

## ПРОЧНОСТЬ И УСТАЛОСТЬ ПРИРОДНЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ.

*Ал. Ал. Берлин*

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук*

Прочность - величина, характеризующая способность материала или конструкции сопротивляться разрушению под действием внешней нагрузки (внешних сил).

Есть как минимум две проблемы, которые усложняют однозначную интерпретацию этого определения, особенно для композиционных материалов [1]. Во-первых, множество и конкуренция различных механизмов разрушения. Во-вторых, вариация внешней нагрузки. Несколько конкретных примеров. Рассмотрим, однонаправленный волокнистый композит. При растяжении вдоль волокон наблюдается три основных механизма разрушения: накопление разрывов волокон, распространение трещины поперек приложенной внешней силе растяжения и размотка, т.е. расслоение материала вдоль волокон. При сжатии вдоль волокон: потеря устойчивости волокон, расслоение вдоль волокон с последующей потерей устойчивости фрагментов материала и резкий изгиб или разрушение (исчерпание несущей способности) волокон с образованием складки под углом  $\sim 45^\circ$  по отношению к приложенной силе сжатия. Для каждого механизма свои критические условия и свои требования к свойствам матрицы (связующего), границе раздела волокно - матрица и пр. Важно помнить, что эти механизмы могут быть различными для конструкции и вырезанного образца для испытаний, что может приводить к ошибкам при перенесении результатов стандартных испытаний на расчет конструкций.

Мы остановились только на двух простых способах статического нагружения однонаправленного волокнистого композита – растяжение и сжатие вдоль направления армирования. Возможно и нагружение под разными углами к направлению армирования, прочность материала со сложной схемой армирования, прочность при изгибе или еще более сложным приложением нагрузки.

Кроме того существует и динамическое или ударное нагружение, циклическое приложение растягивающих, сжимающих или изгибных внешних сил, длительная прочность при постоянной нагрузке и пр.

И каждый вариант характеризуется своим значением разрушающего напряжения, прочности материала.

Часто улучшение прочности при одном виде нагрузки приводит к ухудшению при другом. Например, обычное оконное стекло довольно прочный материал при статическом медленном нагружении, но легко бьется при ударе. В механике есть понятие статической прочности и вязкости разрушения, которая характеризует сопротивление росту трещины в материале. Вот стекло имеет очень низкую вязкость разрушения, в нем легко распространяется трещина. Металлы могут иметь и высокую прочность и высокую вязкость разрушения. Эти характеристики во многом определяются возможностью движения дислокаций [2]. Чем легче двигаются дислокации, тем ниже статическая прочность, но выше вязкость разрушения, труднее распространятся трещины. Поэтому, введение специальных добавок, затрудняющих движение дислокаций (например, углерод в железо) приводит к увеличению статической прочности, но и к увеличению хрупкости, легкости распространению трещин.

Природа и человек вслед за ней нашли выход из этого противоречия, создав композиционные волокнистые материалы такие как дерево или стеклопластик [1]. В этом случае трещина возникнув, например при разрыве волокна, наталкивается на соседнее волокно и поворачивает вдоль волокна из-за большой разницы в прочности волокон (высокая) и связующего или раздела фаз (низкая). Таким образом, опасная трещина,

распространяющаяся поперек нагрузки становится значительно менее опасной, расположенной в направлении нагрузки. Так происходит при нагружении однонаправленного волокнистого материала вдоль направления армирования, вдоль волокон. Выбрав нужную схему армирования, расположения различных слоев в зависимости от внешней нагрузки, можно получить равнопрочный материал, чего не удастся получить для изотропного материала. Приведем пример трубы, работающей при большом внутреннем давлении. В этом случае радиальные напряжения примерно в два раза превышают осевые. Это означает, что труба из изотропного материала (металл, полимер, керамика) всегда лопается вдоль оси от радиальных напряжений, и мы как бы слишком много материала положили вдоль оси. Из однонаправленного анизотропного материала мы можем сконструировать равнопрочную конструкцию, положив вдоль оси в два раза меньше слоев, чем по радиусу. Аналогичным образом мы можем конструировать и другие, более сложные детали, формируя равнопрочные изделия. Это пример того, как можно примирить две различные характеристики прочности - статическую прочность и вязкость разрушения.

Еще одна характеристика прочности материала - усталостная прочность при циклическом изгибе. Хорошо известно, что достаточно металлическую проволоку несколько раз согнуть, как она сломается. То же самое случится, например, с пластмассовой расческой. Дело в том, что в твердых телах (кристаллических и стеклообразных) при больших пластических деформациях накапливаются дефекты (дислокации в кристаллических телах, дилатации в стеклах [3-9], крейзы в полимерах и пр.), которые превращаются в трещины, которые, в конце концов, приводят к разрушению материала. В жидкостях, в отличие от твердых тел, при деформации (течении) дефекты не накапливаются или, во всяком случае быстро релаксируют и тело приходит в равновесное состояние. Поэтому природа придумала для больших изгибных деформаций твердых тел, например, костей специальное устройство - сустав, содержащий жидкую смазку, в которой и осуществляются большие деформации. Аналогичным образом работает смазка в подшипниках.

Особенно интересно устроено дерево [10-14]. В нем, живом есть жидкий сок который, по-видимому, и принимает на себя большие изгибные деформации. Если дерево или ветка высыхает, она становится хрупкой и легко ломается при изгибе. При низких температурах, казалось бы жидкий сок должен замерзнуть и дерево станет хрупким. Да это так. Но в таких деревьях как лиственница, которые хорошо себя чувствуют даже при сибирских морозах, в качестве сока выступает водный раствор некоего полисахарида - арабиногалактана, замерзающий при очень низких температурах (эвтектика). Еще один материал, в котором не накапливаются дефекты при деформации, это эластомеры и резины. Дело в том, что они при обычных условиях также находятся в жидком состоянии ( $T > T_g$ ,  $T$  - температура эксплуатации,  $T_g$  - температура стеклования) и времена релаксации структуры у них очень небольшие. Так устроены мышцы у животных и человека, или шины и другие резиновые изделия, которые создал человек.

#### Литература

1. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г., Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология, Издательский Дом «Интеллект», г. Долгопрудный, 2009.
2. А.Коттрел, Теория дислокаций М., Мир, 1969.
3. Берлин Ал.Ал., Мазо М.А., Балабаев Н.К., Природа дефектов, возникающих при пластической деформации стекол, Все материалы. Энциклопедический справочник, «Наука и технологии» 2012, №10, с. 10-13.
4. Berlin Al.Al., Mazo, Melting and Vitrification of Lennard\_Jones Spheres, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2013, Vol. 6, No. 3, pp. 228–231.

5. Стрельников И.А., Мазо М.А., Балабаев Н.К., Олейник Э.Ф, Берлин Ал.Ал., Накопление энергии при пластической деформации стеклообразного полиметилена, ДАН, 2014, Т. 457, № 2, С. 193-196.
6. Berlin Al.Al., Mazo M.A., Strel'nikov I.A., Balabaev N.K., Modeling of plastic deformation of glasses in creeping and stress relaxation regimes, Polymer Science Series D, April 2015, Volume 8, Issue 2, pp 85-91.
7. Берлин Ал.Ал., Ротенбург Л., Басэрст Р., Деформационное поведение и переход стекло - жидкость в гранулированных системах, Химическая физика, 1991, Т.10, № 9, С. 1284-1291.
8. Берлин Ал.Ал., Ротенбург Л., Басэрст Р., Особенности деформации неупорядоченных полимерных и неполимерных тел, Высокомолек. соед. А, 1992, Т.34, № 7, С. 6-32.
9. Мазо М.А., Стрельников И.А., Маневич Л.И., Берлин А.А., Анализ структурно-динамических неоднородностей аморфной системы: двумерные системы Ленард-Джонсовых дисков, Энциклопедия инженера-химика. «Наука и технологии» 2010, №9, с. 23-33.
10. Ал.Ал. Берлин, Об усталостной прочности природных материалов, Все материалы. Энциклопедический справочник, 2019, № 7, с. 2-3.
- A. A. Berlin, Fatigue Strength of Natural Materials, Polymer Science, Series D, 2020, Vol.13, No.1, p. 57.
11. Berlin A., Strength and Fatigue of Natural and Artificial Materials. Phys Chem Ind J. 2019;14(1):125.
12. Э.Л. Аким, С.З. Роговина, А.А. Берлин. Усталостная прочность древесины и релаксационное состояние ее полимерных компонентов // Доклады российской академии наук. Химия, науки о материалах, 2020, т. 491, с. 73-76.
- E.L. Akim, S.Z. Rogovina, Al.Al. Berlin, Fatigue Strength of Wood and the Relaxation State of Its Polymer Components, ISSN 0012-5016, Doklady Physical Chemistry, 2020, Vol. 491, Part 1, pp. 33–35.
13. Н.В. Виноградов, С.З. Роговина, Э.Л. Аким, Исследование свойств жидкой системы, выдавливаемой из древесины лиственницы при сжатии, Международная научно-техническая конференция молодых ученых, специалистов в области ЦБП «Проблемы современной целлюлозно-бумажной промышленности, 2018 г., С. 3-10, ISBN 978-5-91646-160-2.
14. Н.В. Виноградов, Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Санкт-Петербург, 2019.