

Зависит ли прочность твердого тела от его размеров?

Член-корреспондент РАН А.Л.Волынский

Вопрос, вынесенный в заголовке, может показаться странным. Под прочностью обычно понимают напряжение, при достижении которого твердое тело распадается на части, — именно напряжение (т.е. силу, деленную на поперечное сечение), а не просто силу. Сила действительно зависит от размеров твердого тела. Например, чтобы разорвать одну нить, достаточно относительно малой силы, а чтобы разорвать сплетенный из этих же ниток канат, необходимо затратить существенно большее усилие. Однако если силу отнести к поперечному сечению твердого тела (в первом случае малую силу к сечению одной нитки, а во втором — большую силу к сумме сечений всех ниток, составляющих канат), мы получим одно и то же разрушающее напряжение, или прочность. Казалось бы, ответ на заданный вопрос получен: нет, не зависит.

Разрушительное несовершенство

Однако все оказывается не так просто, если обратиться к практике. Еще в начале прошлого века знаменитый американский ученый А.Гриффитс обнаружил удивительный эффект, опровергающий наш простой



Александр Львович Волынский, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — структура и механика полимеров.

ответ. Он измерял прочность стеклянных волокон различного диаметра и установил, что с уменьшением диаметра прочность отдельных волокон увеличивается. Это увеличение далеко выходит за рамки погрешности измерений. Наиболее тонкие из исследованных волокон (диаметром $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ см) имеют прочность в 50—100 раз большую, чем волокна большего диаметра. В последующих исследованиях Гриффитс и другие физики разгадали механизм обнаруженного явления. Оказывается, прочность твердого тела определяется не только и даже не столько прочностью межатомных или межмолекулярных связей, связывающих атомы: она зависит от реальной структуры объекта. В этом случае под структурой понимаются разного рода неконтролируемые несовершенст-

ва, дефекты, посторонние микроскопические включения, микротрещинки и т.д. Именно такие несовершенства структуры собирают вокруг себя (концентрируют) напряжения, во много раз превосходящие среднее приложенное напряжение. В результате указанного эффекта как раз в местах наибольшей концентрации напряжений зарождаются и развиваются трещины, приводящие к катастрофическому разрушению твердого тела. Дефекты структуры распределены в объеме и на поверхности твердого тела случайным образом. Очевидно, что их общее количество зависит от размеров твердого тела: чем больше размеры, тем больше в нем содержится дефектов и тем выше вероятность его разрушения при приложении одной и той же нагрузки. Вот почему прочность твер-

дых тел растет с уменьшением их геометрических размеров.

Но установленные закономерности не снимают полностью вопроса о взаимоотношениях прочности и масштабов. Возникает новый вопрос: будет ли зависеть прочность твердых тел от их размеров, если последние станут соизмеримыми с молекулярными размерами? Ответ на него оказывается принципиальным, если вспомнить о бурном развитии в последние годы нанотехнологий [1]. Измельчение твердых тел до столь малых агрегатов молекул (на несколько порядков меньших, чем объекты, исследованные Гриффитсом) приводит к весьма важным последствиям [1–3]. Установлено, что переход вещества от микро- к наноразмерам влечет за собой качественные изменения в их физических, механических, физико-химических и других свойствах. Эти изменения настолько перспективны в практическом отношении, что перед учеными встает неотложная задача изучить и понять механизм их возникновения.

Чем же отличаются твердые тела, имеющие наноразмеры, от обычных твердых тел? Самое очевидное различие — рост роли приповерхностной области. Взаимодействие между молекулами (атомами) на поверхности отличается от объемного, поскольку они не имеют соседей с внешней стороны. В объемных, блочных, твердых телах вклад этого слоя в макроскопические свойства крайне мал, и им обычно пренебрегают. Однако когда размеры твердого тела делаются малыми, соизмеримыми с молекулярными размерами (наноразмерными), влияние поверхностных слоев становится значительным, и свойства вещества качественно изменяются [1–3].

Несмотря на исключительную важность сведений о свойствах вещества в «наносостоянии», указанная проблема пока далека от своего решения. В частности, практически отсутст-

вуют достоверные сведения о деформационно-прочностных свойствах материала, имеющего размер единицы — десятки нанометров. Отсутствие данных о деформационно-прочностных свойствах твердых тел в слоях нанометрового диапазона обусловлено главным образом экспериментальными трудностями. Действительно, трудно себе представить, каким образом образец толщиной, например, 10 нм можно поместить в некое устройство, подвергнуть деформации и измерить соответствующее напряжение. А ведь получить такие данные — значит не только ответить на вопрос, сформулированный в названии, но и экспериментально обосновать важнейшие положения теории твердого тела.

Измеряем «напопрочность»

Понятно, что развитие новых методов исследования, способных дать достоверную информацию о фундаментальных свойствах «нановещества», очень актуально. Для практического решения данной задачи на химическом факультете МГУ им.М.В.Ломоносова был предложен новый подход к оценке механических свойств твердых тел, который базируется на обнаруженных ранее фундаментальных деформационно-прочностных свойствах полимерных пленок с нанесенным на их поверхность тонким покрытием [4–9]. В экспериментальном плане такой подход очень прост. Твердое тело, свойства которого необходимо оценить, наносится в виде тонкого (практически любой толщины) слоя на поверхность полимерной пленки. Методы такого нанесения хорошо разработаны, поскольку полимерные пленки с тонкими покрытиями широко используются в практике и поэтому выпускаются в промышленном масштабе.

Если такую пленку с покрытием подвергнуть простому

растяжению в одном направлении*, на ее поверхности произойдут удивительные превращения. На рис.1 представлена электронная микрофотография рельефа полимерной пленки с покрытием после растяжения пленки в полтора раза. Светлые полосы являются фрагментами разрушившегося покрытия, а темные — образовавшиеся трещины, т.е. обнажившаяся поверхность полимера. Видно, что покрытие распадается на множество сильно вытянутых островков-полос примерно одинакового размера, ориентированных перпендикулярно направлению растяжения, и одновременно на этих фрагментах возникает регулярный волнообразный рельеф.

Экспериментальное и теоретическое исследование обнаруженного явления позволило разработать универсальную методику оценки механических свойств, и в частности прочности твердых тел в слоях практически любой толщины. Здесь нам понадобится установленная в работах [4–9] четкая связь между прямо наблюдаемыми особенностями фрагментации покрытия при деформировании полимера-подложки и свойствами материала покрытия и подложки. В частности, средний размер (L) фрагмента разрушения в направлении оси растяжения (светлых полос на рис.1) оказывается равным

$$L = 4b\sigma^*/\sigma_0, \quad (1)$$

где b — толщина покрытия, σ^* — предел его прочности и σ_0 — напряжение в подложке. Значение b известно, величина σ_0 легко определяется в эксперименте, а L прямо измеряется на микрофотографии. Таким образом, соотношение (1) дает возможность простым путем находить важ-

* Подчеркнем, что полимерная пленка стремится сохранить свой объем. Поэтому одноосное растяжение сопровождается сжатием в направлении, перпендикулярном растягивающей силе. Вообще сжатие с растяжением часто сопутствуют друг другу при деформациях.

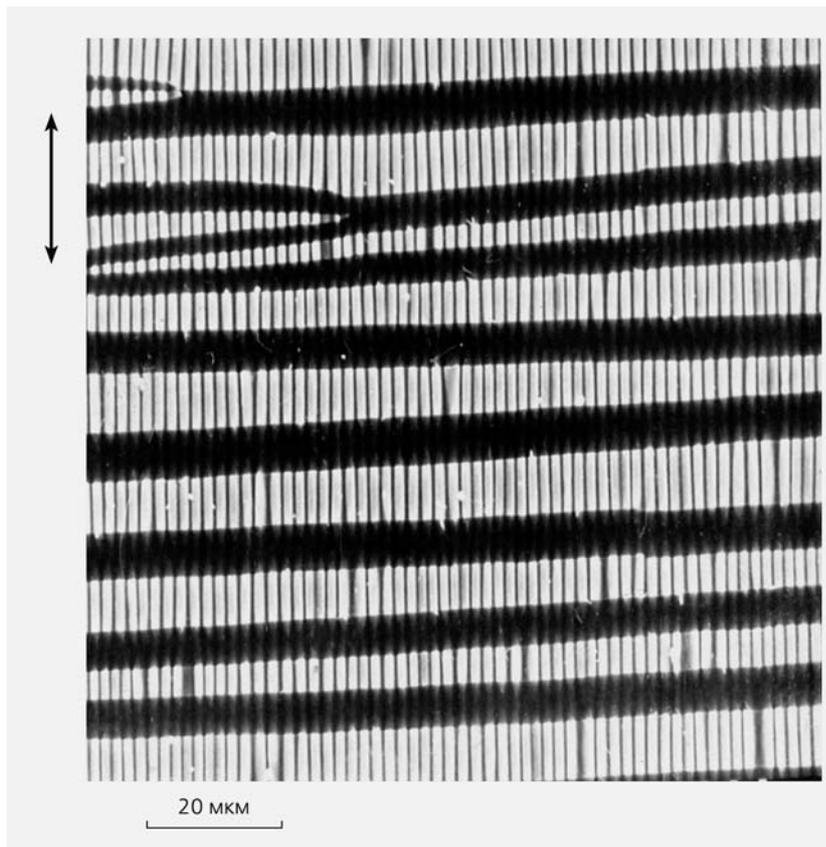


Рис.1. Поверхность образца поливинилхлорида, на который был нанесен тонкий (16 нм) слой платины, и растянутого после этого на 50% при 90°C (изображение получено в сканирующем электронном микроскопе). Здесь и далее двойная стрелка показывает направление растяжения.

нейшую характеристику твердого тела — прочность — в слоях практически любой толщины.

Прежде чем мы оценим прочность металлического покрытия в нанометровых слоях, зададимся вопросом: а как нам быть с дефектностью покрытия, нанесенного на поверхность полимерной пленки? Вопрос не праздный, если вспомнить знаменитые опыты Гриффитса. Действительно, нам важно знать, какую прочность мы определяем с помощью уравнения (1), с учетом характеристической дефектности или без нее. Используемая методика дает ответ и на этот вопрос. Оказывается, что на первых стадиях деформации полимерной подложки покрытие дробится на систему фрагментов самого разного

размера. Этот процесс как раз и обусловлен наличием в покрытии хаотически расположенных микродефектов, о которых речь шла выше. Каждый такой дефект, представляющий концентратор напряжения, рождает трещину, в результате чего на поверхности полимерной пленки образуется сообщество фрагментов с широким распределением по размерам. Однако после возникновения начального разбиения по местам дефектов развивается весьма интересный, уникальный процесс разрушения уже каждого из возникших островков. Если процесс растяжения подложки продолжается, каждый образовавшийся фрагмент остается под нагрузкой. Но напряжение в пределах островка распре-

лено крайне неравномерно: на концах оно равно нулю, а по мере удаления от концов растет и достигает своего максимума точно в центре фрагмента. В ходе растягивания напряжение во всех фрагментах растет и в какой-то момент точно в центре достигает предела прочности. Происходит дальнейшее разрушение покрытия, причем удивительно регулярно: каждый островок делится на две равные части. Рис.2 наглядно иллюстрирует это явление. Такого рода дробление каждого фрагмента надвое продолжается, пока слабая полимерная подложка способна передавать островкам напряжение, достаточное для их разрушения. Чем больше подложка растягивается, тем меньше становятся размеры фрагментов, и в конце концов они станут столь малыми, что напряжение в центре не будет достигать необходимой величины; фрагменты перестанут делиться, а начнут просто удаляться друг от друга на растягиваемой подложке, сохраняя свои размеры. В силу изложенных причин размеры фрагментов выравниваются, и на поверхности подложки возникает система островков покрытия, имеющая весьма узкое распределение по размерам.

Итак, использованная методика позволяет разделить процесс фрагментации твердого тела (покрытия) на две части. Сначала «срабатывают» дефекты в покрытии, в результате чего возникает набор фрагментов разрушения покрытия самых разных размеров, после чего наступает стадия регулярного разрушения каждого фрагмента на две равные части. Полученные результаты позволяют сделать два важных вывода. Во-первых, даже самые тонкие пленки твердого тела, имеющие нанометровые размеры, содержат дефекты, способные вызывать их разрушение. Во-вторых, размер фрагментов, получаемых на второй стадии разрушения, характеризуется прочностью бездефект-

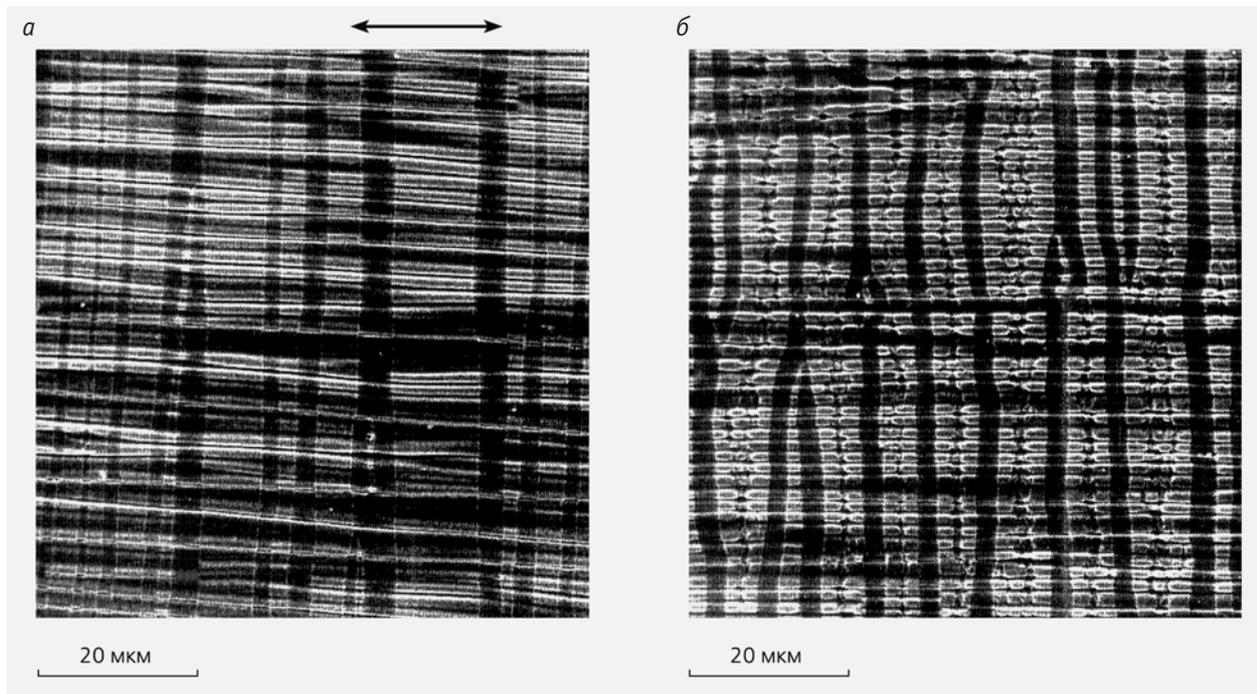


Рис.2. Поверхность образца полиэтилентерефталата с тонким металлическим покрытием после его деформирования на 50% при 100°C (а) и после его дополнительного растяжения еще на 50% при 80°C (б) (изображение получено в сканирующем электронном микроскопе).

ного твердого тела. Действительно, возникновение трещины строго в середине каждого фрагмента не может быть связано с наличием какого-либо дефекта, поскольку последние расположены в покрытии хаотически.

Теперь можно попытаться использовать формулу (1) для оценки прочности твердого тела в слоях нанометрового диапазона. На рис.3 представлены зависимости прочности платины и золота, вычисленные с помощью соотношения (1), от толщины металлического слоя, нанесенного на полиэтилентерефталатную пленку. Видно, что в интервале толщин от 30 до ~15 нм прочность обоих металлов практически не зависит от толщины и составляет 18–22 кг/мм² для золота и 25–30 кг/мм² для платины. Эти значения количественно согласуются с известными значениями прочности для блочных металлов (17.6–25 кг/мм² для золота и 24–35.1 кг/мм² для платины

[10]). В то же время при уменьшении толщины покрытия ниже примерно 15 нм прочность обоих металлов начинает возрастать: для платины достигается значение 150–170 кг/мм², для

золота — до 280 кг/мм². Получается, что прочность металла в нанослоях по крайней мере на порядок превосходит прочность блочного материала. Приведенные результаты можно

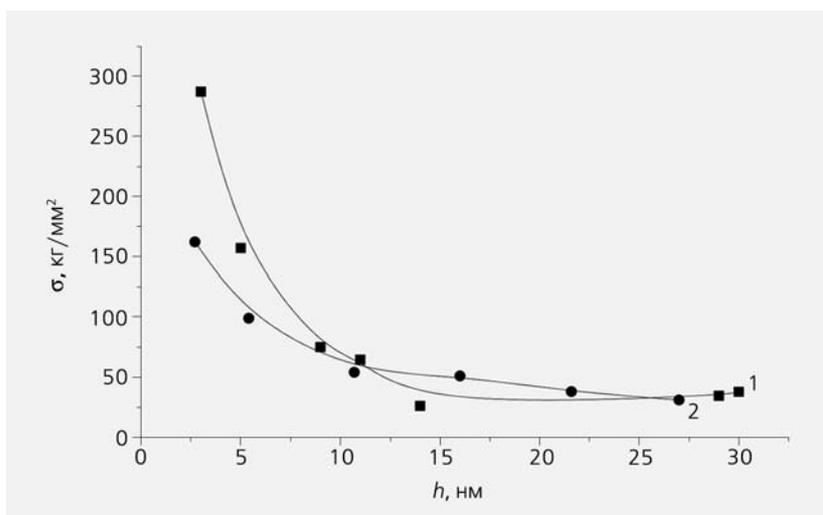


Рис.3. Зависимости прочности золота (1) и платины (2), вычисленной с помощью соотношения (1), от толщины металлического слоя, нанесенного на пленку полиэтилентерефталата. (Пленку с покрытием растягивали на 100% при 90°C.)

считать первой прямой экспериментальной оценкой прочности твердого тела нанометрового размера в условиях его растяжения. Кроме того, эти данные позволяют провести условную границу между размерами твердого тела, в данном случае металла, в обычном объемном состоянии и в наносостоянии. Итак, ответ получен, прочность твердого тела зависит от его размеров в наноразмерном диапазоне: чем меньше размер, тем выше прочность. Важно отметить, что, несмотря на отсутствие прямых измерений прочности твердого тела в нанослоях, теория предсказывает рост прочности твердых тел при переходе к наномасштабам [11]. А что происходит, наоборот, в макромире?

От нано- к мега-

Предлагаемый подход универсален и пригоден не только для оценки прочности ультратонких слоев. Все структурные особенности, имеющие место при деформировании пленок с покрытием (рис.1), выполняются и для других аналогичных систем. Дальнейшие исследования показали, что возникновение регулярных структур носит общий характер и не зависит от

природы материала подложки и покрытия. Необходимыми условиями, определяющими саму возможность образования описанных выше структур в результате деформации, являются: во-первых, пренебрежимо малая толщина покрытия по сравнению с толщиной подложки и, во-вторых, значительное различие в модулях упругости (жесткости) покрытия и подложки. Другими словами, система должна быть построена из жесткого тонкого твердого тела, покоящегося на мягкой, податливой, но толстой подложке. Закономерности поверхностного структурообразования (фрагментация покрытия и формирование регулярного рельефа) обусловлены действием сил, приложенных со стороны податливой подложки.

Полимерная пленка с тонким покрытием моделирует любые системы, построенные по принципу «тонкое твердое на толстом мягком». Это обстоятельство позволяет оценить деформационно-прочностные свойства других аналогичных систем. Наиболее интригующей кажется попытка использовать развитые выше представления для оценки свойств такого грандиозного объекта, как земная кора.

В настоящее время не вызывает сомнений тот факт, что Земля представляет собой ти-

пичную систему «твердое покрытие на мягком основании». Согласно современным взглядам, относительно тонкая (5—50 км) твердая наружная оболочка Земли (литосфера) покоится на относительно податливой и толстой (2900 км) оболочке — верхней мантии. Вязкое, текучее вещество мантии Земли находится в состоянии неустойчивости и непрерывно перемещается благодаря тепловому градиенту [12], из-за чего в земной коре генерируются механические напряжения. Они отвечают за различные геодинамические процессы, происходящие на Земле, — дрейф континентов, землетрясения, процессы рельефообразования. Итак, строение верхних оболочек Земли в полной мере, по обоим условиям, соответствует критериям рассматриваемых систем.

Сопоставим два рельефа — рельеф полимерных пленок с тонким покрытием, растянутых в одном направлении, и реально существующий рельеф океанического дна. Это позволяет сделать рис.4, где представлены электронная микрофотография поверхности растянутой каучуковой пленки с золотым покрытием и карта рельефа участка океанического дна в районе Восточно-Тихоокеанского поднятия [13]. Рельеф типа показан-

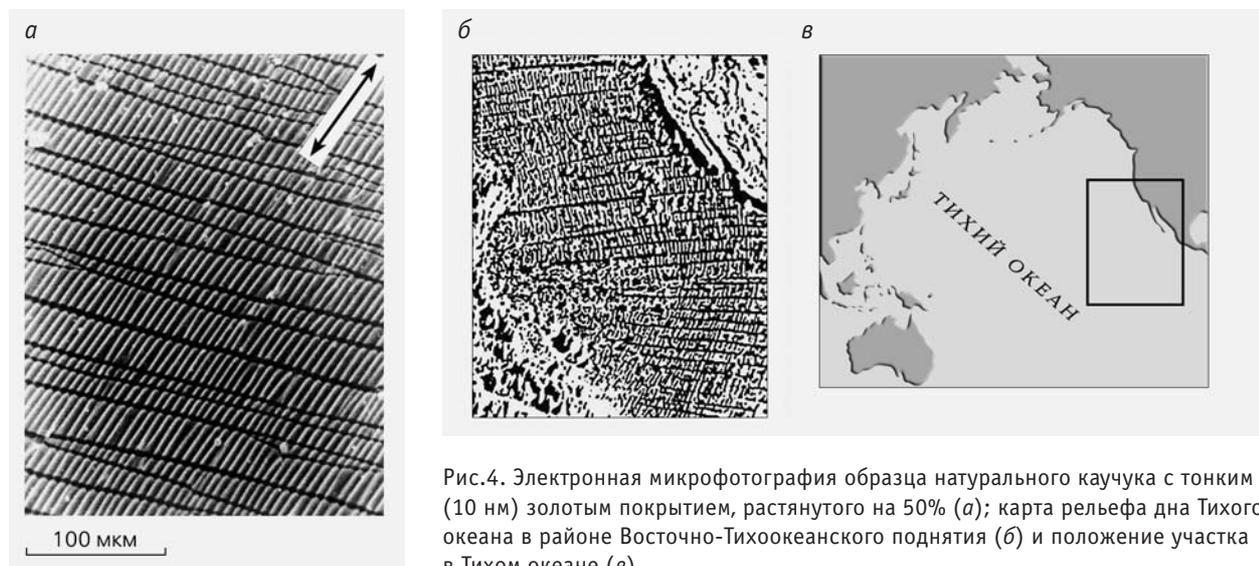


Рис.4. Электронная микрофотография образца натурального каучука с тонким (10 нм) золотым покрытием, растянутого на 50% (а); карта рельефа дна Тихого океана в районе Восточно-Тихоокеанского поднятия (б) и положение участка в Тихом океане (в).

ного на рис.4,б занимает колоссальные пространства на дне, измеряемые многими тысячами километров (не менее трети площади всего Мирового океана). Замечательно, что рельеф океанического дна поразительно напоминает рельеф, получаемый при растяжении полимерных пленок с твердым покрытием [14]. Такое внешнее сходство подтверждает сделанные выше предположения об общности механизма явлений, происходящих в системах «твердое покрытие на податливом основании» самого различного масштаба. Отметим, что происхождение системы регулярно расположенных на дне трещин (трансформных разломов), параллельных друг другу, не имеет сегодня своего объяснения.

Если аналогия между рассматриваемыми объектами верна, то простое наблюдение рельефа поверхности дает ясную и очень важную информацию о направлении сжимающих и растягивающих напряжений, действующих в земной коре. Оценить такого рода напряжения до сих пор не удавалось. Это можно сделать, если предположить, что земная кора — самостоятельный физический объект, т.е. немислимых размеров, но реальное твердое тело. Оно имеет сферическую форму, непостоянный химический состав, дефектность, в нем действует перепад температур и множество других осложняющих факторов, но это сплошное покрытие, покоящееся на относительно мягкой «подстилке». Рассмотрение земной коры как единого объекта, способного воспринимать и передавать механическое напряжение на огромные расстояния (в пределах целых океанов, а может быть, и в глобальном масштабе) [12], позволяет применить развитый в [4—9] подход для оценки важнейших механических показателей земной коры. Понятно, что модуль упругости или прочность куска базальта, которые легко измерить экспериментально в лаборатории,

совершенно не то же самое, что модуль упругости или прочность земной коры в целом. Очевидно, что определить указанные характеристики для земной коры как единого объекта каким-либо другим способом в принципе нереально.

На дне морском

Напомним вкратце современные основополагающие представления о тектонических процессах, протекающих в земной коре и примыкающих к ней оболочках [15]. Около 200 млн лет назад существовавший тогда единственный праматерик Пангея по неизвестным причинам раскололся на несколько частей, которые начали свой дрейф, продолжаясь по настоящее время. Благодаря этому дрейфу возникли все современные материки и океаны. Механизм дрейфа материков, открытие которого стало одним из самых замечательных достижений науки XX в., состоит в следующем. На дне океана возникла и существует по настоящее время система гигантских трещин — срединно-океанических хребтов (СОХ), опоясывающих весь земной шар. Вещество мантии Земли поступает через эти трещины, раздвигая их края, в резуль-

тате чего происходит расширение (спрединг) океанического дна. Материки благодаря этому расширению «едут» на океанической коре, как на ленте транспортера, постепенно удаляясь друг от друга или сближаясь.

Механизм дрейфа материков сформулирован в теории литосферных плит, о чем можно прочесть, например, в сборнике [15]. Тектоническая картина Атлантического океана схематически представлена на рис.5. Срединно-Атлантический хребет разделяет Американскую и Африканскую плиты; поступающее через СОХ вещество мантии раздвигает его берега, в результате чего Африка и Америка удаляются друг от друга со скоростью нескольких сантиметров в год. Расширение дна Атлантического океана должно сопровождаться сжатием океанического дна в другом месте, поскольку размеры Земли не изменяются. Такая убыль площади действительно происходит из-за пододвигания Тихоокеанской плиты под Американский континент (субдукции) [14]. Очевидно, что встречное движение Тихоокеанской и Американской плит приводят к их взаимному сжатию. Поскольку одноосное сжатие покрытия на податливом основании генерирует в нем нормально направленное растягивающее напряже-

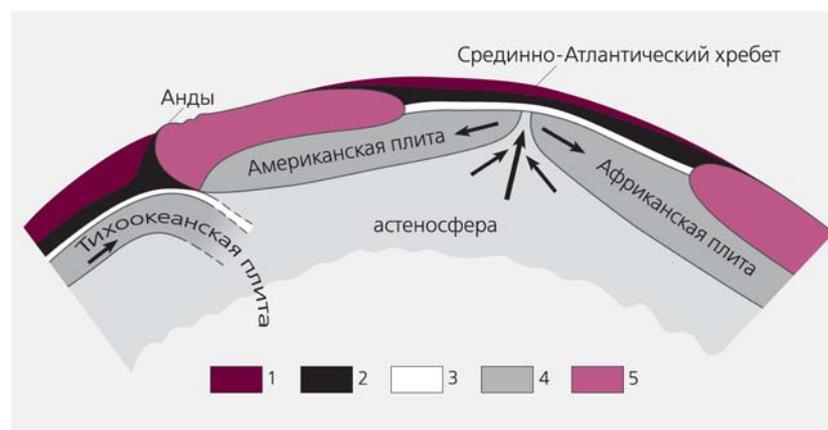


Рис.5. Геодинамическая обстановка в районе Срединно-Атлантического хребта с позиции тектоники литосферных плит [15]. 1 — вода, 2—5 — литосфера (2 — осадки, 3 — базальтовая океаническая кора, 4 — верхняя мантия, 5 — континентальная кора).

ние [4–9], можно утверждать, что океаническая кора в Атлантике оказывается сжатой в направлении, нормальном оси СОХ, и соответственно растянутой вдоль хребта. С точки зрения рассматриваемой модели очень важно, что предполагается существование растягивающих напряжений, действующих именно параллельно оси СОХ. Качественно это обстоятельство сразу же позволяет понять, почему трансформные разломы всегда перпендикулярны оси спрединга (СОХ). Дело в том, что трещина разрушения в твердом теле *всегда* растет перпендикулярно оси разрывного (растягивающего) напряжения.

Атлантические расчеты

Попытаемся использовать подходы, развитые в работах [4–9], для оценки важнейших деформационно-прочностных свойств океанической коры, образующей дно Атлантики. Самая характерная особенность рельефа дна в этом районе мирового океана — наличие СОХ, расположенного точно посередине между Африкой и Америкой и повторяющего контуры их берегов (рис.6). Как и во всех других случаях, СОХ имеет систему параллельных трещин (трансформных разломов), пересекающих его практически под прямым углом.

Для оценки прочности океанического дна в окрестности Срединно-Атлантического хребта введем в уравнение (1) $L = 4b(\sigma^*/\sigma_0)$ геодинамические характеристики. Те же буквы здесь будут обозначать: L — среднее значение расстояния между трещинами (трансформными разломами); b — толщину покрытия (океанической коры); σ^* — разрывную прочность покрытия (океанической коры) и σ_0 — напряжение в подложке (рельефообразующее напряжение). Величину L снова можно прямо измерить на карте океанического дна. Для практического исполь-

зования уравнения необходимо знать рельефообразующее напряжение (σ_0) в подкоровом слое верхней мантии Земли.

В настоящее время общепринято считать, что движущей силой спрединга, а значит и дрейфа континентов, служит вязкое конвективное течение вещества верхней мантии Земли (рис.5). Для описания процесса вязкого течения удобно пользоваться универсальным законом Ньютона, который позволяет рассчитать напряжение, поддерживающее течение жидкости (это и есть напряжение в вязком веществе мантии σ_0):

$$\sigma_0 = \eta d\epsilon/dt, \quad (2)$$

где η — вязкость, $d\epsilon/dt$ — скорость деформации. Оценим это напряжение, считая вязкость вещества мантии Земли, прилегающей к литосферной плите, $\eta = 10^{21}$ Па·с [12]. Скорость дрейфа континентов, очевидно, равна скорости вязкого перемещения вещества мантии Земли, примыкающего к литосфере. В связи с этим скорость течения вещества верхней мантии примем равным надежно определяемой сегодня скорости спрединга (скорости дрейфа материков), которая составляет 10 см/год. Эта скорость, т.е. скорость деформации в уравнении (2), будет равна $d\epsilon/dt = (\Delta l/l_0)/\Delta t$, где l_0 — начальное расстояние между материками (5000 км), Δl — смещение через год (10 см) и Δt — время (1 год). Подставив указанные значения в уравнение (2), получаем $\sigma_0 \approx 0.6$ МПа. Это и есть напряжение, поддерживающее конвективное движение (течение) мантийного вещества или, что то же, рельефообразующее напряжение в земной океанической коре. Оно неожиданно оказалось очень малым; столь малое напряжение в реальной океанической коре экспериментально определить достаточно сложно. Экспериментально в океанической коре обычно оценивают напряжение в местах его кон-

центрации, например в местах изгиба коры — в зонах субдукции. Однако к достаточно высоким локальным напряжениям вполне может приводить найденное с помощью уравнения (2) очень малое, фоновое напряжение, действующее в течение очень длительного времени, возможно, в течение всего времени спрединга.

Тем не менее полученное значение позволяет использовать уравнение (1) для оценки прочности земной океанической коры, если рассматривать ее как единое твердое тело. Для этого возьмем значение толщины земной коры в окрестности СОХ $b = 10$ км [12], среднее расстояние между трансформными разломами $L = 200$ км, которое мы получаем из карты (рис.6), и вычисленное с помощью закона Ньютона тектоническое напряжение $\sigma_0 \approx 0.6$ МПа. Подставив указанные величины в уравнение (1), найдем, что прочность океанической земной коры в местах трансформных разломов составит примерно 3 МПа. Это первая и пока единственная оценка прочности земной коры как целого твердого тела. Отметим, что используемый нами подход дает оценку прочности для твердых тел в очень тонких (нанометровых) слоях неожиданно высокую, в то время как для твердого тела огромных, колоссальных размеров — очень низкую. А может ли земная океаническая кора иметь столь малую прочность?

Ничто не вечно под луной

Необходимо напомнить, что, вообще говоря, прочность твердых тел, хотя и включается в соответствующие справочники, не является их константой, как, например, температура плавления или удельная теплоемкость. Современные представления о прочности твердых тел (кинетическая теория прочности [16]) трактуют их разрушение как некий термофлуктуацион-

ный процесс, определяемый тепловым колебательным движением молекул. Именно процессы, происходящие на молекулярном уровне, приводят в итоге к отмеченным выше мас-

штабным природным явлениям. Молекулы любого твердого тела совершают тепловое движение, т.е. колеблются вокруг положения равновесия. Разрушение, или разрыв химической связи,

происходит под действием тепловых флуктуаций, когда самопроизвольно возникают колебания атомов (молекул) с гигантской амплитудой. Другими словами, разрушение твердого тела

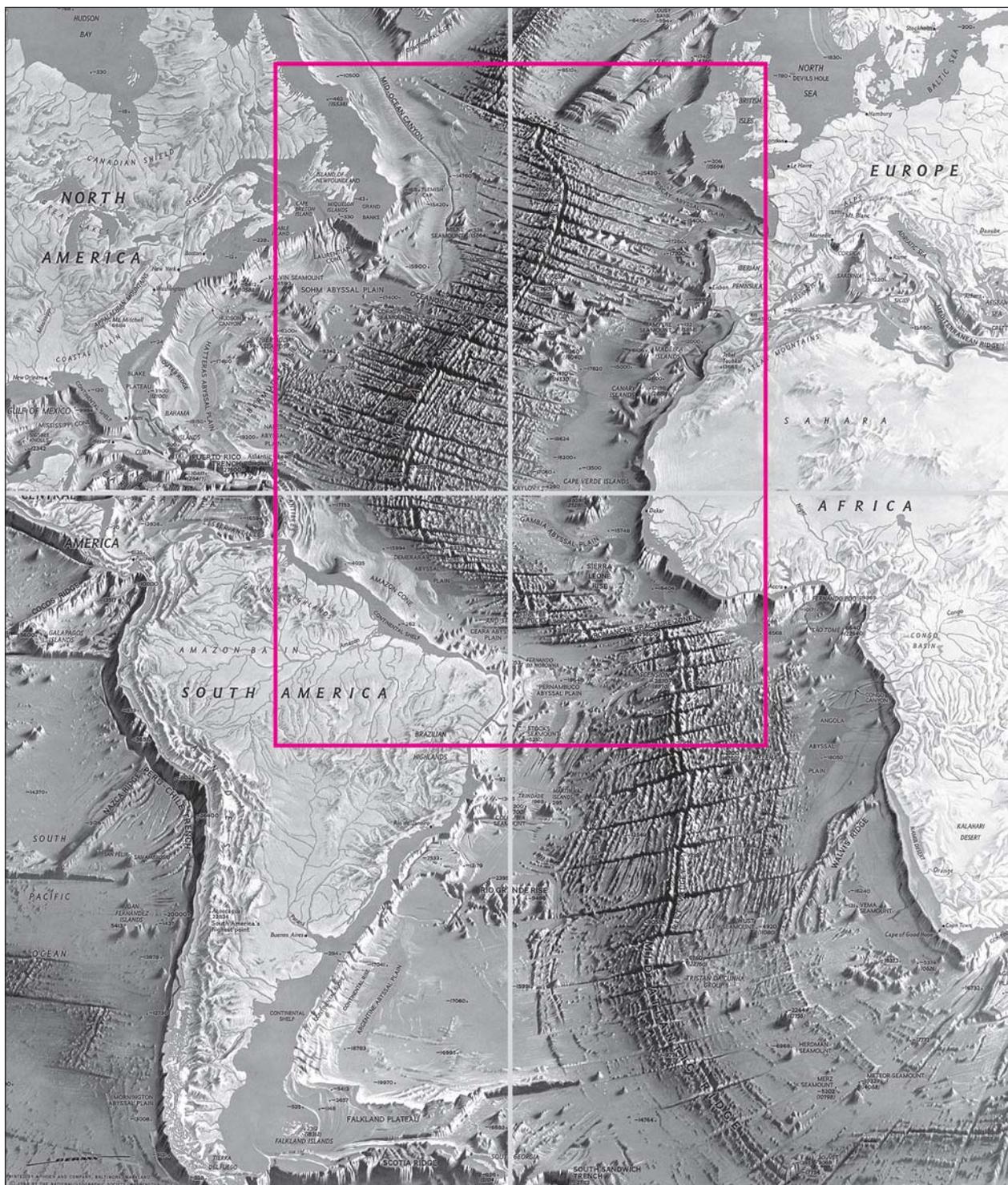


Рис.6. Карта рельефа дна Атлантического океана.

есть вероятностный процесс, а там, где действуют вероятностные законы, там вступает в силу важнейший фактор этого процесса — время.

С точки зрения кинетической (вероятностной) теории прочности твердых тел Пизанская башня обречена упасть. Дело во времени. Более того, все земные твердые объекты рано или поздно разрушатся, поскольку составляющие их структуру химические связи непрерывно атакуются тепловым движением и одновременно находятся в поле механических напряжений. Так современная физика вполне строго подтверждает старую житейскую мудрость: ничто не вечно.

Положения кинетической теории прочности твердых тел легко проверить в простых экспериментах. На рис.7 показана зависимость разрушающего напряжения от времени действия нагрузки для трех материалов различной природы: каменной соли (I), поликристаллического

алюминия (II) и капрона (III) [16]. Хорошо видно, что прочность твердого тела, независимо от его химической природы, действительно не является константой материала, а сильнее всего образом зависит от времени действия нагрузки, ее величины и температуры.

Предлагаемый подход к оценке процесса разрушения имеет два важных аспекта. Во-первых, возникает уникальная возможность оценить деформационно-прочностные свойства такого грандиозного тела, как земная кора. Во-вторых, до сих пор удавалось экспериментально оценивать прочность твердых тел в условиях действия постоянной нагрузки в течение относительно малых времен ее воздействия, измеряемых часами, сутками (рис.7). В случае океанической коры реализуется ситуация, когда нахождение твердого тела под нагрузкой измеряется, видимо, миллионами лет.

Количественную связь между прочностью твердых тел, време-

нем действия постоянной нагрузки и температурой устанавливает уравнение, носящее имя замечательного советского ученого академика С.Н.Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/RT], \quad (3)$$

где τ — время до разрушения, U_0 — энергия активации процесса разрушения (разрыва химической связи в твердом теле), γ — так называемый активационный объем, который характеризует объем, где разыгрывается элементарный акт процесса разрушения (разрыва связей), τ_0 — частота тепловых колебаний индивидуальных атомов в твердом теле относительно их положений равновесия, σ — действующее постоянное напряжение, R — универсальная газовая константа и T — абсолютная температура. Экспериментальные данные, представленные на рис.7, прекрасно удовлетворяют уравнению Журкова и позволяют найти все его параметры.

Разумеется, определение параметров уравнения Журкова для земной коры пока остается нерешенной задачей. Действительно, в земной коре имеется градиент температуры, градиент давления, градиент химического состава и масса других осложняющих особенностей. Однако если этот объект является единым твердым телом, то в определенных условиях оно может подвергнуться механическому разрушению, имеющему в основе разрыв химических связей, для описания которого можно применить существующие сегодня представления о процессе разрушения твердого тела на молекулярном уровне.

Поскольку в настоящее время не очень ясен физический смысл рассматриваемых параметров применительно к столь сложному объекту, воспользуемся их некими средними значениями. Эти параметры были определены экспериментально (рис.7) для разных твердых тел, таких как металлы, стекла, полимеры и т.д. После подстановки

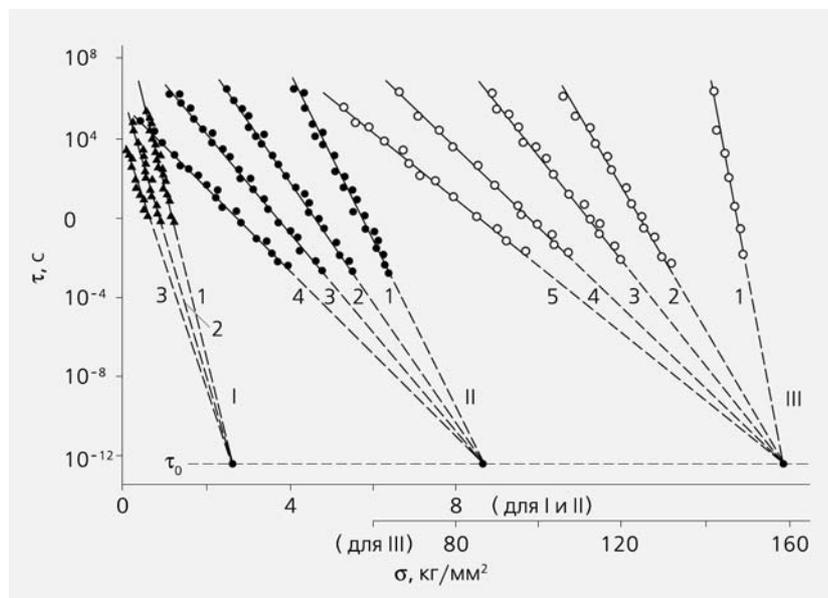


Рис.7. Зависимость долговечности от напряжения при разных температурах [16].

- I — каменная соль: 1 — 400; 2 — 500; 3 — 600°C;
- II — алюминий (поликристаллический): 1 — 18; 2 — 100; 3 — 200; 4 — 300°C;
- III — капрон (ориентированное волокно): 1 — -180; 2 — -120; 3 — -75; 4 — +20; 5 — +80°C.

соответствующих значений в (3) получаем, что время до разрушения земной коры (развития трансформного разлома) при столь маленьком напряжении (3 МПа) составит примерно 30 млн лет. Это огромный срок. Напомним, что все созданные человеком сооружения имеют возраст не более 10 тыс. лет. Тем не менее археологам, как правило, достаются одни лишь руины.

И дело здесь не только в пожарах и войнах, но главным образом в неустанной разрушительной работе теплового движения и действии разных, даже очень малых механических напряжений.

* * *

Отвечая на вынесенный в заголовок вопрос, можно сказать, что зависимость прочности от

размеров твердого тела на самом деле существует. Эта зависимость четко выявляется с помощью развитого в [4–9] универсального метода, позволяющего моделировать и оценивать деформационно-прочностные свойства твердых тел независимо от их размеров в тех случаях, когда их экспериментальное измерение крайне затруднено или практически нереально. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 05-03-32538, 06-03-32452 и 06-03-08025 офи-а).

Литература

1. Головин Ю.И. Нанотехнологическая революция стартовала! // Природа. 2004. №1. С.25–36.
2. Сергеев Г.Б. Нанохимия. М., 2003.
3. Суздаев И.П. Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М., 2006.
4. Волынский А.Л. Удивительные свойства упаковочной пленки // Природа. 2005. №5. С.67–72.
5. Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф. Структурная самоорганизация аморфных полимеров. М., 2005.
6. Волынский А.Л., Баженов С.Л., Бакеев Н.Ф. // Рос. хим. журн. (ЖВХО им.Д.И.Менделеева). 1998. Т.42. №3. С.57–68.
7. Volynskii A.L., Bazhenov S.L., Lebedeva O.V., Bakeev N.F. // J. Mater. Sci. 2000. V.35. P.547–554.
8. Volynskii A.L., Bazhenov S.L., Lebedeva O.V., Ozerin A.N., Bakeev N.F. // J. Appl. Polymer Sci. 1999. V.72. P.1267–1275.
9. Bazhenov S.L., Volynskii A.L., Alexandrov V.M., Bakeev N.F. // J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys. 2002. V.40. P.10–18.
10. Handbook of Chemistry and Physics / Ed. Ch.D.Hodgman. N.Y., 1955. Part 2.
11. Arzt E. // Acta mater. 1998. V.46. №16. P.5611–5626.
12. Короновский Н.В. Общая геология. М., 2002.
13. Heezen B.C., Tharp M. World Ocean Floor. N.Y., 1977.
14. Volynskii A.L., Bazhenov S.L. // Geofisica International. 2001. V.40. №2. P.87–95.
15. Ломизе М.Г. Тектоника литосферных плит // Энциклопедия «Современное естествознание». Т.9. М., 2000. С.103–112.
16. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Е.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., 1974.

Гидрография

Гидрофизические съемки в Канадской Арктике

По заказам нефтяных компаний Канады гидрограф Дж.Уильямс (J.Williams) третий сезон ведет топографические и гидрографические съемки в Канадской Арктике. Его партия из семи человек, включая опыт-

ного охотника-иннуита, устроила базовый лагерь в тундре, в дельте р.Маккензи, впадающей в море Бофорта. Для производства гидрографических работ Уильямс использовал новейшую эхолокационную систему промеров дна: на катере смонтирована 15-метровая выносная стрела с шестью датчиками-излучателями акустических сигналов. Такая система

позволяет измерять глубины в диапазоне от пяти до менее одного метра, которые преобладают в дельте р.Маккензи и до сих пор не были картированы. На подручных плавсредствах, включая водный мотоцикл (jet-ski), устанавливался однолучевой эхолот, что значительно ускорило и расширило площадь съемок. Проведению гидрографических работ, однако,

Канадская