матрицу труднее, поскольку температура и давление формования здесь высоки. Сегодня можно предположить, что в будущем волокнистые материалы на основе смол найдут

свое место в крупных элементах конструкций, работающих при низких температурах, а металлы, армированные усами, которые могут обладать более высокой прочностью и жаростойкостью, но которым труднее придавать нужную форму, будут, по-видимому, использоваться в более мелких деталях. Впрочем, это такая область, в которой события развиваются довольно бурно и предугадать что-нибудь очень трудно.

Какие же “сверхволокна” в настоящее время известны и как они делаются? Сейчас разрабатываются непрерывные волокна бора, карбида кремния и углерода. Усы же время от времени выращивают из самых разных веществ, не всегда практически годных. Наибольшие усилия затрачены на усы карбида кремния, нитрида кремния и окиси алюминия (сапфира). Информации о процессах получения волокон почти нет.

Непрерывные волокна.

Бор. Бор осаждается на тонкую нагретую нить - подложку, которая непрерывно протягивается через реакционную камеру. Камера содержит одно из газообразных соединений бора, например трихлорид бора BCl_3 или гидрид бора B_2H_2 , которое, коснувшись горячей нити, разлагается с образованием чистого бора.

Карбид кремния. В общих чертах процесс получения волокна карбида кремния подобен процессу получения волокна бора. В этом случае, конечно, используются подходящие газообразные соединения, содержащие кремний и углерод.

Углерод. Это очень интересное волокно. Оно получается из непрерывного органического волокна - вискозы или синтетического полимера по технологии, аналогичной получению угольных нитей для ламп накаливания. Если правильно поставить процесс, углерод рекристаллизуется в непрерывное графитовое волокно.

Усы.

Известен целый ряд процессов получения усов. Механизмы протекания этих процессов весьма сложны. Обычно лучшие усы получают из газовой фазы, то есть химическая реакция в высокотемпературной печи идет между газообразными реагентами. Если азот или кислород нетрудно подать в зону реакции в виде газов, то такие элементы, как кремний, углерод, алюминий и т.д., сами по себе не транспортируются. Поэтому приходится прибегать к так называемым транспортным веществам. Ими могут служить такие соединения, как SiO_2 , $SiCl_4$, CH_4 , Al_2O_3 и т.д. Обычно стремятся получить весомые количества бездефектных прочных усов возможно более быстрым и дешевым путем. К сожалению, когда реакция ускоряется, качество получаемых усов, как правило, страдает, что сильно усложняет всю проблему. Чрезвычайно сложные реакции, которые могут протекать при выращивании усов, приходится анализировать с помощью вычислительных машин. К настоящему времени количество усов высокого качества измеряется килограммами, цена их довольно высока, поэтому ведутся усиленные работы как над увеличением выхода усов, так и над уменьшением их стоимости.

Вполне возможно, что некоторые из этих работ окажутся успешными, и в скором времени количество получаемых усов будет измеряться тоннами. Их стоимость вначале будет довольно высокой, но если хоть как-то можно полагаться на исторические параллели, то цена придет к вполне удобоваримым величинам в течение примерно десятка лет. Сомнительно, конечно, чтобы она когда-нибудь стала сравнимой с ценой обычной стали и технической древесины.

Во всяком случае, сейчас мы имеем достаточное количество таких волокон для проведения поисковых работ в стенах лабораторий. Работы эти не столь просты, как может показаться. Даже располагая самыми прочными и жесткими усами, вы можете испортить ими идеальную матрицу. Изготовление армированных материалов требует большой сноровки. Теория упрочнения волокнами основывается на довольно громоздком математическом аппарате, она не дает скучать ЭВМ и заполняет специальные периодические издания. Но, даже если она и понята, до создания надежных процессов получения подобных материалов еще далеко.

Впрочем, сейчас уже многие трудности преодолены, и в ряде лабораторий регулярно делают небольшие партии армированных волоконными материалами, свойства которых оказываются довольно близкими к теоретически предсказанным. Приводить здесь конкретные величины, пожалуй, бесполезно, поскольку каждый материал нужно характеризовать целым набором свойств. Но я не побоюсь утверждать, что некоторые из новых материалов вдвое лучше тех, что были известны до сих пор. Впервые в истории человек стал управлять своими конструкционными материалами, целеустремленно и рационально создавать материалы, удовлетворяющие определенным нуждам.

Прежде всего такие материалы будут использованы в тех областях, где к конструкциям предъявляются повышенные требования. Быть может, они вызовут необыкновенные преобразования в авиации, позволив резко снизить стоимость воздушных перевозок. На это можно возразить, что подобные рассуждения напоминают попытку перелить старое вино в новые бутылки. Возможно, так оно и есть, только всегда ли это плохо? Впрочем, не следует исключать того, что с появлением новых материалов появятся принципиально новые устройства. Такую перспективу не следует исключать, но предсказать здесь что-нибудь определенное невозможно. Приведем небольшой пример, который касается большинства из нас. Зубные пломбы беспокоят многих. Керамика (фосфатный цемент), которую используют зубные врачи, всегда была слишком хрупкой; металлы (например, золото) обычно слишком мягки. Сейчас изучаются возможности армирования золота усами. Такой материал будет сочетать высокую прочность и твердость с вязкостью, что очень важно для пломб. В этом случае относительно высокая стоимость золота и усов серьезного значения не имеет.

Массовое применение новых материалов, несомненно, зависит от снижения стоимости производства волокон до действительно приемлемого уровня. Трудно сказать, сколько еще ждать, но уже сейчас возможен интересный компромисс - использование асбестов. Асбест, можно сказать, представляет собой природные усы, которые донимаются в карьерах; он довольно дешев. Механические свойства волокон асбеста уступают лучшим усам, но они значительно превосходят и металлы, и стекловолокно, особенно если принять во внимание их вес. В прошлом асбест часто использовался для армирования пластиков, но эта идея была дискредитирована безобразной технологией. Сейчас есть возможность применить для асбестовых волокон методы, созданные для переработки усов. Это позволит резко улучшить свойства таких армированных материалов. Композиционные материалы типа смола - асбест должны найти широкое применение.

Армированные материалы довольно хороши в промышленных условиях, здесь они могут играть важную роль, хотя производство их довольно трудоемко. Мне кажется, мы очень нуждаемся, кроме того, в улучшенных материалах для самого широкого потребителя, материалах, которые не требуют сложного оборудования для обработки. Ясно, что образцом при создании таких материалов должна быть древесина. Механические свойства дерева превосходны, хотя никто не возражал бы, если бы они были еще лучше. Недостатки древесины определяются ее биологическим происхождением. Она усыхает, разбухает, гниет, нуждается в окраске, требует ухода. Эффективность древесины в легких конструкциях, простота ее обработки (а именно в этом каждый из нас и заинтересован в первую очередь) определяются малой плотностью этого материала.

На нынешнем уровне знаний можно было бы взять армированный, но практически инертный материал и заполнить его порами нужных размеров и формы, чтобы получить вещество с удельным весом примерно 0,5, которое можно легко резать и обрабатывать. Если в качестве связующего использовать один из термопластов, то такой материал можно было бы не только пилить, строгать, сверлить, но также гнуть и формовать при подходящей температуре. Такой материал потребовал бы тонких научных разработок, но, будучи дешевым, он имел бы и очень много достоинств. И они определялись бы не только удобствами для любителей и кустарей, такой материал был бы незаменим для экспериментальных разработок. Именно скорость разработки, от опытных образцов до серийного производства, была самым сильным аргументом в пользу деревянных самолетов во время войны. Неизбежные задержки в разработках, более чем что-либо другое, становятся пороком и причиной срывов при реализации сложных технических проектов.

Есть еще один подход к решению проблемы новых материалов, о котором мы еще не говорили. По-видимому, ему уделяется больше внимания в Японии. Мы уже подчеркивали, что польза древесины и целлюлозы вообще определяется ее низкой плотностью в сочетании с отличным модулем Юнга. Удельный модуль древесины вдоль волокна практически тот же, что и у технических металлов.

Целлюлозная молекула, как мы видели в [главе 5](#), состоит из сахарных колец, то есть из сложных цепей, построенных в значительной степени из атомов углерода. Поэтому можно ожидать, что связь между углеродными атомами жесткая: это ведь та же связь, что и в алмазе.

Большинство синтетических полимеров также построено из цепей атомов углерода. Полиэтилен, например, состоит просто из $(\text{CH}_2)_n$. Другие синтетические полимеры химически несколько сложнее, но их упругие свойства не очень отличаются от полиэтилена. Далее, модуль упругости алмаза изменяется примерно от $8 \cdot 10^4$ до $12 \cdot 10^4$ кГ/мм² в зависимости от того направления, в котором он измеряется. Алмаз имеет плотность около 3,5, то есть атомы углерода упакованы в нем более плотно, чем в полиэтилене, имеющем плотность около 0,92. Если мы введем все необходимые поправки, то найдем, что модуль полиэтилена в направлении цепочек должен быть примерно $2,5 \cdot 10^4$ кГ/мм². Другие полимеры должны иметь жесткость того же порядка.

Однако экспериментально определенный модуль упругости полиэтилена равен приблизительно 200 кГ/мм², то есть примерно в сто раз меньше теоретического. Почти такое же положение с другими синтетическими полимерами. Удивительно, что авторы учебников (описывающие химическое строение полимерных цепочек в умильных подробностях) не только не объясняют такого расхождения, но даже не замечают его.

Здесь напрашивается объяснение, ставшее возможным после работ Франка и Келлера (Бристольский университет). Уже давно известно, что молекулы-цепочки большинства природных и искусственных полимеров в некоторой степени кристалличны, наподобие натуральной целлюлозы ([глава 5](#)). Однако работы Франка и Келлера показали, что природа кристаллов в природном и синтетическом полимере различна. В целлюлозе как сами молекулы, так и продольные оси кристаллов лежат вдоль волокна, и поэтому на практике реализуется большая доля теоретического модуля. В материалах же типа полиэтилена Келлер обнаружил, что цепочки $(\text{CH}_2)_n$ уложены совсем иначе. Если взглянуть на эту структуру глазами инженера, сразу станет ясным, что лишь очень малая доля жесткости углеродной цепочки реализуется в макроскопическом модуле пластика: здесь работают фактически не первичные ковалентные связи, а лишь вторичные силы Ван-дер-Ваальса, которые действуют между складками цепочки.

Замеренные в опыте величины модуля упругости очень хорошо согласуются с известной жесткостью вандерваальсовых связей и с жесткостью молекулярных кристаллов типа фталоцианина ([глава 1](#)).

Оказывается, что углеродные цепочки, характерные для синтетических полимеров (таких, как полиэтилен), очень гибкие, и с термодинамической точки зрения существует весьма сильная тенденция к складыванию их регулярным способом во время кристаллизации. Цепи природных полимеров (например, полисахариды и, в частности, сахар) так не складываются, и потому они намного жестче. Именно этому в значительной мере обязана нестареющая популярность целлюлозы в качестве строительного материала, и, между прочим, это же дает основания журналам мод писать о “хрустящем” хлопке.

Предотвратить складывание синтетических углеродных цепочек на редкость трудно, но как раз совсем недавно коллеги автора получили кристаллы полиэтилена в условиях, когда складывание сводится к минимуму. Модуль упругости этих кристаллов превышал 3500 кГ/мм^2 . Ему все еще очень далеко до теоретической величины, но это все-таки примерно в 15 раз выше, чем все достигнутое на полиэтилене прежде.

Как будет это направление развиваться и будет ли оно развиваться вообще - трудно сказать. Ясно лишь, что полиэтилен с цепочками, вытянутыми при кристаллизации в одном направлении, будет совершенно иным материалом по сравнению с тем полиэтиленом, который мы хорошо знаем. Вероятно, существует также принципиальная возможность делать неармированные пластики с модулем Юнга стали и одной восьмой ее плотности. Можно предположить также, что прочность и вязкость такого материала также будут высоки.

Чего можно ожидать от материалов будущего?

Невозможно пророчествовать подробно о том, как будут выглядеть новые материалы. Но мы можем оговорить вполне определенные верхние пределы механических свойств пассивных конструкционных материалов (глава 1). Ясно, что ключевое свойство есть модуль Юнга, поскольку он определяет не только жесткость, но и, в конечном счете, прочность. Наибольшей жесткостью обладает углеродная связь, причем она максимальна как в абсолютном, так и в удельном выражении (относительно плотности). Правда, некоторые ковалентные связи по жесткости мало отличаются от углеродных связей в алмазе. Но в общем-то максимум E должен быть около 12410^4 кГ/мм^2 , а максимальная величина удельного модуля Юнга - на порядок выше, чем для стали.

Следовательно, возможности улучшения удельных свойств больше, чем абсолютных. Но, вероятно, к этому и следует стремиться.

Можно было бы, наверное, как-то приблизиться к теоретической прочности, то есть примерно к $E/10$ если бы такая цель имела реальный смысл. Но все дело в том что если бы эта громадная прочность и была получена в большинстве случаев соответствующая ей упругая деформация, которая достигала бы 10%, оказалась бы недопустимой. Более того, такой материал неизбежно был бы хрупким, даже, пожалуй, слишком хрупким.

Более приемлемой следует считать деформацию около 1-2% (такой материал имел бы некоторый запас для торможения трещин - см. главу 4). Это дало бы удельную прочность, на один-два порядка превосходящую удельную прочность стали. Таким образом, мы вправе ожидать максимальную величину удельной жесткости порядка 12-14 жесткостей древесины, стали и других металлов, а для удельной прочности ориентироваться в пределе на 10-100 удельных прочностей стали.

Вероятно, как-то приблизиться к этим свойствам вначале можно будет с помощью материала, армированного параллельными волокнами. Если же прочность и жесткость нужны более чем в одном направлении, тогда придется распределить волокна по разным направлениям и удовлетвориться более низкими свойствами. Но рано или поздно, я думаю, мы получим изотропные материалы, свойства которых во всех трех направлениях будут одинаково хороши.

Это, кажется, и будет пределом, которого мы сможем добиться с пассивными материалами. Продвижение по этому пути - вот занятие, которое занимает в наши дни целую армию материаловедов. Но картина изменится, если мы займемся активными материалами (то есть такими, которые каким-то образом подпитываются энергией) Несколько лет назад к этой идее независимо пришли профессор Бернал и я. В самом деле, снабжая материал энергией, можно придать ему бесконечную эффективную жесткость (как это бывает у животных). А сделать это можно, по-видимому, с помощью пьезоэлектричества.

Важным следствием реализации этой идеи было бы столько повышение прочности, сколько использование бесконечной жесткости. Можно было бы делать очень конструкции, работающие на сжатие, телеграфные столбы могли бы быть тонкими, как проволока; крылья самолетов стали бы тоже очень тонкими, почти любая техническая операция выполнялась бы легче и дешевле. Насколько мне известно, в этом направлении никто сейчас не работает. Но если бы даже и начались такие исследования, потребовалось бы весьма много времени, прежде чем удалось получить что-нибудь реальное; но этот путь отвергать, по-видимому, не следует.

Другая очень привлекательная идея связана с самоподстраивающимися конструкциями. По сути своей она также биологическая. Основной принцип здесь заключается в том, что конструкция сама утолщается в местах большего напряжения, и опять-таки сама уменьшается в слабо нагруженных частях. Почти все небиологические конструкции спроектированы неоптимальным способом, они неэффективны и топорны. Можно было бы начать с того, что

попробовать оптимизировать какую-нибудь грубо спроектированную оболочку или раму, нагружая ее, например, в гальванической ванне. Но, как и предыдущая идея, сегодня это всего лишь мечта. Я хотел лишь сказать, как велики потенциальные возможности сокращения времени проектирования и изготовления.

Ближайшее будущее

В 80-х годах прошлого века идея использования электричества в широких масштабах висела еще в воздухе и привлекала внимание лишь ученых и некоторого числа предпринимателей; история биржи оживляется серией паник газовых компаний, которые возникали после каждого объявления о новом усовершенствовании динамомшины или электрической лампочки. Но оказалось, что акции газовых компаний оставались в безопасности в течение жизни почти целого поколения: трудности разработки и внедрения совершенно новой области техники были очень велики, несмотря на то что научные принципы были уже довольно хорошо поняты, да и экспериментальная проверка проходила довольно удачно. Конечно, маловероятно, что разработка и восприятие новых необычных материалов будет идти столь же медленно, как и внедрение электротехники, но все-таки, видимо, это будет тянуться долго, и на пути встретятся как взлеты, так и падения. Несомненно, что ставить вопрос о радикальной замене традиционных материалов (сталь, древесина) еще очень и очень рано.

Однако мне кажется, что новые армированные материалы, о которых мы говорили в этой главе, доведены уже до такого уровня, когда их технические достоинства оправдывают попытки использования этих материалов на практике. Такие попытки предпринимаются, и вполне возможно, что в специальных конструкциях (компрессорные лопатки газовых турбин и другие авиационные детали) современные армированные материалы будут работать уже ко времени выхода этой книги *. Сегодня эти материалы дороги, на них к тому же скептически смотрят инженеры-практики. Однако, если они выдержат испытания и покажут свои преимущества на практике, на их стороне будет то, в чем они нуждаются, - интерес и одобрение конструкторов. После этого пойдет постепенный процесс удешевления, расширится область применения, хотя они будут оставаться достаточно специальными в течение длительного времени.

* Сейчас, в 1971 году, самолеты с такими деталями уже летают. - *Прим, перев.*

Широкое применение дает реальные выгоды, но, вероятно, главным результатом будет переворот в области инженерного мышления. Идея о материале, который с самого начала разрабатывается с определенным назначением и строится, исходя из первых принципов, а не путем модификаций традиционных веществ, - эта идея нова и всеобщего признания еще не заслужила. Но стоит ей добиться всеобщего признания, и трудно сказать, что за этим последует. Ведь вплоть до настоящего времени технические идеи основывались (сознательно или подсознательно) на характеристиках и недостатках небольшого списка веществ; но стоит воображению инженеров проститься с мыслью о том, что все эти ограничения обязательны, а взамен этого понять, сколь созидающим может быть союз конструктора и материаловеда, - границы техники необычайно раздвинутся.

Необходимые исследования и опытные разработки могут стоить очень дорого, но это по силам бюджету развитого государства. Ведь некоторые другие области техники сейчас обходятся гораздо дороже. Если эти расходы приведут к созданию новой отрасли техники, в которой мы так нуждаемся, - игра стоит свеч.

Ю.Н. Работнов. Предисловие

Введение. Новая наука о прочных материалах, или как задавать трудные вопросы

Часть I. Упругость и теория прочности

Часть II. Неметаллы Часть III. Металлы

Глава 8. Пластичность металлов, или интимная жизнь дислокаций.

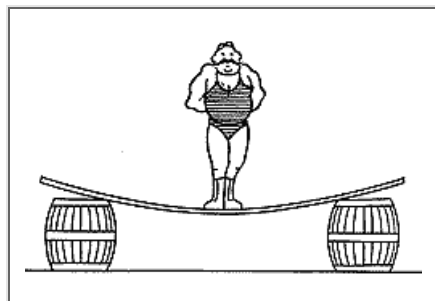
Глава 9. Железо и сталь, или Гефест среди чертовых мельниц

Глава 10. Материалы будущего, или как ошибаться в догадках

Приложение I. О различных типах твердого тела, или кое-что о патоке

Приложение II. Простые формулы теории балок, или как сделать расчет на прочность

Сетевая публикация подготовлена учениками московской гимназии № 1543 Олегом Борисенко и Дмитрием Бегизовым



Дж. Гордон

Почему мы не проваливаемся сквозь пол

Перевод с английского С.Т. Милейко
Опубликовано издательством "Мир", Москва, 1971

ПРИЛОЖЕНИЕ I

О РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ТВЕРДОГО ТЕЛА, или КОЕ-ЧТО О ПАТОКЕ

Атомы и молекулы

Грубо говоря, существует сотня различных сортов атомов, не считая изотопов (то есть атомов с одинаковыми химическими свойствами, но несколько различными ядрами). Около десятка атомов - вещи эфемерные, их получают ученые-ядерщики путем превращений других атомов. Остальные, вероятно, всегда существовали в природе в более или менее неизменном виде. Из них около двадцати-тридцати достаточно распространены, чтобы интересовать нас в рамках этой книги. Каждый вид атомов зовется элементом. Все атомы одного элемента в основном идентичны, но атомы разных элементов сильно различаются по своим свойствам. Это основная причина того, почему материя представляется нам в таком бесконечном разнообразии.

Атомы элемента могут существовать в чистом однородном "элементарном" состоянии, например железо (Fe), углерод (C) и т.д. Они могут также существовать в виде смеси или раствора, свойства которых представляют собой, как правило, комбинацию свойств компонентов. Наконец, элементы могут образовать определенное химическое соединение, которое оказывается уже совершенно новым веществом со своими собственными характерными свойствами. Например, хлор (Cl) в нормальном состоянии представляет собой зеленый ядовитый газ, натрий (Na) - мягкий блестящий металл. Равное число атомов этих двух элементов образуют хлористый натрий (NaCl), белый безвредный порошок, обычную поваренную соль.

Два-три десятка распространенных элементов могут комбинироваться и комбинируются с образованием громадного количества веществ, твердых, жидких и газообразных, - этим и занимается химия. Комбинация всего лишь четырех элементов - углерода, водорода, кислорода и азота - может дать необозримое множество почти всех веществ, которые мы находим в живой материи. Они же составляют основу большого числа синтетических материалов (например, пластмасс), а также бензина, масел, медикаментов, красок и т. д. Соединения этого типа называются органическими. К неорганическим соединениям относятся минералы, керамика и т.п.

Основными строительными единицами твердых тел служат атом и молекула. Например, кристалл хлористого натрия (NaCl) построен из атомов натрия и хлора. Молекула бензола C_6H_6 содержит шесть атомов углерода и шесть атомов водорода. Кроме того, многие элементы существуют в форме молекул, например I_2 (иод). Молекулы могут быть очень разных размеров - от весьма малых, содержащих пару атомов, до сложнейших структур, состоящих из сотен, а иногда и тысяч атомов.

Самые большие органические молекулы могут достигать нескольких сотен ангстрем в длину. Неорганические молекулы обычно (хотя и не всегда) меньше, их типичный размер - что-нибудь около десятка ангстрем. Существуют, однако, длинные неорганические цепи молекул (например, асбеста), которые по длине не уступают органическим.

Химические связи

Атомы и молекулы, образующие вещества, удерживаются вместе химическими связями. Существуют несколько типов связей, сильно отличающихся по своим свойствам.

Ковалентная связь. Эта связь возникает, когда электрон, двигаясь по эллиптической орбите, охватывает сразу два атома. Связь такая возникает труднее других, но, раз возникнув, она часто бывает очень прочной и жесткой. Такого типа связи существуют между атомами органических молекул, атомами углерода в графите и алмазе и в ряде других случаев.

Ионная связь. Индивидуальные атомы элементов в целом электрически нейтральны, поскольку заряды образующих их частиц сбалансированы. Но когда натрий реагирует с хлором, металл отдает внешний электрон газу - натрий оказывается заряженным положительно, а хлор отрицательно. В результате два атома взаимно притягиваются. Ионная связь в

твердых телах особенно характерна для соединений, содержащих металлы. Довольно часто встречаются соединения, в которых связи имеют и ионный, и ковалентный характер. В то время как ковалентная связь строго направленная, ионная связь действует более равномерно в пространстве, окружающем заряженный атом.

Металлическая связь. Эта связь, как правило, держит вместе атомы металлов, когда они не образуют определенных химических соединений. В этом случае некоторая часть внешних электронов не удерживается непрерывно на орбитах вокруг фиксированных атомов, а свободно странствует по материалу, будучи коллективной собственностью всех атомов данного куска металла. Они образуют так называемый электронный газ. Металлическая связь довольно легко возникает, разрушается и восстанавливается. Так как электроны свободно движутся в металлах, последние являются хорошими проводниками электричества.

Водородные связи. Молекула воды H_2O в целом электрически нейтральна, но распределение электрического заряда в ее объеме неоднородно. Местные нарушения баланса зарядов могут обеспечивать большие силы притяжения. Многие соединения, особенно органические, имеют вдоль молекул многочисленные группы $-OH$, каждая из которых способна притягивать другие группы $-OH$, молекулы воды и т. д. Так осуществляется связь между молекулами растений и животных.

Силы Ван-дер-Ваальса. Они намного слабее других сил и возникают вследствие малых местных колебаний заряда, которые имеют тенденцию возникать по всей поверхности молекулы и не связаны с какими-то определенными химическими группами. Сцепление, основанное на вандерваальсовых силах, встречается в природе не очень часто, но оно довольно обычно для пластмасс и других искусственных органических молекул. Силы Ван-дер-Ваальса обеспечивают возможность слабой «склейки» почти любой пары веществ при условии, что поверхности достаточно чистые и находятся в хорошем контакте.

Теплота и плавление

Температура может подниматься вверх сколько угодно, но она не может падать ниже абсолютного нуля, положение которого впервые вычислил Кельвин и который соответствует -273° Цельсия. При абсолютном нуле все атомы и молекулы любого вещества находятся в покое и все вещества находятся в твердом состоянии*.

* За исключением гелия. - *Прим. ред.*

Как только температура начинает расти, все атомы у молекулы начинают вибрировать. Чем выше температура, тем интенсивнее их движения - теплота определяется просто беспорядочными колебаниями атомов и молекул в теле. Вода, например, остается твердым телом, льдом, вплоть до температуры $0^\circ C$, хотя его внутренние связи все больше и больше атакуются термическими возбуждениями с ростом температуры. Наконец, при $0^\circ C$ борьба заканчивается не в пользу сил сцепления и молекулы получают свободу перемены мест, которая характерна для жидкости - лед плавится, образуя воду. Если температура продолжает расти, перемещения молекул становятся все более энергичными; так продолжается до $100^\circ C$, когда вода закипает, образуя газ, или пар, в котором молекулы, освобожденные от какого бы то ни было взаимного сцепления, носятся совершенно произвольно, словно рой пчел. Когда температура понижается, те же самые события происходят в обратном порядке, пар конденсируется и рано или поздно замерзает. Эти изменения состояния обычно рассматриваются как физические события, поскольку единственной связью, которая при этом разрушается и восстанавливается, является водородная связь между молекулами воды, которые сами по себе остаются неизменными.

Хотя температуры плавления и кипения различных веществ изменяются в очень широком диапазоне, основные принципы во многом остаются неизменными для всех веществ. Некоторые вещества (иод, хлористый аммоний NH_4Cl и др.) переходят сразу из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое. Многие сложные твердые соединения химически разлагаются при нагреве еще до того, когда наступят условия для их плавления или испарения.

Кристаллизация

Как мы уже говорили, все молекулы с большей или меньшей силой притягиваются одна к другой, и, если тепловые толчки не помешают им в этом стремлении, они объединяются в некоторое тело, которое мы воспринимаем как твердое. Поскольку молекулы притягивают одна другую, они, естественно, пытаются сблизиться как можно теснее, а этого можно достичь, не наваливаясь способом «куча мала», а путем некоторой правильной упаковки. Куча наваленного кирпича занимает больший объем, чем те же кирпичи, сложенные в штабель. Но, поскольку молекулы имеют более или менее свободный выбор места для себя, они стремятся при затвердевании расположиться упорядоченно, подобно кирпичам в стене. Такая возможность существует, если жидкость остается совершенно текучей вплоть до момента «замерзания», как это имеет место в случае воды и металлов. В этих условиях молекула в поисках подходящей позиции будет долго шнырять вокруг, пока не окажется в месте, которое отвечает условию плотной упаковки. В нем она и оседает.

Такой ход событий приводит к образованию кристаллов, которые представляют собой в высшей степени упорядоченную систему атомов или молекул. Поразительна регулярность расположения большого числа атомов в хорошем кристалле.

Все твердые тела имеют тенденцию быть кристаллическими, но не все достигают такого состояния. Так, металлы и многие простые неорганические вещества имеют кристаллическую структуру. Некоторые вещества могут быть кристаллическими в той или иной степени. Хорошие кристаллы часто бывают довольно большими, до нескольких сантиметров в поперечнике. Они имеют характерные, часто простые геометрические формы.

Стекла

Если жидкость перед затвердеванием очень вязкая (то есть густая) или же она очень быстро охлаждается, молекулы не имеют возможности стать в положения плотной упаковки, и материал затвердевает в форме беспорядочного нагромождения молекул. Такой материал называется аморфным или стеклообразным. Высокая вязкость жидкости при приближении ее к точке замерзания связана, как правило, с тем, что молекулы объединяются в малоподвижные цепи или сетки. Именно такой процесс идет при затвердевании некоторых окислов, например двуокиси кремния SiO_2 , иначе говоря - песка, который плавится, превращаясь в вязкую жидкость, а при последующем охлаждении легко образует стекло. Точка плавления чистой двуокиси кремния очень высока (1600°C) поэтому для большинства стекол используют смесь песка, извести и соды, которая может плавиться в обычных печах.

Купленный в магазине сахар обычно кристаллический. Однако, если сахар расплавить и затем довольно быстро охладить, получится стеклообразная конфета. Патока очень вязкая, густая жидкость, при затвердевании она может перейти в стеклообразное состояние.

Полимеры

Металлы, а также вещества, подобные сахару и соли, имеют кристаллическое строение. К числу кристаллических тел относится также большая часть горных пород, имевших предостаточно времени на охлаждение. Стекло, обсидиан и ириска - аморфны. Некоторые материалы являют собой смесь этих двух структур. Например, керамическая посуда состоит из небольших кристалликов металлических окислов и силикатов, которые в процессе обжига склеиваются воедино тонкими прослойками аморфного стеклообразного материала. Глазурь на такой посуде получают наплавлением слоя легкоплавкого стекла.

Вещества живой природы, ткани растений и животных, а также все пластмассы существуют в форме полимеров. Полимеры - удобный строительный материал как для живой природы, так и для химиков-технологов. Основной принцип состоит здесь в том, что малые единичные молекулы пристраиваются одна к другой, так что образуются длинные цепочки или развитые сетки.

Эластомеры

Сюда относятся вещества, подобные натуральной и синтетической резине. Они до некоторой степени напоминают полимеры, так как их молекулы образуют длинные цепи. Но эти цепи не очень плотно прилегают одна к другой с боков. Поэтому цепи могут складываться и свиваться. Огромные механические удлинения резины определяются распутыванием этих цепочек.

Ю.Н. Работнов. Предисловие

Введение. Новая наука о прочных материалах, или как задавать трудные вопросы

Часть I. Упругость и теория прочности

Часть II. Неметаллы

Часть III. Металлы

Приложение I. О различных типах твердого тела, или кое-что о патоке

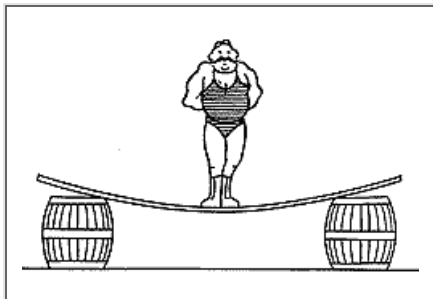
Приложение II. Простые формулы теории балок, или как сделать расчет на прочность

Сетевая публикация подготовлена учениками московской гимназии № 1543 Олегом Борисенко и Дмитрием Бегизовым

Дж. Гордон

Почему мы не проваливаемся сквозь пол

Перевод с английского С.Т. Милейко
Опубликовано издательством "Мир", Москва, 1971



ПРИЛОЖЕНИЕ II

Простые формулы теории балок, или как самому сделать расчет на прочность

Основная формула, описывающая положение дел в любом поперечном сечении нагруженной балки, выглядит следующим образом:

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y} = \frac{E}{R}.$$

Здесь M — *изгибающий момент*, который действует в данном сечении. Он равен силе, умноженной на расстояние, то есть выражается в кг·мм. Формулы для нахождения M приведены ниже.

I — *момент инерции* сечения балки; выражается в мм⁴. Понятие момента инерции подробно объясняется во всех элементарных учебниках. Здесь нам нужен момент инерции относительно нейтральной оси, которая в большинстве задач изгиба проходит через центр тяжести сечения. Величину I можно вычислить по одной из приведенных ниже формул.

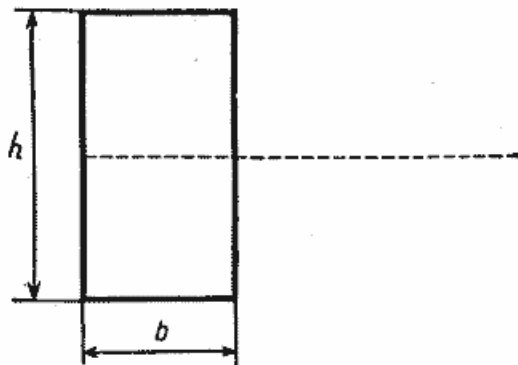
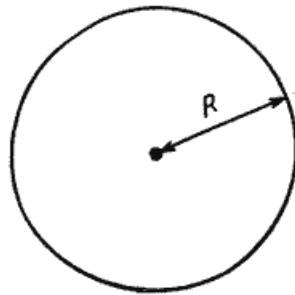


Рис. I.

Для прямоугольника (рис. I).

$$I = \frac{bh^3}{12}.$$

Если сечение построено из нескольких прямоугольников (например, труба прямоугольного сечения, двутавровая или другая профильная балка), его момент инерции может быть найден вычитанием моментов инерции незаполненных частей сечения.



Р и с. II.

Для круга (рис. II).

$$I = \frac{\pi r^4}{4}.$$

Опять-таки момент инерции трубы равен разности моментов инерции кругов, соответствующих внешнему и внутреннему радиусам трубы;

σ — напряжение в материале в кГ/мм²;

y — расстояние рассматриваемой точки от нейтральной оси;

E — модуль Юнга, имеет размерность напряжения;

R — радиус кривизны балки, изгибающейся под нагрузкой.

Чаще всего нам нужно вычислить напряжения в балке

$$\sigma = \frac{My}{I}.$$

Наибольшее напряжение в сечении будет там, где величина y максимальна.

Для прямоугольной балки

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad y_{\text{макс}} = \frac{h}{2},$$

$$\sigma_{\text{макс}} = 6 \frac{M}{bh^2}.$$

Вот почему балка двойной толщины в четыре раза прочнее и т. д.

Балки, нагруженные сосредоточенной (приложенной в точке) нагрузкой.

а. Консоль длиной l с нагрузкой W на свободном конце (рис. III).

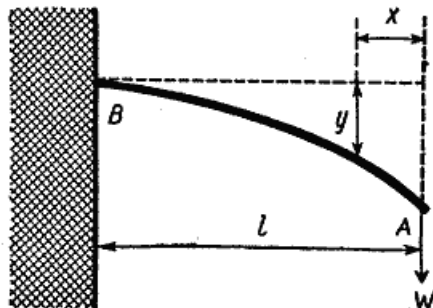


Рис. III.

Изгибающий момент на любом расстоянии x от свободного конца можно найти по формуле

$$M = Wx.$$

В точке B изгибающий момент имеет максимальное значение

$$M_{\max} = Wl.$$

Прогиб в любой точке x определяется следующей формулой:

$$y = \frac{1}{6} \frac{W}{EI} (x^3 - 3l^2x + 2l^3).$$

В точке A

$$y_{\max} = \frac{1}{3} \frac{Wl^3}{EI}.$$

Угол поворота сечения в точке A равен $\frac{1}{2} \frac{Wl^2}{EI}$ радиан.

б. Свободно опертая балка длиной l с нагрузкой W в середине пролета (рис. IV).

Изгибающий момент в любой точке

$$M = \frac{1}{2} Wx,$$

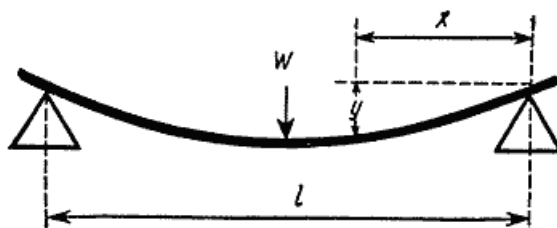
$$M_{\text{макс}} = \frac{Wl}{4}.$$

Прогиб в любой точке

$$y = \frac{1}{48} \frac{W}{EI} (3l^2x - 4x^3).$$

Прогиб в середине пролета

$$y_{\text{макс}} = \frac{1}{48} \frac{Wl^3}{EI}.$$



Р и с. IV.

Угол поворота концевое сечения равен $1/16 (Wl^2/EI)$ радиан. Поэтому балка удвоенной длины прогибается в 8 раз больше.

Ю.Н. Работнов. Предисловие

Введение. Новая наука о прочных материалах, или как задавать трудные вопросы

Часть I. Упругость и теория прочности

Часть II. Неметаллы

Часть III. Металлы

Приложение I. О различных типах твердого тела, или кое-что о патоке

Приложение II. Простые формулы теории балок, или как сделать расчет на прочность

Сетевая публикация подготовлена учениками московской гимназии № 1543 Олегом Борисенко и Дмитрием Бегизовым
