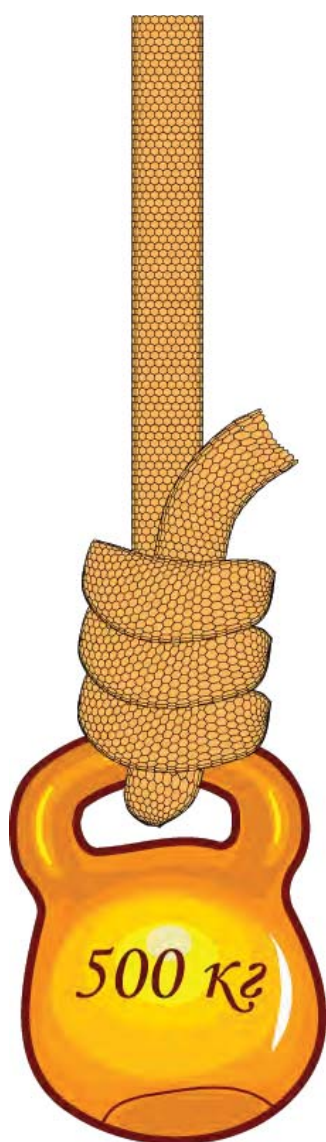


ЗАКОН ХОЛЛА–ПЕТЧА. НАНОМЕХАНИКА (*Nanomechanics*)

«Где тонко, там и рвется».

Поговорка



Легко ли сломать или разорвать стальной стержень? Если взять калькулятор и посчитать теоретическую прочность материала на разрыв, приняв в расчет энергию его химических связей, вы получите значения, намного превосходящие действительную прочность изделий. Так что же на самом деле происходит при приложении нагрузки, и почему так сильно различаются экспериментальные и теоретически рассчитанные значения прочности? Оказывается, при механическом напряжении материалы ведут себя согласно поговорке «где тонко, там и рвется», и в данном случае «тонким звеном» оказываются места локализации дефектов, т.е. те области,

где нарушается непрерывная структура материала. Сравните, например, усилия, которые нужно приложить для того, чтобы сломать плитку обычного или пористого шоколада, свежесрубленную или сухую палку, обожженный или сырой кир-

пич. Именно благодаря дефектам мы можем разломить стекло по линии, проведенной стеклорезом, или открыть пакетик с соком или молоком по предварительно нанесенной перфорации.

Но что же происходит с материалом при переходе от объемного состояния к наноструктурированному? Что будет, если постепенно уменьшать толщину стержня, станет ли он еще более хрупким? Именно такой вопрос задал себе в 1920 г. сотрудник Авиационного исследовательского центра в Фарнборо А.А. Гриффитс и нашел на него ответ, проведя эксперименты со стеклянными стержнями и обнаружив неочевидную с первого взгляда закономерность: при уменьшении диаметра стержня его механическая прочность возрастала, причем значительно. Такое изменение прочности в зависимости от диаметра стержня связано с тем, что при уменьшении толщины дефекты структуры все легче и легче выходят на поверхность, приводя к образованию практически идеальной решетки. Все более и более прочность материала приближается к теоретической. Рекордсменами среди макроскопических объектов являются нитевидные кристаллы, их прочность в десятки раз превышает прочность и гибкость объемного материала. Пробовали ли Вы сплющить бабушкин бриллиант? И не пробуйте, в лучшем случае получите алмазный порошок! А вот алмазные «усы», выращенные в особых условиях, можно практически завязать в узел. При этом и в том, и в другом случае речь идет об одном и том же структурном состоянии углерода – алмазе. Получается, что «усы», а не крупные бриллианты, – самые совершенные из кристаллов!

Большинство наноструктур также практически не содержит дефектов, а для отдельных углеродных нанотрубок предел прочности на разрыв превышает 60 ГПа. Аналогичным образом было обнаружено, что прочность слоистых структур зависит от толщины отдельных слоев, а прочность некоторых объемных материалов – от размера образующих их зерен. Математически эта закономерность выражается в виде формулы, получившей название закона Холла–Петча, согласно которой твердость материала H возрастает при уменьшении размеров частиц по формуле

$$H(D) = H_0 + \frac{k}{\sqrt{D}}$$

в которой D – размер зерна, H_0 – твердость тела зерна, k – коэффициент пропорциональности.

Однако не стоит думать, что безграничное уменьшение толщины стержня или размера зерен материала приведет к закономерному улучшению его механических свойств и достижению значительной теоретической прочности. На самом же деле практически любой материал состоит из зерен, границы которых сами являются дефектами, по которым может происходить разрыв. Чем меньше размер зерен, тем меньше силы трения между ними и тем проще деформировать материал. В частности, при определенных размерах зерен (< 50 нм) керамика может переходить из прочного состояния в сверхпластичное, когда даже при небольшом нагреве и малых нагрузках можно деформировать (прессовать или вытягивать) материал без разрушения. Этот переход объясняется сменой механизма деформации – уже не происходит деформации зерен при нагрузке, а они начинают скользить вдоль межзеренных границ (зернограничное проскальзывание). Разумеется,

это расширяет технологические возможности. Так можно получить керамику с наноразмерными зёрнами, прессованием или формованием задать форму детали (обычная керамика может быть прочной, но хрупкой и разрушится даже при малых деформациях), а потом отжигом увеличить размер зерен, придав материалу хорошие прочностные характеристики.

Уникальных прочностных характеристик можно достичь переходом от однородного объемного материала к анизотропным наноструктурам, размер которых по одному или двум направлениям лежит в нанодиапазоне, что дает возможность выхода дефектов на поверхность, сохраняя структуру и прочность монокристалла по другим направлениям. Примером таких нанообъектов являются *вискеры, нанонити и углеродные нанотрубки*. В связи с практически идеальной структурой и отсутствием дефектов, прочность нанотрубок близка к теоретической. Нанотрубку сложно разорвать как растягиваем, так и изгибом – при своей прочности они не являются хрупким материалом и могут быть согнуты более чем на 90° без излома.

Практическое использование уникальных механических свойств наноматериалов зачастую ограничивается их высокой стоимостью. Однако вовсе не обязательно изготавливать всю деталь из наночастиц – достаточно армировать удобный в применении материал прочными нановолокнами и нанотрубками, подобно тому, как, применяя стальные прутья – арматуру, увеличивают прочностные характеристики бетона (см. *Нанокompозиты*). Сегодня в продаже уже появились первые продукты нанотехнологической эры – компании Easton Sports и Babolat выпустили бейсбольные биты и теннисные ракетки, армированные углеродными нанотрубками.

Литература:

1. Poole Ch.P., Owens F.J. Introduction in nanotechnology. John Wiley & Sons, Lnc 2003.