

Новые идеи и гипотезы

УДК 539.37/38:541.6+551.25

Новый подход к оценке механических свойств твердых тел экстремально малых и экстремально больших размеров

А. Л. Волынский, Л. М. Ярышева, С. В. Моисеева, С. Л. Баженов, Н. Ф. Бакеев

АЛЕКСАНДР ЛЬВОВИЧ ВОЛЫНСКИЙ — доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: структура и механика полимеров. volynskii@mail.ru

ЛАРИСА МИХАЙЛОВНА ЯРЫШЕВА — кандидат химических наук, старший научный сотрудник Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: механизм деформации полимеров, мембраны, металлополимеры, полимерные смеси. yarysh@mail.ru

СВЕТЛАНА ВЛАДИМИРОВНА МОИСЕЕВА — аспирант Химического факультета Московского педагогического государственного университета. Область научных интересов: структура и механика полимеров с покрытиями. milight@yandex.ru

СЕРГЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ БАЖЕНОВ — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН. Область научных интересов: структура и механика полимерных композиционных материалов. bazhenov@ispm.ru

НИКОЛАЙ ФИЛИППОВИЧ БАКЕЕВ — доктор химических наук, профессор, академик РАН, советник РАН. Область научных интересов: структура и физико-химические свойства полимеров и многофазных полимерных систем. bakeev@ispm.ru

119992 Москва, Ленинские горы, Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, тел. (495)939-55-76.

Получение объективной информации о процессах деформации и разрушения твердых тел имеет важное как фундаментальное, так и прикладное значение, поскольку такая информация необходима, в частности, для современного материаловедения. В мировой практике для оценки механических характеристик материалов применяется ряд методов, использующих набор разного рода стандартов. Как правило, это методы испытаний деформационно-прочностных характеристик твердых тел, применимость которых определяется геометрическими размерами испытываемых образцов — для удобства испытаний размеры должны быть не менее нескольких сантиметров [1].

Как известно, многие свойства твердых тел (электропроводность, теплота и температура плавления и др.) зависят от их размеров (так называемый размерный эффект). Речь идет не об изменении размеров в несколько раз, а о принципиальном изменении масштабов твердых тел. Как показано в [2, 3], переход от микро- к наноразмерам приводит к качественным изменениям физических, механических, физико-химических и других свойств вещества. Несмотря на исключительную важность сведений о свойствах вещества в наносостоянии, проблема их оценки пока

далека от своего решения. В частности, практически отсутствуют достоверные сведения о деформационно-прочностных свойствах твердого тела, имеющего размер единицы—десятки нанометров, что объясняется в первую очередь экспериментальными трудностями. В этой связи несомненную актуальность приобретает развитие новых методов исследования, способных дать достоверную информацию о фундаментальных свойствах нановещества. Стандартный подход к оценке механических свойств твердых тел (изготовление образца, помещение его в зажимы деформирующего устройства, регистрация напряжений и деформаций) оказывается в данном случае совершенно неэффективным. Действительно, трудно себе представить, каким образом можно изготовить образец толщиной в 10 нм, поместить его в некое устройство, подвергнуть деформации и измерить соответствующее напряжение.

Для практической оценки механических свойств твердых тел экстремальных размеров мы предлагаем новый подход, основанный на обнаруженных ранее фундаментальных деформационно-прочностных свойствах так называемых систем «твердое покрытие на податливом основании» [4, 5]. Такие системы подробно экспериментально и теоретически исследованы на

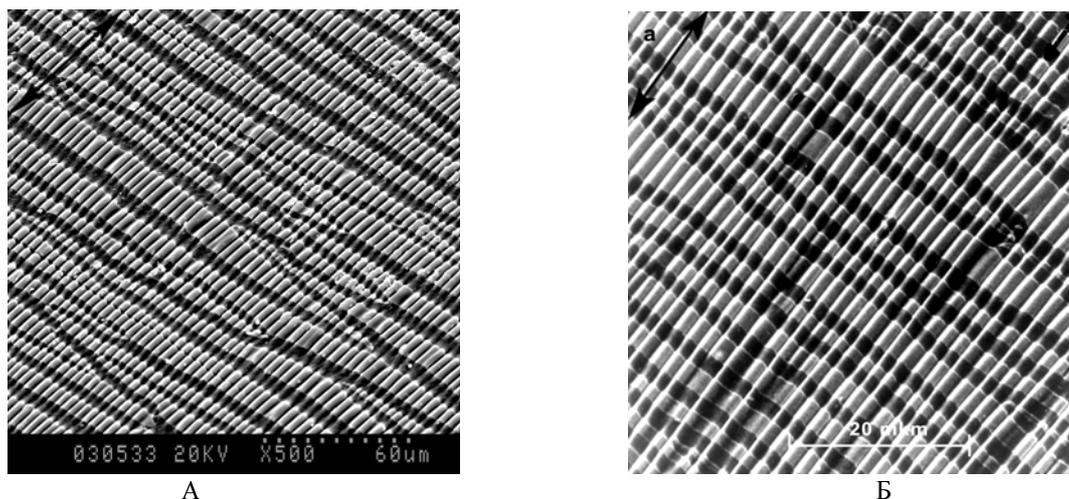


Рис. 1. Электронные микрофотографии образцов поливинилхлорида (А), полиэтилентерефталата (Б) с тонким (21 нм) платиновым покрытием после их растяжения.

Двукратное растяжение образцов со скоростью 1 мм/мин при 90 °С. Светлые полосы — фрагменты разрушившегося покрытия, темные — трещины в разрушившемся покрытии

примере полимерных пленок, на поверхность которых наносили тонкое металлическое покрытие (толщина единицы—десятки нанометров) [6—9]. В работах [6—9] описан и объяснен целый ряд неизвестных ранее физических явлений общего характера.

На рис. 1 представлены электронные микрофотографии рельефа поверхности полимерных пленок с тонким твердым покрытием после их двукратного растяжения. Из рис. 1 следует, что простое растяжение столь распространенных и, казалось бы, хорошо изученных объектов имеет удивительные последствия. Покрытие распадается на множество регулярно расположенных островков примерно одинакового размера с формированием регулярного рельефа. Поражает регулярность самопроизвольно возникающего рельефа и строгая ориентация его элементов относительно оси растяжения. Углубления и вершины всегда ориентированы строго вдоль (параллельно) оси растяжения. При фрагментации покрытия также достигается высокая степень порядка. Таким образом, при растяжении полимерной пленки с тонким твердым покрытием образуются высокоорганизованные периодические структуры. Важно отметить, что полимеры являются твердыми телами, которые, подобно жидкостям, при деформации стремятся сохранить постоянным свой объем. Это означает, что одноосное растяжение в одном направлении сопровождается соответствующим сжатием (контракцией) в направлении, нормальном действующей растягивающей силе. Другими словами, полимерная пленка испытывает два вида деформации одновременно: растяжение и в нормальном к нему направлении сжатие. Очевидно, что и нанесенное на поверхность пленки покрытие также будет испытывать оба вида напряжений. В работах [6—9] показано, что именно сжатие ответственно за возникновение регулярного рельефа, а растяжение вызывает его разрушение (регулярную фрагментацию).

Последующие исследования показали, что возникновение указанных структур имеет общий характер и не зависит от природы материала подложки и покры-

тия. Необходимыми условиями, определяющими саму возможность возникновения регулярных структур в результате их деформации, являются пренебрежимо малая толщина покрытия по сравнению с толщиной подложки и значительное различие в модулях упругости (жесткости) покрытия и подложки. Материал покрытия должен иметь модуль упругости существенно больший, чем материал подложки [6—9].

В плане практической реализации предлагаемого подхода к исследованию механических свойств важным является установление взаимосвязи между непосредственно наблюдаемыми характеристическими параметрами процесса фрагментации покрытия при деформировании полимера-подложки и свойствами материала покрытия и подложки. В частности, показано, что средний размер L фрагмента разрушения в направлении оси растяжения равен:

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

где h — толщина покрытия; σ^* — предел прочности покрытия; σ_0 — напряжение в подложке.

Из входящих в соотношение (1) величин толщина h известна, σ_0 определяется экспериментально, а L измеряется по микрофотографии. Таким образом, соотношение (1) дает возможность легко находить важнейшую характеристику твердого тела — прочность в слоях практически любой толщины.

На рис. 2 представлены вычисленные с помощью соотношения (1) зависимости прочности слоев платины и золота, нанесенных на полиэтилентерефталатную пленку, от толщины слоя. Из рисунка следует, что прочность слоев обоих металлов практически не зависит от их толщины в интервале от 30 до ~15 нм. Прочность слоев обоих металлов в этом интервале толщин колеблется от 18 до 22 кг/мм² для золота и 25—30 кг/мм² для платины. Эти значения соответствуют известным значениям прочности для блочных металлов (17,6—25 кг/мм² для золота и 24—35,1 кг/мм² для платины [10]). В то же время из рис. 2

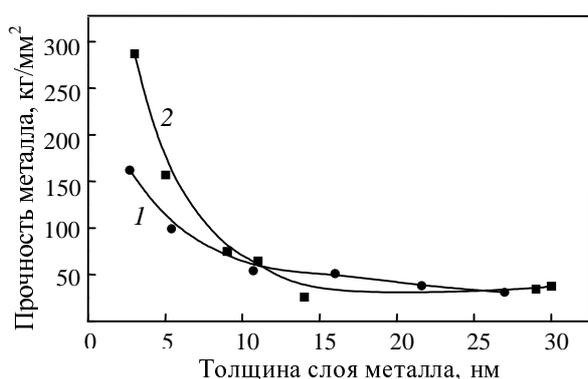


Рис. 2. Зависимости прочности металлического слоя платины (1) и золота (2), нанесенного на пленку из полиэтилентерефталата, от толщины слоя.

Расчет по соотношению (1)

следует, что, начиная с толщины ~15 нм, прочность слоев обоих металлов начинает стремительно увеличиваться с уменьшением толщины нанесенного покрытия. При этом прочность для платины достигает 150–170 кг/мм², для золота — до 280 кг/мм². Как видно, прочность металла в нанослоях по крайней мере на порядок превосходит прочность блочного материала. Причины обнаруженного эффекта еще не вполне ясны, но исходя из зависимостей, представленных на рис. 2, можно заключить, что существуют реальные возможности метода изучения механических свойств твердых тел в предельно тонких слоях.

Полученный результат является первой количественной оценкой прочности металлов в столь тонких слоях. Он свидетельствует, во-первых, о том, что свойства (в данном случае такое фундаментальное свойство как прочность) вещества в нанослоях действительно на качественном уровне отличаются от свойств блочного материала. Во-вторых, результат показывает, что использованный подход к оценке прочностных свойств материала на наноуровне является эффективным и универсальным.

Данный подход не исчерпывает свои возможности

оценкой прочности твердого тела в предельно тонких слоях. Действительно, формула (1) связывает наблюдаемые параметры рельефа и свойства материала покрытия и подложки, но в этой формуле нет никаких указаний на масштаб (размеры) твердого тела, для которого проводится оценка прочностных свойств.

Рассмотрим еще один пример практического приложения предлагаемого подхода к исследованию деформационно-прочностных свойств твердых тел.

Напомним, что общими условиями поверхностного структурообразования при деформировании систем, представляющих собой подложку с тонким твердым покрытием, являются пренебрежимо малая толщина покрытия по сравнению с толщиной подложки и значительное различие в модулях упругости покрытия и подложки. Эти условия реализуются в многочисленных системах «твердое покрытие на податливом основании», которые имеются в окружающем нас мире. К таким системам относятся плоды растений, тела животных и даже планета Земля, которая является типичной системой «твердая оболочка на мягком основании». Действительно, согласно современным представлениям, относительно тонкая (5–50 км) твердая наружная оболочка Земли (литосфера) покоится на относительно податливой и толстой (2900 км) оболочке — верхней мантии (полная аналогия с полимерными пленками, имеющими тонкое покрытие). Вязкое, текучее вещество мантии Земли находится в состоянии неустойчивости и непрерывно перемещается за счет теплового градиента [11]. В свою очередь это движение вещества мантии (конвекция) генерирует в земной коре механическое напряжение, которое ответственно за различные геодинамические процессы, происходящие на Земле (дрейф континентов, извержения вулканов, землетрясения и процессы рельефообразования). Как видно, с точки зрения строения имеет место полная аналогия между такими объектами, как пленка с твердым покрытием и верхняя оболочка Земли.

Сравним рельеф полимерных пленок с тонким покрытием, подвергнутых одноосной деформации, с реально существующим рельефом океанического дна. На рис. 3А представлена электронная микрофотогра-

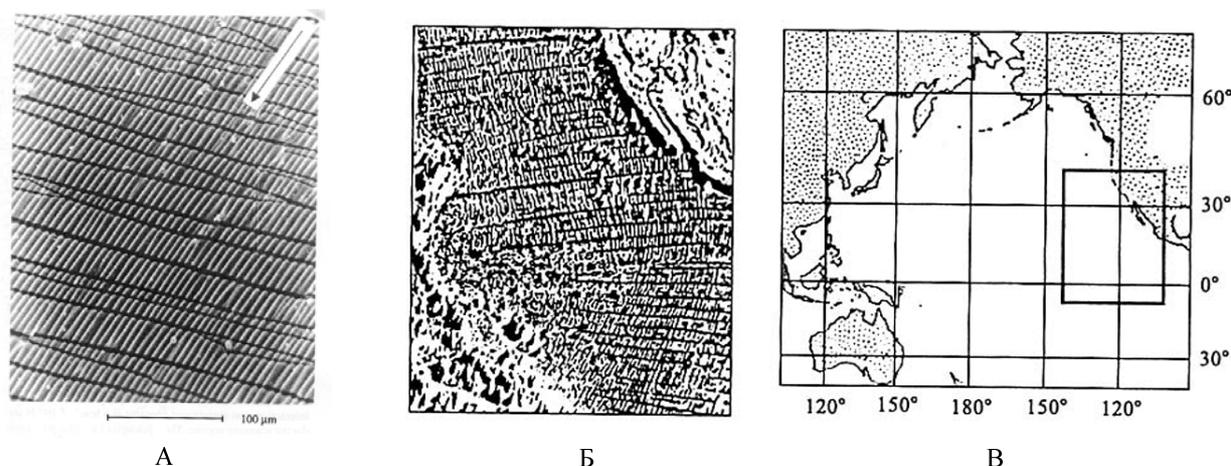


Рис. 3. Электронная микрофотография образца натурального каучука с тонким (10 нм) золотым покрытием, растянутого на 50% (А); карта рельефа дна Тихого океана в районе Восточно-Тихоокеанского поднятия (Б) и его положение на карте Тихого океана (В) (выделено рамкой)

фия поверхности каучуковой пленки с тонким (10 нм) золотым покрытием, растянутой на 50%, а на рис. 3Б, В — карта рельефа участка океанического дна в районе Восточно-Тихоокеанского поднятия [12]. Такого рода рельеф характерен для поверхности океанического дна, измеряемого многими тысячами километров (не менее трети площади всего океанического дна). Примечательно, что рельеф океанического дна поразительно похож на рельеф, получаемый при растяжении полимерных пленок с твердым покрытием. Действительно, океаническая кора демонстрирует регулярный складчатый рельеф и множественное расстрескивание с образованием системы параллельных трещин — трансформных разломов. Даже визуальное сравнение рельефов на рис. 3А и 3Б свидетельствует в пользу справедливости предположений об общности механизмов явлений, происходящих в системах «твердое покрытие на податливом основании» самого различного масштаба.

Если аналогия между рассматриваемыми объектами верна, то уже простое наблюдение рельефа поверхности дает очень важную информацию о направлении сжимающих и растягивающих напряжений, действующих в земной коре. Прямо наблюдаемые картины рельефа океанического дна подтверждают сделанные ранее на основании косвенных данных выводы о том, что земная кора является самостоятельным физическим объектом, хотя и немалых размеров, но единым твердым телом, покоящимся на относительно мягкой подстилке. Это тело имеет сферическую форму, непостоянный химический состав, градиент температуры, дефектность и множество других осложняющих факторов. Рассмотрение земной коры как единого твердого тела, способного воспринимать и передавать механические напряжения на огромные расстояния (в рамках океанического пространства, а может быть и в глобальном масштабе) [11], позволяет использовать развитый нами подход для оценки важнейших механических характеристик земной коры как единого твердого тела. 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 оценить указанные характеристики земной коры как единого твердого тела каким-либо другим способом в принципе нереально.

Прежде чем показать возможность использования развиваемого подхода для оценки механических свойств земной коры в целом, вспомним основополагающие представления о тектонических процессах, имеющих место в земной коре и примыкающих к ней оболочках. Согласно современным представлениям [13], около 200 миллионов лет назад существовавший тогда единый и единственный праматерик по неизвестным причинам раскололся на несколько частей, которые начали свой дрейф, продолжаясь и по настоящее время. Благодаря этому дрейфу возникли все современные материки и океаны. Механизм этого дрейфа заключается в следующем. Известно, что на дне океана существует в настоящее время система гигантских трещин — срединно-океанических хребтов (СОХ), опоясывающих весь земной шар. Вещество мантии Земли поступает через эти трещины, раздвигая их края, в результате чего происходит расширение (спрединг) океанического дна. Вследствие этого расширения материки «едут» на океанической коре как на эскалаторе, постепенно удаляясь друг от друга (или сближаясь).

Механизм дрейфа материков сформулирован в теории литосферных плит [14]. Литосферными плитами называют участки земной коры, которые перемещаются по поверхности Земли как единое целое. Например, Американская плита состоит из Американского континента вместе с примыкающим к ней участком океанической коры, простирающимся вплоть до Срединно-Атлантического хребта. Эта плита соседствует с Африканской плитой, включающей Африканский континент и примыкающий к ней участок океанической коры, также простирающийся до Срединно-Атлантического хребта. Схематически тектоническая картина Атлантического океана, согласно теории литосферных плит, представлена на рис. 4. Вещество мантии Земли, вытекающее через трещины СОХ,

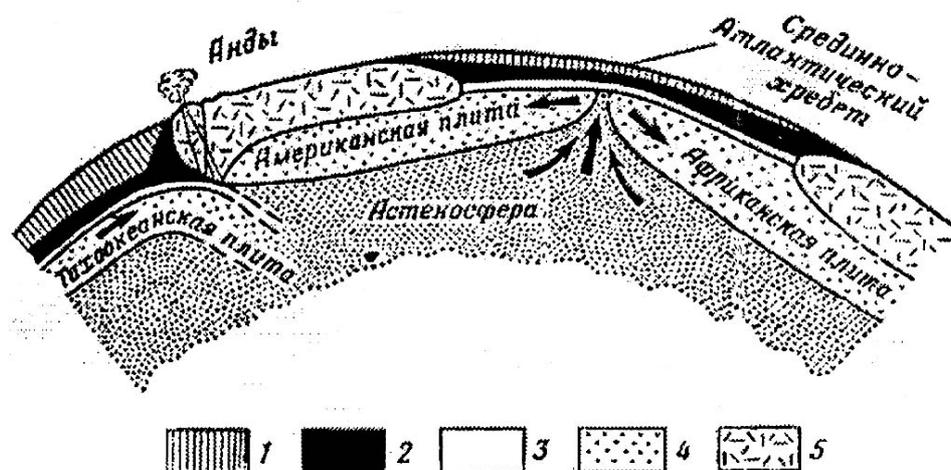


Рис. 4. Геодинамическая обстановка в районе Срединно-Атлантического хребта с позиции тектоники литосферных плит [11]:

1 — вода, 2–5 — литосфера (2 — осадки, 3 — базальтовая океаническая кора, 4 — верхняя мантия, 5 — континентальная кора)

отодвигает Африканскую плиту от Американской со скоростью нескольких сантиметров в год. Очевидно, что со стороны СОХ на литосферные плиты действует сила, ответственная за дрейф (взаимное удаление) материков. Расширение дна Атлантического океана должно компенсироваться убылью площади океанического дна в другом месте, поскольку размеры Земли остаются неизменными. Такая убыль действительно происходит путем пододвигания Тихоокеанской плиты под Американский континент (так называемый процесс субдукции) [14]. Очевидно, что встречное движение Тихоокеанской и Американской плит приводит к их взаимному сжатию. В рамках гипотезы, что одноосное сжатие системы «твердое покрытие на податливом основании» приводит к возникновению складчатости в покрытии, а растяжение — к его множественной фрагментации и что одноосное сжатие покрытия на податливом основании генерирует в нем нормально направленное растягивающее напряжение [6–9], можно утверждать, что океаническая кора в Атлантике оказывается сжатой в направлении, нормальном к оси СОХ и соответственно растянутой вдоль СОХ.

Рассмотрим карту рельефа дна Атлантического океана в центральной его части (рис. 5) [12]. В полном соответствии с развитыми выше представлениями наблюдается складчатость океанической коры, направленная вдоль СОХ, и ее множественное растрескивание в направлении, нормальном оси СОХ.

Используя современные представления о рельефе дна Атлантического океана, применим развитые в [15] подходы для моделирования процесса рельефообразования океанического дна. На рис. 5 видно, что практически точно посередине океана (на равном расстоянии от Африки и Америки) находится СОХ. Несмотря

на то, что СОХ изгибается, в точности повторяя контуры окружающих его материков, трансформные разломы пересекают его почти точно в направлении, нормальном направлению его оси. Более того, эти разломы расположены весьма регулярно, в полном соответствии с поведением систем «твердое покрытие на податливом основании». Попробуем смоделировать и проанализировать физические причины, создающие условия для возникновения системы параллельных трещин (трансформных разломов) в земной коре. Отметим, что в настоящее время нет адекватных объяснений отчетливо видимой на карте (см. рис. 3 и 5) взаимосвязи между ориентацией трансформных разломов и осью СОХ.

Принятая модель предполагает существование растягивающих напряжений, действующих именно параллельно оси СОХ. Это обстоятельство качественно позволяет понять, почему трансформные разломы всегда перпендикулярны оси расширения (СОХ). Дело в том, что трещина разрушения всегда растет в направлении, перпендикулярном оси разрывного (растягивающего) напряжения. Проведем оценку деформационно-прочностных свойств океанической коры с использованием уравнения (1), записанного в геодинамических терминах:

$$L = 4h(\sigma^*/\sigma_0) \quad (1a)$$

где L — среднее расстояние между трансформными разломами; h — толщина океанической коры; σ^* — разрывная прочность океанической коры; σ_0 — рельефообразующее напряжение.

Расстояние L между трансформными разломами можно непосредственно измерить по карте океанического дна. Для практического использования уравне-

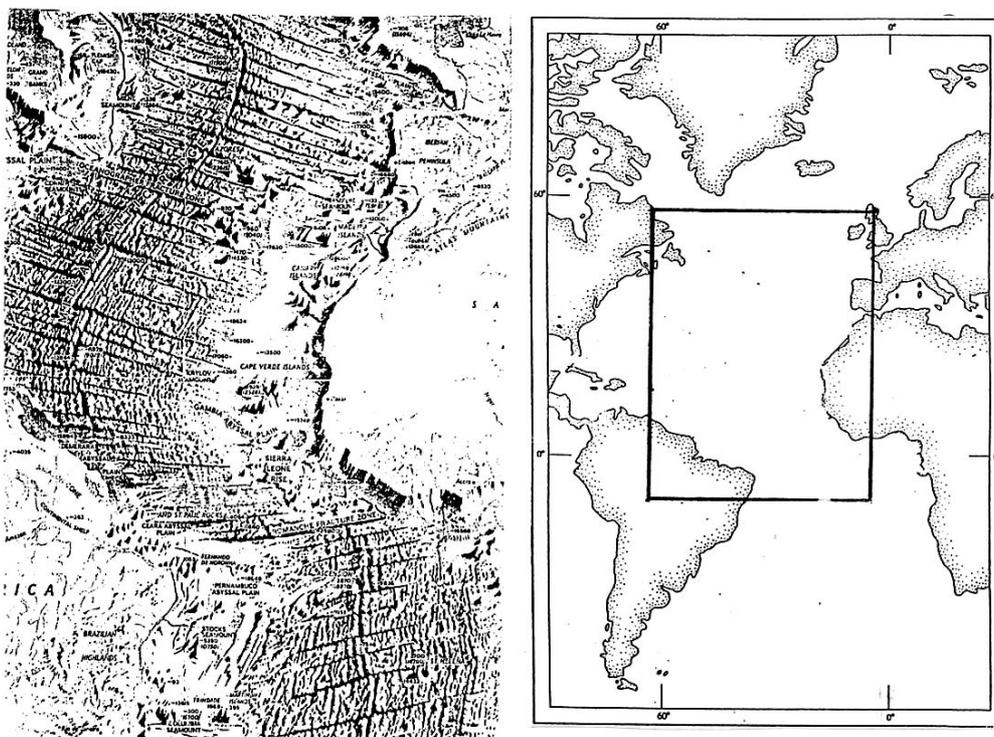


Рис. 5. Карта рельефа дна и его расположение на карте Атлантического океана (выделено рамкой)

ния (1а) необходимо знать рельефообразующее напряжение σ_0 в подкоровом слое верхней мантии Земли.

Общепринято, что движущей силой дрейфа континентов является вязкое конвективное течение вещества верхней мантии Земли. Для описания процесса вязкого течения воспользуемся универсальным законом Ньютона, позволяющим рассчитать напряжение, поддерживающее течение жидкости (это и есть напряжение в вязком веществе мантии σ_0):

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

где η — вязкость; $d\epsilon/dt$ — скорость деформации.

Оценим напряжение σ_0 , считая вязкость вещества мантии Земли, прилегающей к литосферной плите, равной $\eta = 10^{21}$ Па·с [11]. Очевидно, что скорость дрейфа континентов соответствует скорости вязкого перемещения вещества мантии Земли, примыкающего к литосфере. В таком случае скорость течения вещества верхней мантии будет равна надежно определяемой сегодня скорости дрейфа материков, равной 10 см/год. Эта скорость, т.е. скорость деформации в уравнении (2), определяется соотношением:

$$d\epsilon/dt = (\Delta l/l_0)/\Delta t$$

где l_0 — начальное расстояние между материками, которое примем равным 5000 км; Δl — смещение материка через год (10 см) за время Δt (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.

Столь малое напряжение (~0,6 МПа) достаточно сложно определить экспериментально в реальной океанической коре. Обычно экспериментально оценивают напряжение в океанической коре в местах его концентрации, например в местах изгиба океанической коры — в зонах субдукции [16]. Однако первопричиной достаточно высоких локальных напряжений вполне может служить определенное с помощью уравнения (2) очень малое, реликтовое, фоновое напряжение, действующее в течение очень длительного времени, возможно, на протяжении всего периода спрединга.

Полученное значение σ_0 позволяет использовать уравнение (1а) для оценки прочности земной океанической коры, если рассматривать ее как единое твердое тело. Примем значение толщины земной коры в окрестности СОХ $h = 10$ км [11], среднее расстояние между трансформными разломами $L = 200$ км (измеряется по карте, см. рис. 5) и тектоническое напряжение $\sigma_0 \approx 0,6$ МПа. Подставив значения этих величин в уравнение (1а), получим, 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.

Обращаем внимание, что используемый нами подход дает неожиданно очень высокую оценку прочности твердых тел в очень тонких (нанометрических) слоях, в то время как прочность твердого тела огромных размеров оказывается неожиданно очень низкой. Возникает вопрос: может ли земная океаническая кора иметь столь малую прочность?

Прежде всего, отметим, что прочность твердых тел не является их константой, как, например, температура плавления или удельная теплоемкость. Современные представления о прочности твердых тел позволяют рассматривать разрушение как некий термофлуктуационный процесс, для которого решающее значение имеет тепловое колебательное движение молекул. Трудно себе представить, что такие грандиозные природные явления как откалывание гигантского айсберга от края ледника или возникновение тысячекилометровой трещины в земной коре происходят путем последовательного разрыва межатомных и (или) межмолекулярных связей. Но, тем не менее, это именно так. Напомним, что размеры атомов или молекул в твердых телах составляют примерно 10^{-8} — 10^{-7} см и, следовательно, связи между ними действуют на расстояниях примерно такого же порядка. Именно процессы, происходящие на молекулярном уровне, приводят к отмеченным выше масштабным природным явлениям.

Рассмотрение процесса разрушения твердых тел на молекулярном уровне позволяет подойти к оценке их прочности. Итак, процесс разрушения твердого тела — это последовательный разрыв химических связей, происходящий наиболее интенсивно в вершине растущей трещины. В свою очередь разрыв химической связи обусловлен тепловыми флуктуациями, имеющими место в любом реальном твердом теле. Механическое напряжение всего лишь увеличивает вероятность развития такой флуктуации, которая приводит к разрыву химической связи в твердом теле. Поскольку вероятность возникновения той или иной флуктуации всегда есть функция времени, процесс разрушения в целом также становится функцией времени. Соответственно, как результат, прочность твердого тела является функцией времени действия механической нагрузки [17].

На рис. 6 представлена зависимость разрушающего напряжения от времени действия нагрузки для трех материалов различной природы: каменной соли (I), поликристаллического алюминия (II) и нейлона-6 (III) [17]. Хорошо видно, что прочность твердого тела, независимо от его химической природы, действительно не является константой материала, а сильнейшим образом зависит от времени действия нагрузки, ее величины и температуры.

Термофлуктуационный процесс разрушения твердого тела может быть охарактеризован с помощью уравнения Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/RT] \quad (4)$$

где τ — время до разрушения; τ_0 — величина, имеющая смысл частоты тепловых колебаний индивидуальных атомов в твердом теле относительно их положений равновесия; U_0 — энергия активации процесса разрушения (разрыва химической связи в твердом теле); γ — активационный объем, который имеет смысл объема, в котором разыгрывается элементарный акт процесса разрушения (разрыва связей); σ — действующее постоянное напряжение; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Экспериментальные данные, представленные на рис. 6, в полной мере описываются уравнением Журкова и позволяют определить все его параметры.

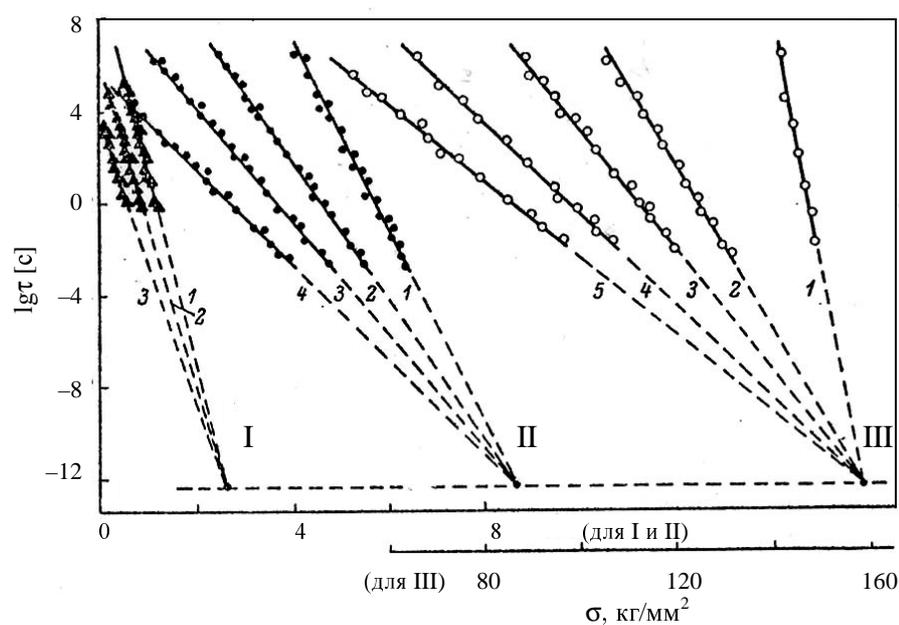


Рис. 6. Зависимость долговечности материалов от напряжения при различных температурах [17]:

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

Предлагаемый подход к оценке процесса разрушения имеет два важных аспекта. Во-первых, возникает уникальная возможность оценить деформационно-прочностные свойства такого грандиозного тела, каким является земная кора. Во-вторых, появляется возможность рассчитать прочность тела для условия длительного воздействия нагрузки. До сих пор удавалось экспериментально оценивать прочность твердых тел в условиях действия постоянной нагрузки в течение относительно малых времен ее воздействия, измеряемых часами, сутками. В случае океанической коры имеет место случай, когда нахождение твердого тела под нагрузкой измеряется миллионами лет.

Главной проблемой является определение параметров уравнения Журкова для столь сложного и грандиозного тела, каким является океаническая кора. Экспериментально определенные параметры уравнения Журкова для твердых тел различной природы (см. таблицу) показывают, что параметр τ_0 мало изменяется для твердых тел. Это не удивительно, так как частота тепловых колебаний молекул в твердых телах не

должна существенно зависеть от их природы. Определяющим для процесса разрушения является параметр U_0 , который по экспериментальным оценкам составляет несколько десятков ккал/моль, что соответствует энергии разрыва различных межмолекулярных связей.

Конечно, определение параметров уравнения Журкова для такого грандиозного тела, как земная кора, сегодня — нерешенная задача. Действительно, земная кора имеет градиент температуры, градиент давления, градиент химического состава и множество других осложняющих особенностей. Однако, если этот объект рассматривать как единое твердое тело, которое в определенных условиях может претерпевать механическое разрушение, в основе которого лежит разрыв химических связей, то в этом случае к процессу разрушения земной коры можно применить существующие сегодня представления о процессе разрушения твердого тела на молекулярном уровне. Поскольку еще не очень

ясен физический смысл рассматриваемых параметров применительно к такому сложному объекту, каким является земная кора, воспользуемся некими средними значениями параметров в уравнении Журкова.

Для грубой оценки долговечности (долговременной прочности) земной коры примем для простоты среднее значение $\tau_0 = 10^{-12}$ с, $U_0 = 50$ ккал/моль, $\gamma = 1,0$ ккал · мм²/(моль · кг), $R = 0,002$ ккал/(моль · К), $T = 400$ К и определенное нами с помощью уравнения (1) значение разрушающего напряжения $\sigma = 0,2$ кг/мм². После подстановки в уравнение (4) всех этих значений получаем, что время до разрушения земной коры при столь малом напряжении составит примерно $\sim 3 \cdot 10^7$ (тридцать миллионов) лет. Как видно, даже при столь упрощенной оценке мы впервые получаем вполне геологические времена для возраста таких важнейших морфологических форм земной коры, какими являются трансформные разломы. Отметим, что если для определения возраста горных пород существуют надежные методики [11], то для оценки возраста тех или иных морфологических форм

Таблица

Параметры уравнения Журкова по данным, приведенным в [17]

	τ_0 , с	U_0 , ккал/моль	γ , ккал · мм ² /(моль · кг)
Металлы	$10^{-12} - 10^{-13}$	25—170	0,7—9,6
Кристаллы ионные	$10^{-12} - 10^{-13}$	31—74	14—60
Ковалентные связи	$10^{-12} - 10^{-13}$	91—113	—
Стекла	$10^{-12} - 10^{-13}$	45—90	—
Полимеры	$10^{-12} - 10^{-13}$	25—53	0,14—09

на земной поверхности универсальной методики нет и приведенная оценка является не только первой, но и пока единственной.

Это, конечно, очень грубая оценка. Для получения более точной информации с использованием данного подхода необходимо учитывать конкретные данные о толщине коры, ее температуре и многие другие факторы. Цель данной оценки — продемонстрировать возможности рассматриваемого подхода для моделирования геодинамических процессов.

Подытоживая изложенное выше, можно заключить, что развитый в работах [6—9] подход является универсальным и позволяет моделировать и оценивать деформационно-прочностные свойства твердых тел независимо от их размеров в тех случаях, когда их экспериментальное осуществление крайне затруднено или практически не реально.

Авторы выражают искреннюю признательность академику РАН В.Е. Хаину, профессорам Н.В. Короновскому и М.А. Гончарову, а также А.В. Ефимову за плодотворные дискуссии.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 05-03-32538 и 06-03-32452).

ЛИТЕРАТУРА

1. Берестнев В.А. Ж. Всес. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева, 1961, т. 6, № 4, с. 86.
2. Сергеев Г.Б. Нанохимия. М.: Изд. МГУ, 2003, с. 287.
3. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000, с. 672.
4. Вольнский А.Л. Природа, 2005, № 5, с. 67—72.
5. Вольнский А.Л., Бакеев Н.Ф. Структурная самоорганизация аморфных полимеров. М.: Физматлит, 2005.
6. Вольнский А.Л., Баженов С.Л., Бакеев Н.Ф. Рос. хим. ж. (Ж. рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 1998, т. 42, № 3, с. 57.
7. Volynskii A.L., Bazhenov S.L., Lebedeva O.V., Bakeev N.F. J. Mater. Sci., 2000, v. 35, p. 547.
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.
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.
10. Handbook of Chemistry and Physics. Editor in chief Charles D. Hodgman, M.S. 1955, p. 1982.
11. Короновский Н.В. Общая геология. М.: Изд-во МГУ, 2002.
12. Heezen B.C., Sharp M. World Ocean Floor. US Navy, Office Naval Research, 1977.
13. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. М.: Недра, 1979, 311 с.
14. Ломизе М.Г. Энциклопедия «Современное естествознание». М.: Магистр-пресс, 2000, т. 9, с. 103.
15. Volynskii, A.L., Bazhenov S.L. Geofisica International, 2001, v. 40, № 2, p. 87—95.
16. Zoback M.L., Zoback M.D., Adams J. e. a. Nature, 1989, v. 341, p. 291.
17. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Е.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974.