



ПРОЧНОСТЬ И УСТАЛОСТЬ ПРИРОДНЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Ал. Ал. Берлин

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

Копируя природу, человек
ее обгоняет...

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

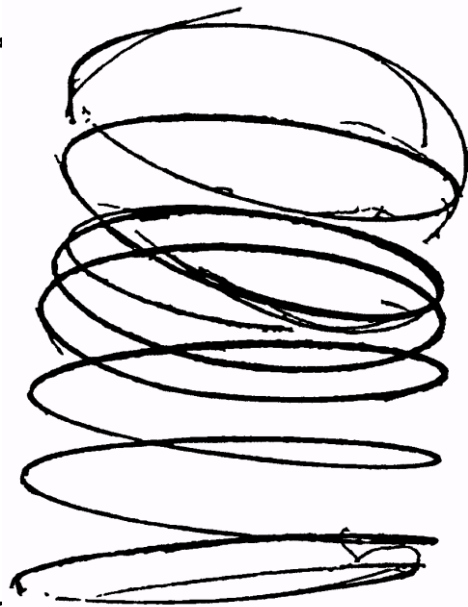
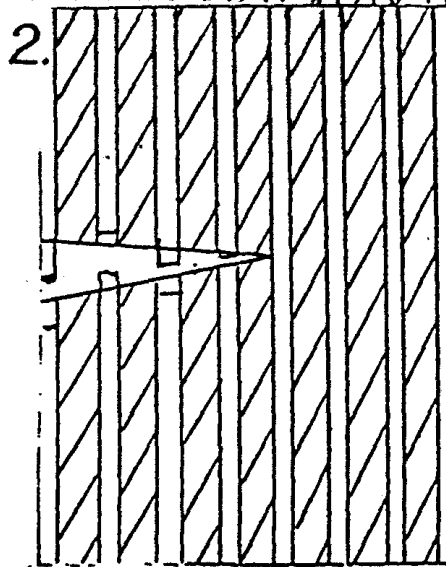
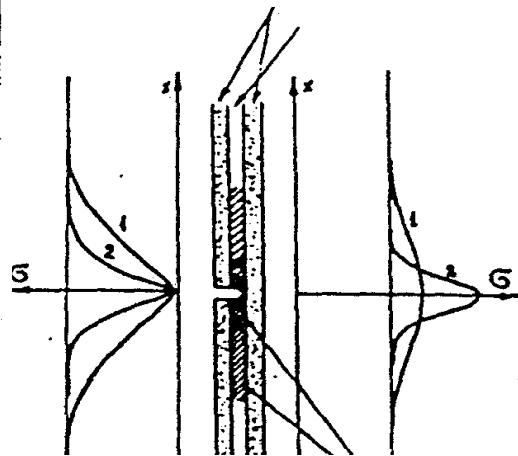
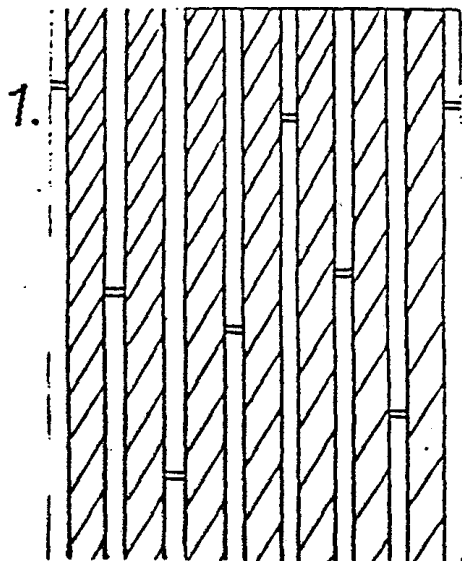
Есть как минимум две проблемы, которые усложняют однозначную интерпретацию этого определения, особенно для композиционных материалов. Во-первых, вариация внешней нагрузки. Во-вторых, множество и конкуренция различных механизмов разрушения.

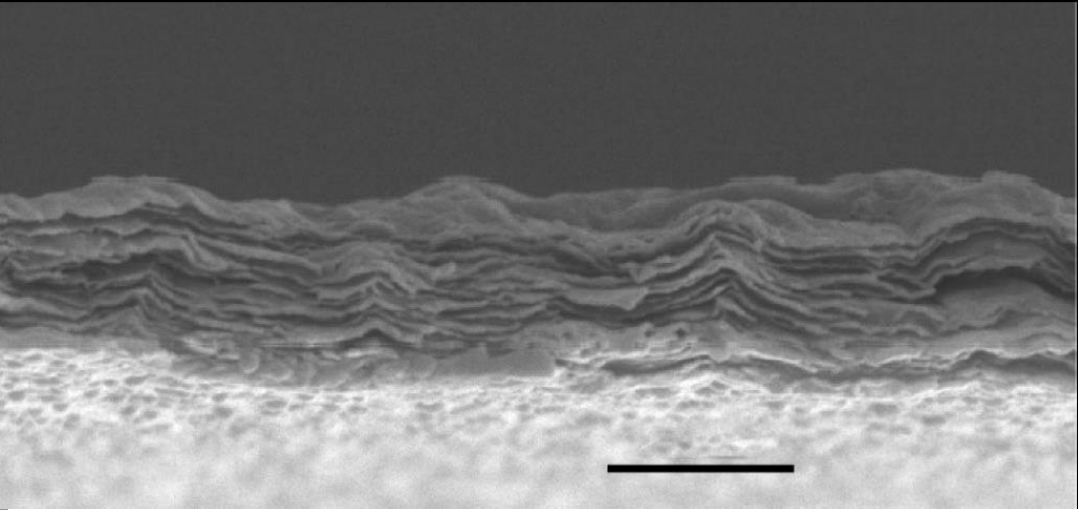
Часто улучшение прочности при одном типе нагрузки приводит к ухудшению при другом. Например, обычное оконное стекло является довольно прочным материалом при псевдостатической медленной нагрузке, но оно легко разбивается при ударе. В механике твердого тела существуют представления о статической прочности и вязкости разрушения, характеризующие сопротивление растрескиванию материала. Стекло имеет очень низкую трещиностойкость: в нем легко распространяется трещина. Металлы могут обладать как высокой прочностью, так и высокой вязкостью разрушения. Эти характеристики во многом определяются возможностью движения дислокаций. Чем легче перемещаются дислокации, тем ниже статическая прочность, но тем выше вязкость разрушения, тем труднее распространяется трещина. Поэтому введение специальных добавок, препятствующих движению дислокаций (например, углерода в железе), приводит к увеличению статической прочности, а также к повышению хрупкости и облегчению распространения трещин.

Природа и человек, следуя ей, нашли выход из этого противоречия, создав композитные волокнистые материалы, такие как дерево или стеклопластик.

ПОВОРОТ И ОСТАНОВКА ТРЕЩИНЫ

I.





Nanostructured artificial nacre
 ZHIYONG TANG¹, NICHOLAS A.
 KOTOV, **SERGEI MAGONOV** AND
 BIROL OZTURK

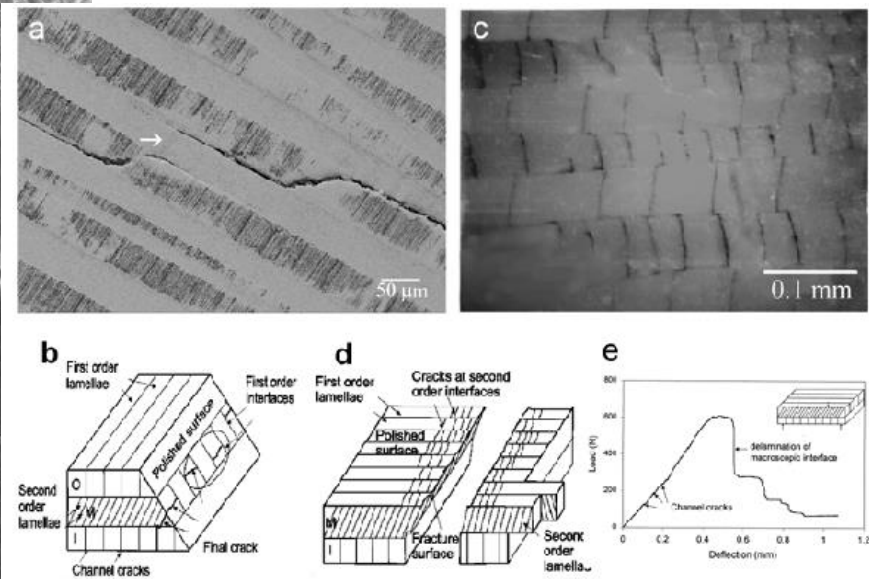
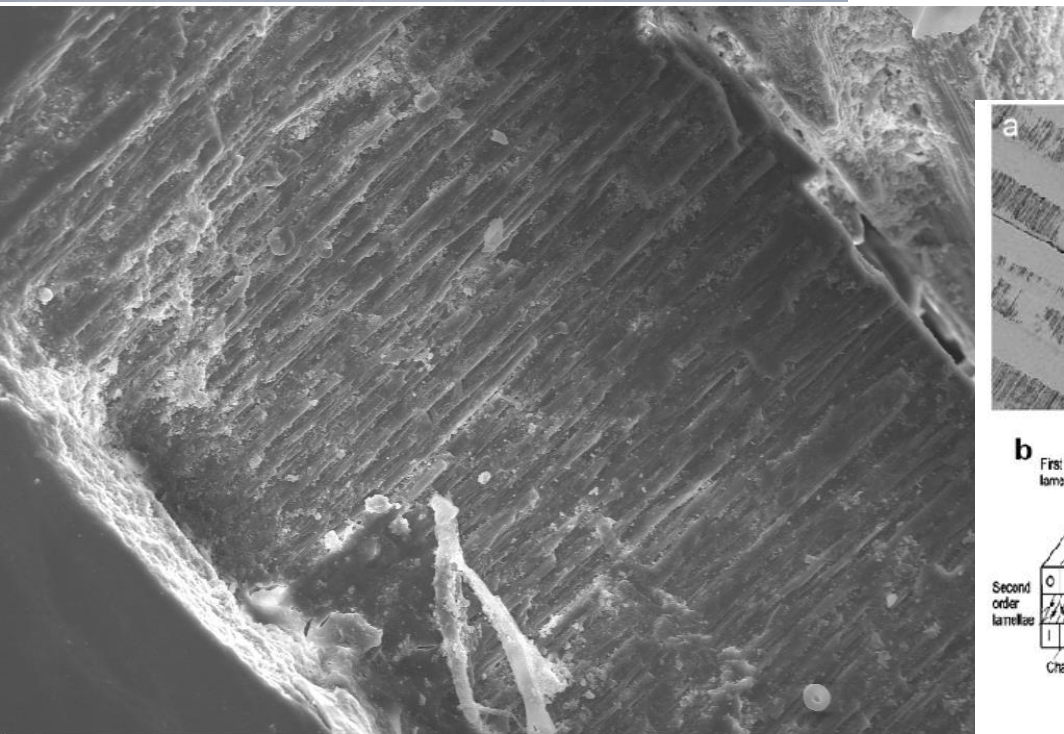
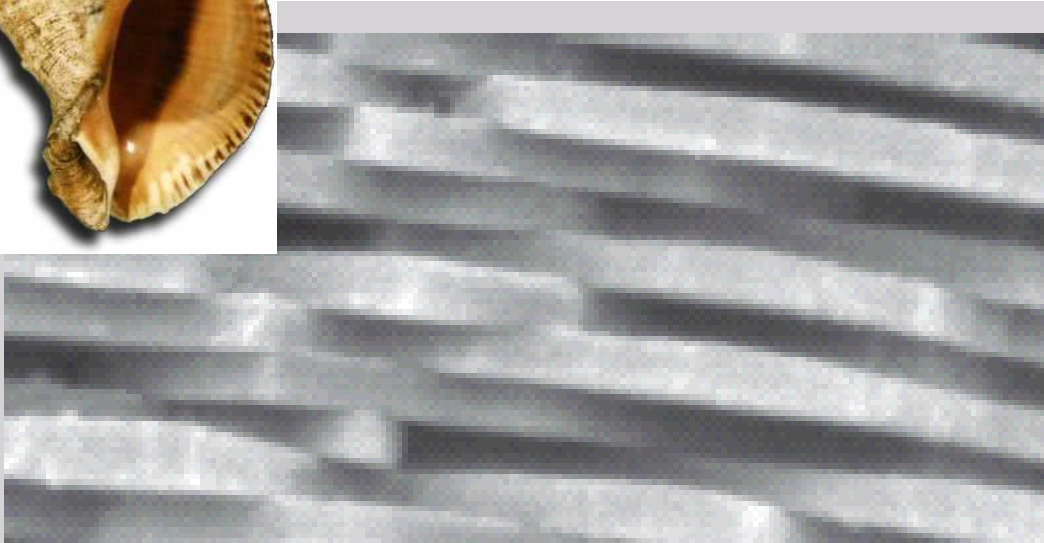


Fig.3

A. H. Heuer

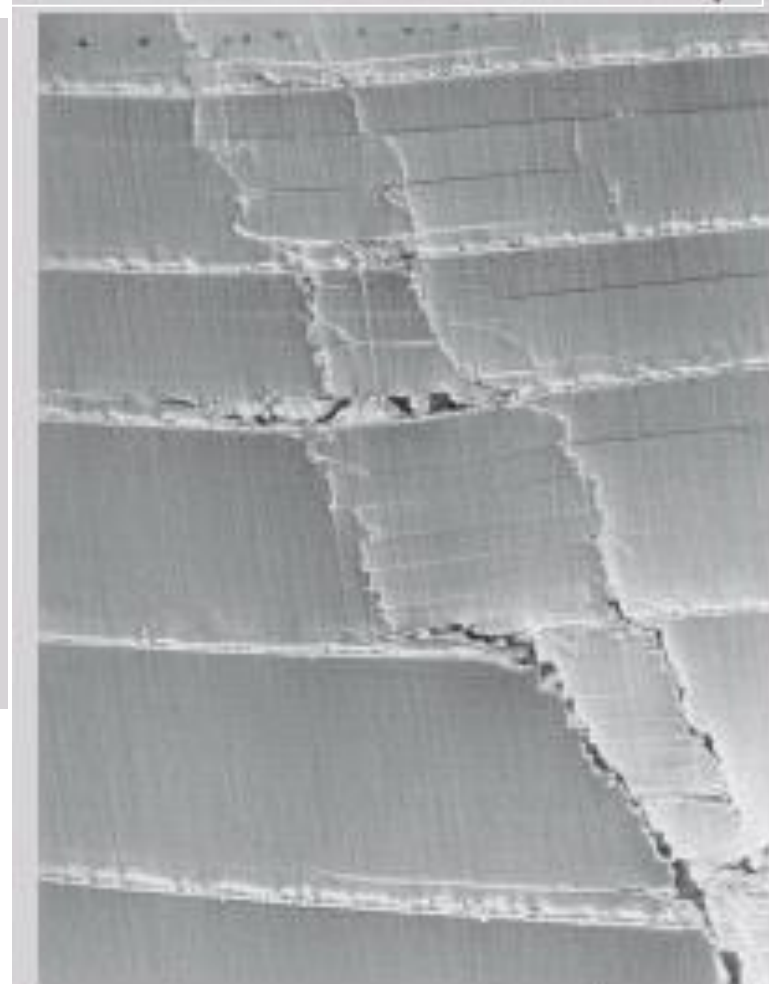
20µm
 Mag = 1.04 K X WD = 12 mm Detector = SE1 Brightness = 29.0 %
 Fill = 2.331 A EHT = 20.00 kV Time :15:22:48 Contrast = 29.0 %
 Spot Size = 300 Date :16 Jan 2006 Photo No. = 1988



a

2 μm

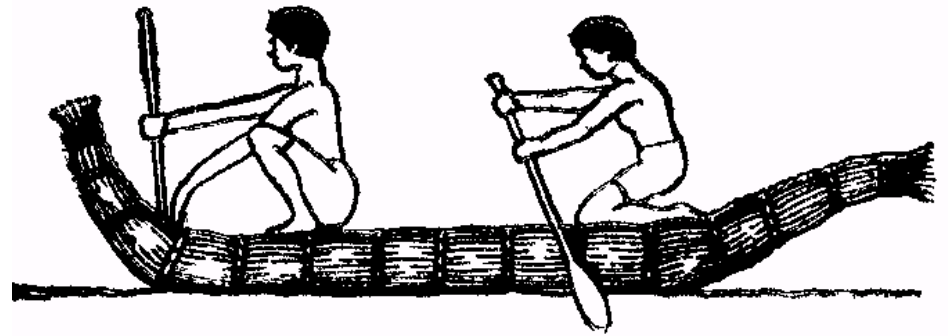
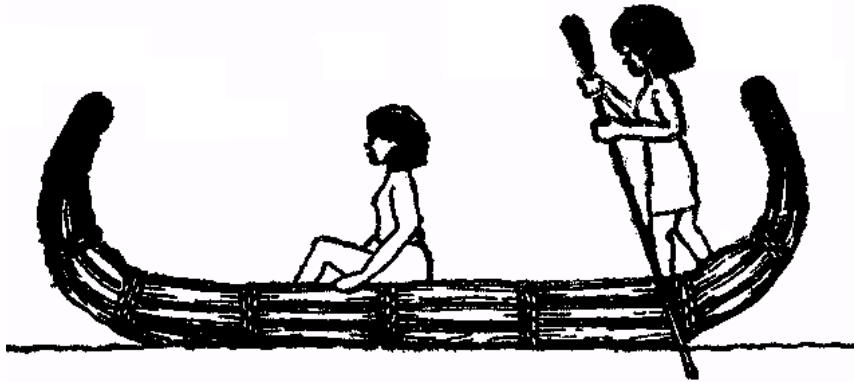
(a) An SEM micrograph of the fracture surface of an abalone shell showing the individual hexagonal aragonite tiles comprising the microstructure. (b) An optical micrograph of the mesoscale laminate structure of the abalone shell in a bend fracture sample showing the crack deflection achieved in this multi-layered

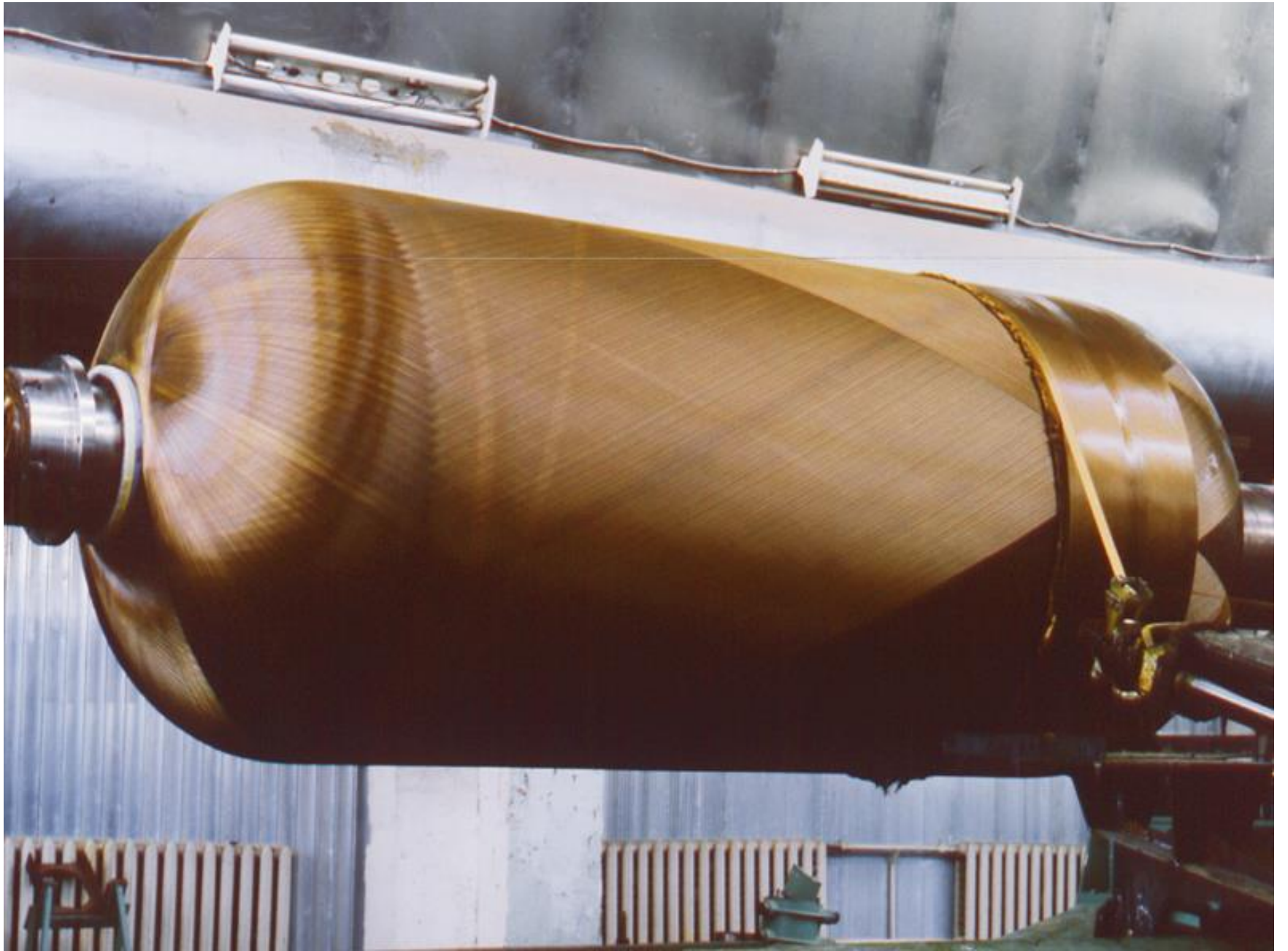


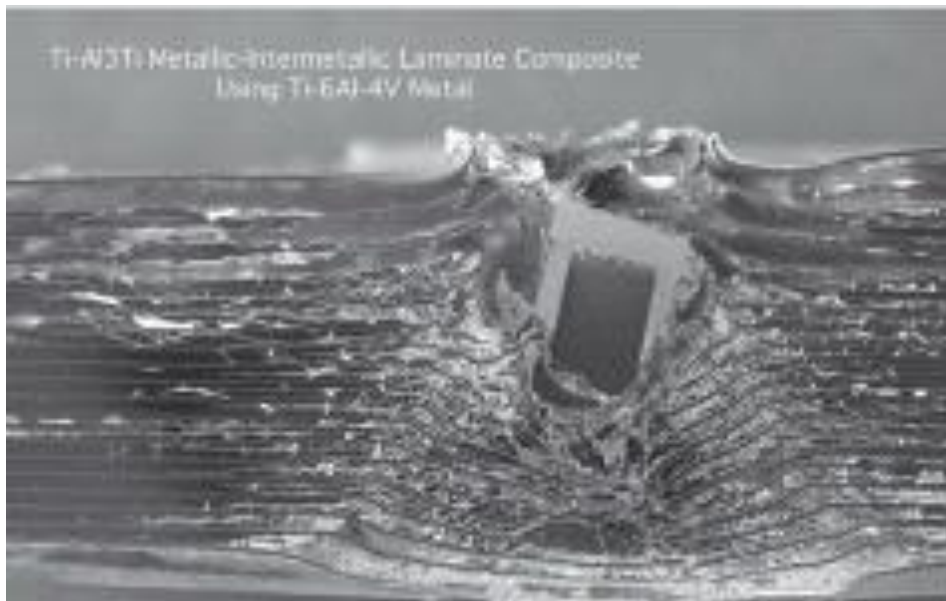
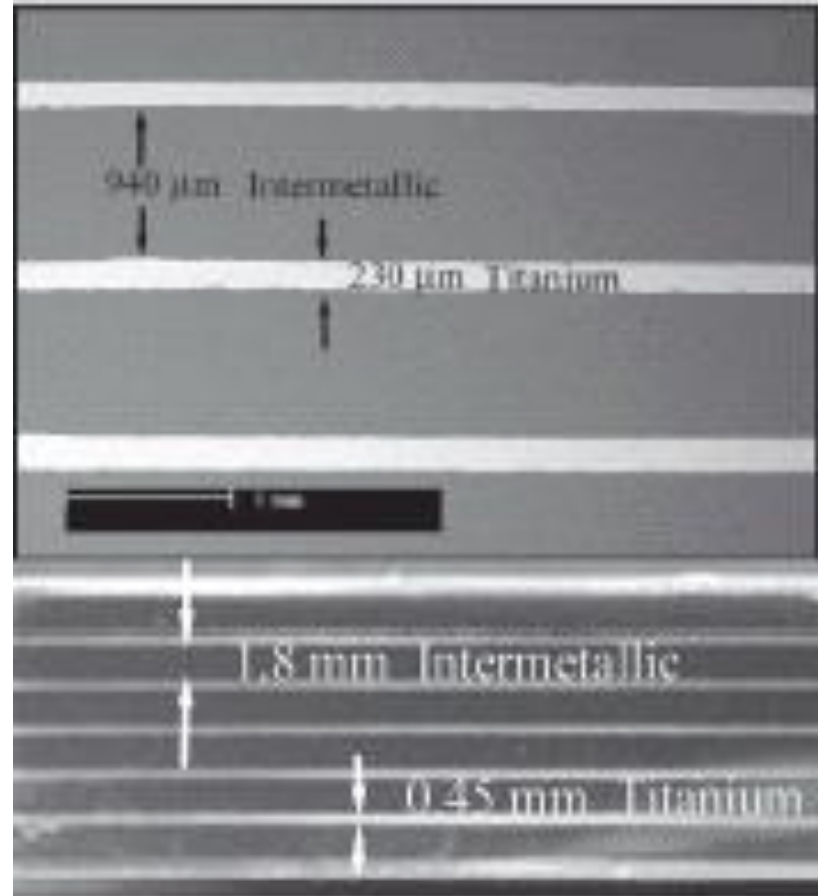
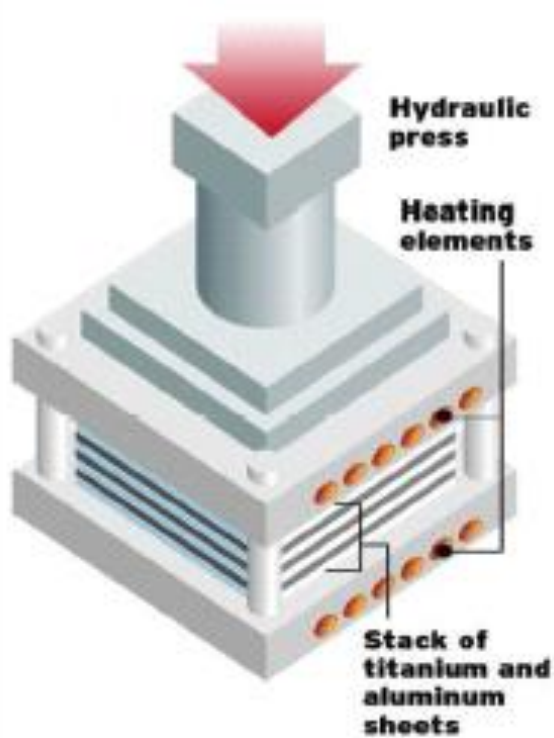
b

300 μm









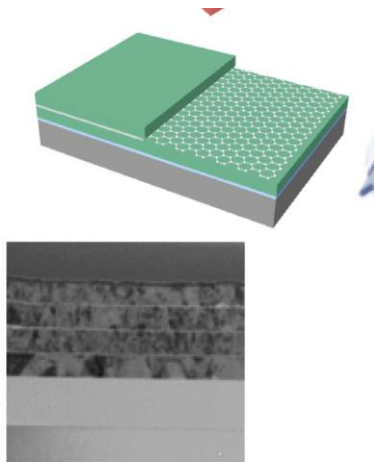
The microstructures typical of Ti- Al₃Ti metallic-Intermetallic Laminate composites

Strengthening effect of single-atomic-layer graphene in metal-graphene nanolayered composites

Youbin Kim¹, Jinsup Lee², Min Sun Yeom^{3,4}, Jae Won Shin⁵, Hyungjun Kim¹, Yi Cui⁶, Jeffrey W. Kysar⁷, James Hone⁷, Yousung Jung^{1,8}, Seokwoo Jeon^{2,8,9} & Seung Min Han^{1,8}

1 Graduate School of Energy Environment Water and Sustainability, Korea Advanced Institute of Science & Technology, Daejeon 305-701, Korea.
 2 Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science & Technology, Daejeon 305-701, Korea. 3 Industrial Supercomputing Department, SMB Knowledge Support Center, KISTI, Daejeon 305-806, Korea. 4 Materials Research Science and Engineering Center (MRSEC), Northwestern University, Evanston, Illinois 60208, USA. 5 Division of Electron Microscopic Research, Korea Basic Science Institute (KBSI), 113 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-333, Korea. 6 Department of Materials Science and Engineering, Stanford University, Stanford, California 94305, USA.
 7 Department of Mechanical Engineering, Columbia University, New York, New York 10027, USA.
 8 KI for NanoCentury, Korea Advanced Institute of Science & Technology, Daejeon 305-701, Korea. 9 Graphene Research Center, KI for NanoCentury, Korea Advanced Institute of Science & Technology, Daejeon 305-701, Korea. Correspondence and requests for materials should be addressed to Y.J. (email: ysjn@kaist.ac.kr) or to S.J. (email: jeon39@kaist.ac.kr) or to S.M.H. (email: smhan01@kaist.ac.kr).

Наноматериалы состоят из графена, вставленного в медь или никель и имеют прочность соответственно в 500 и 180 раз большую, чем эти чистые металлы при 0,00004 % по весу графена.



Schematic of metal-graphene multilayer system synthesis.

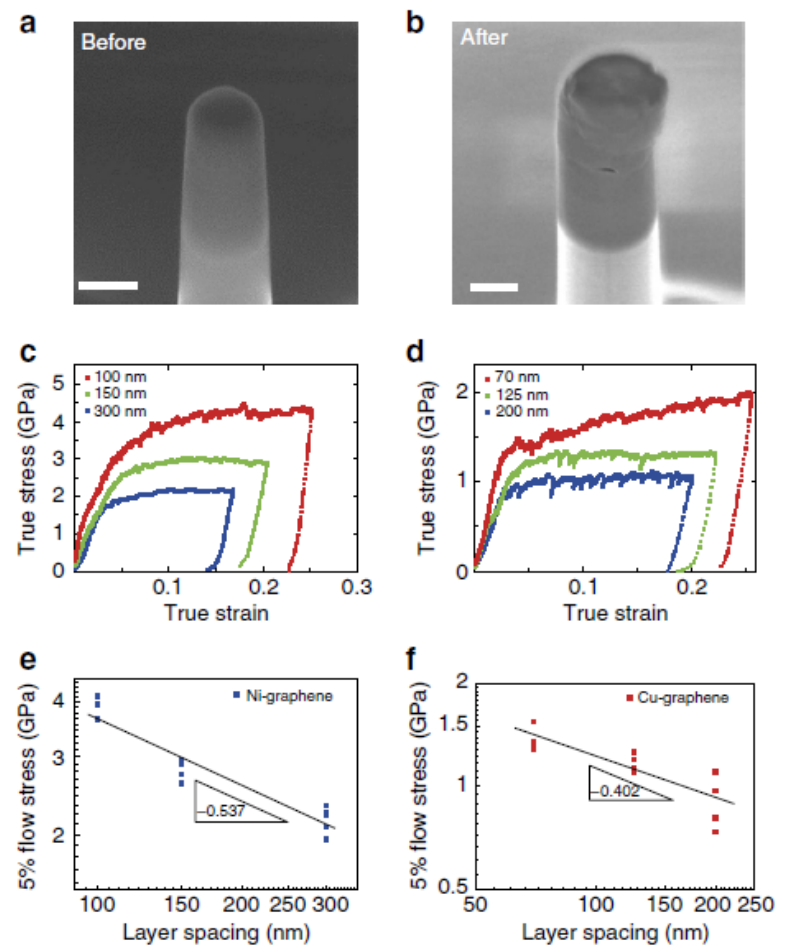


Figure 3 | Results of nanopillar compression test. Scanning electron microscope image of a Cu-graphene nanopillar with 125-nm layer spacing (a) before and (b) after compression testing. Scale bar, 200 nm. Stress versus strain curves for (c) Ni-graphene and (d) Cu-graphene of various repeat metal layer spacings. The flow stresses at 5% plastic strain versus repeat layer spacing plots for (e) Ni-graphene and (f) Cu-graphene nanolayered composites.

MAJOR FRACTURE MECHANISMS OF UNIDIRECTIONAL COMPOSITES

I. Tensile loading along fiber axis

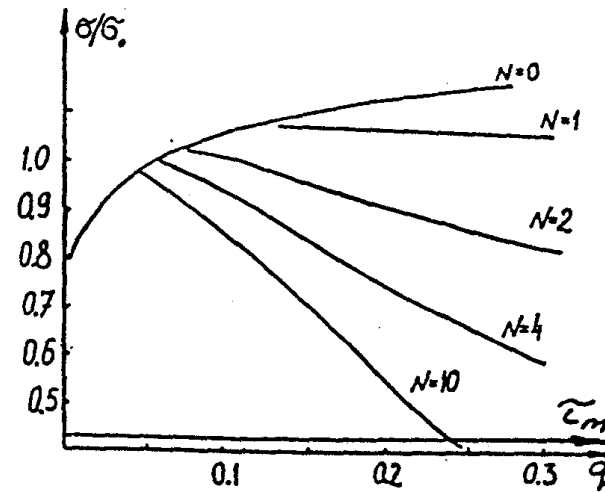
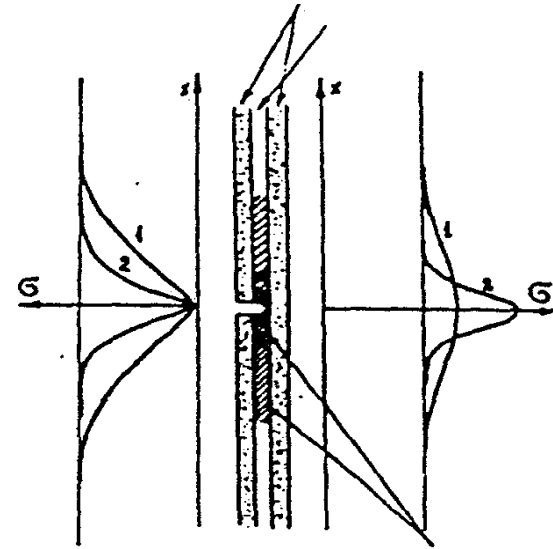
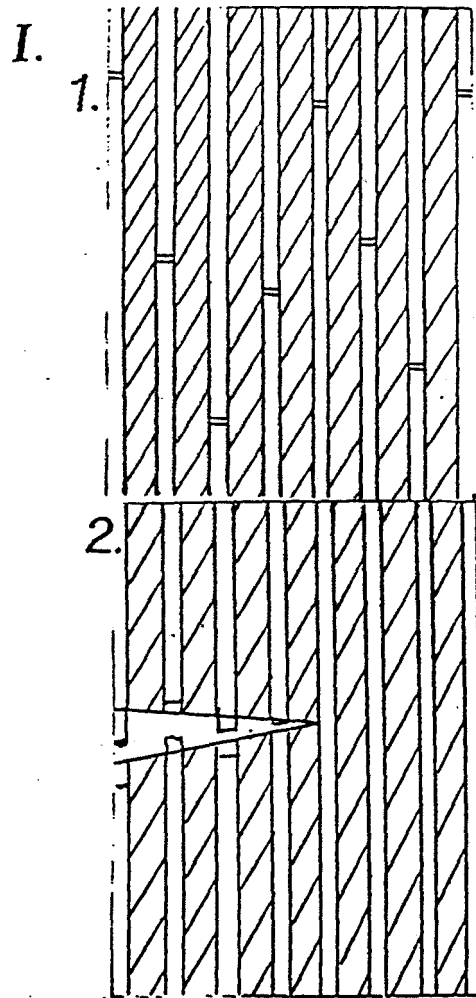
1. Accumulation of fiber breaks
2. Crack propagation from stress concentrator (fractured fibers or yarn, notch, hole, knot, etc.)
3. Splitting, unwinding

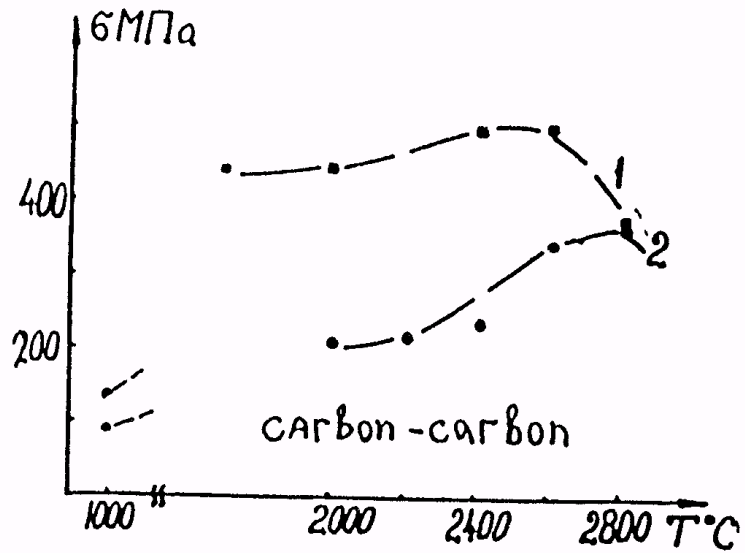
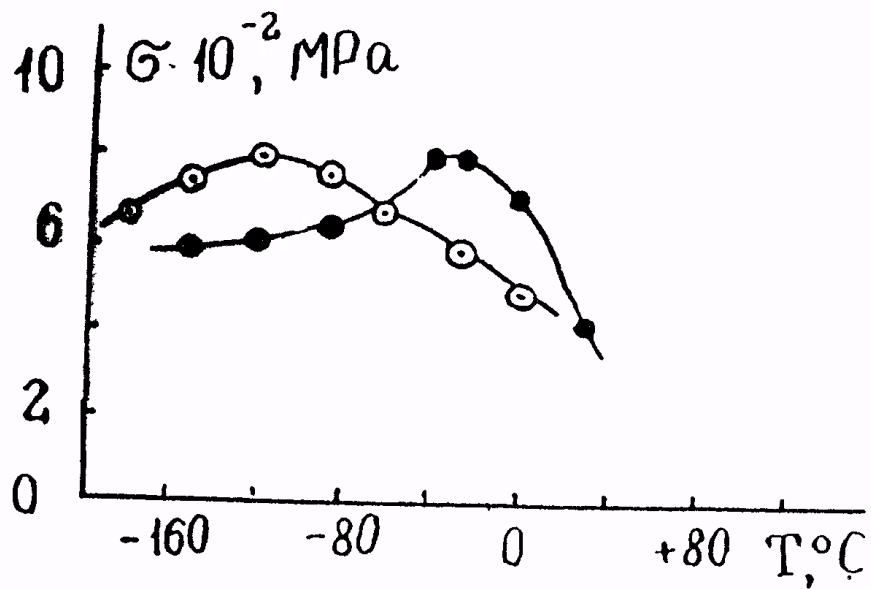
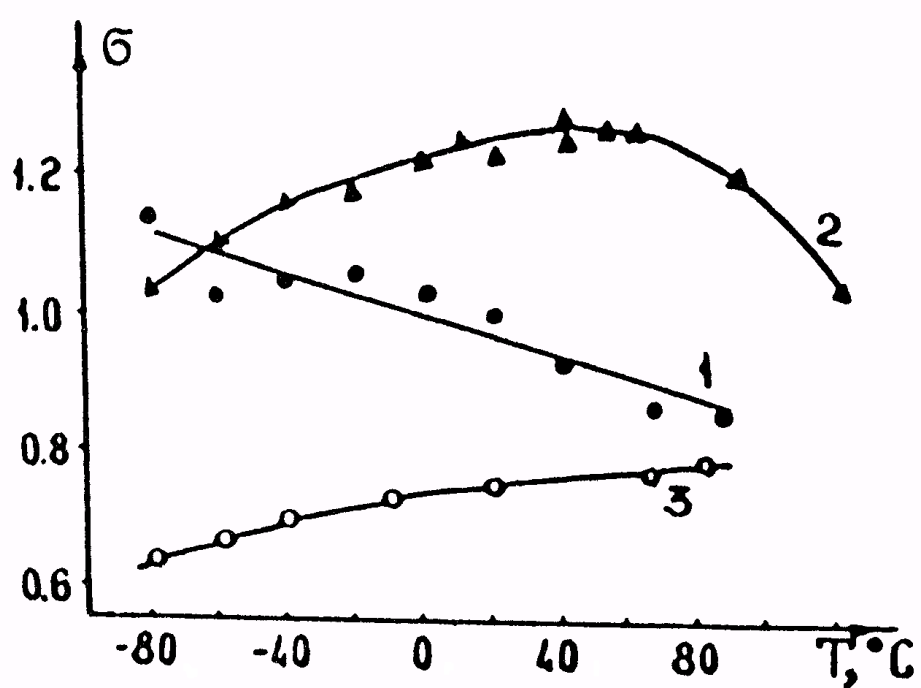
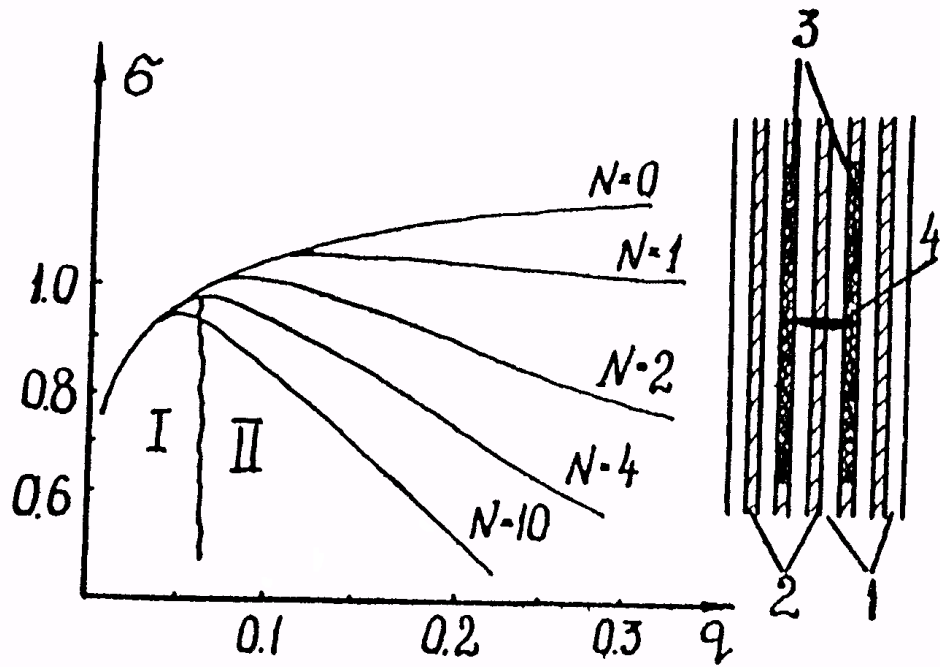
II. COMPRESSIVE LOADING ALONG FIBER AXIS

1. Microbuckling of fibers
2. Splitting and consecutive buckling of splitted parts
3. Kinking, forming of the shear band at approximately 45° to the loading axis

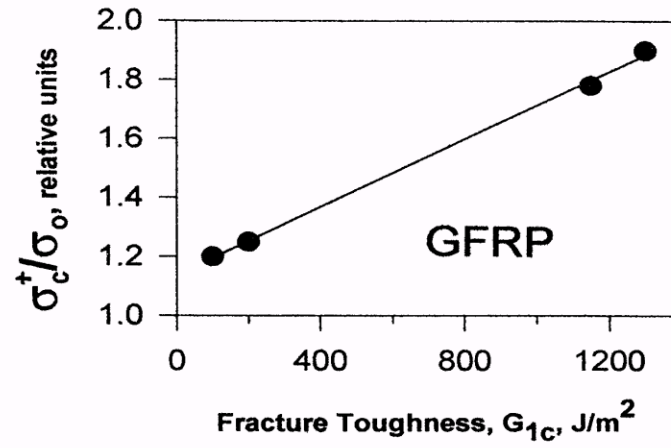
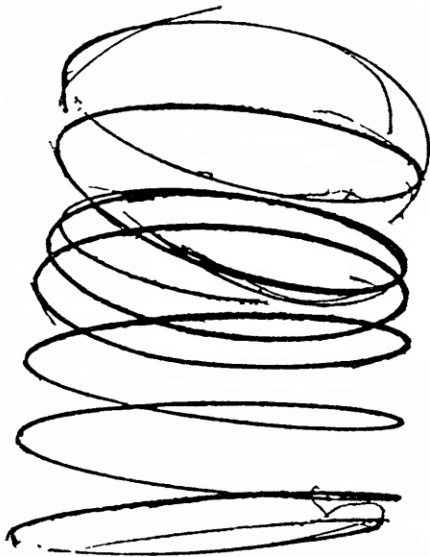
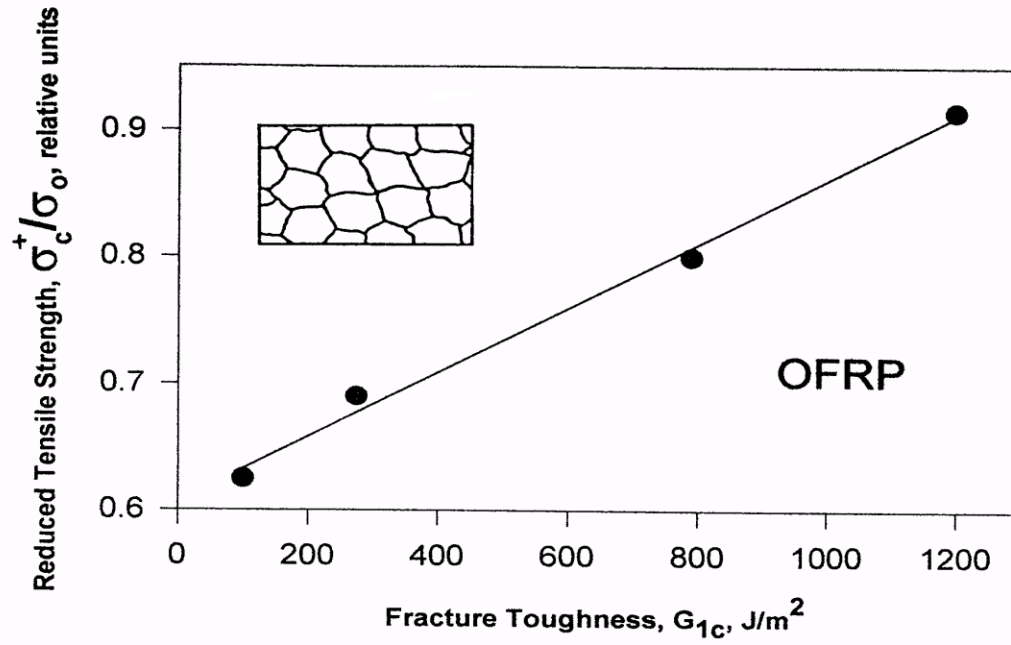
I. Tensile loading along fiber axis

1. Accumulation of fiber breaks
2. Crack propagation from stress concentrator (fractured fibers or yarn, notch, hole, knot, etc.)



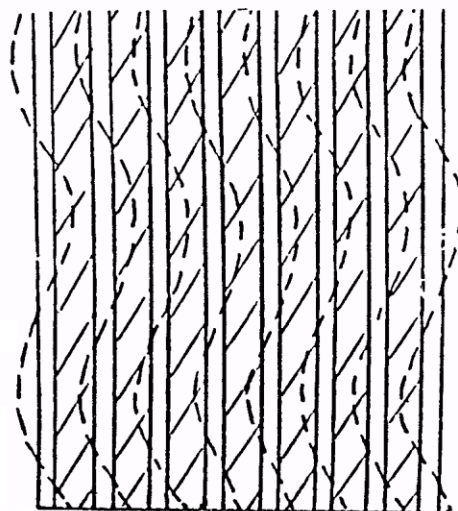


3. Splitting, unwinding



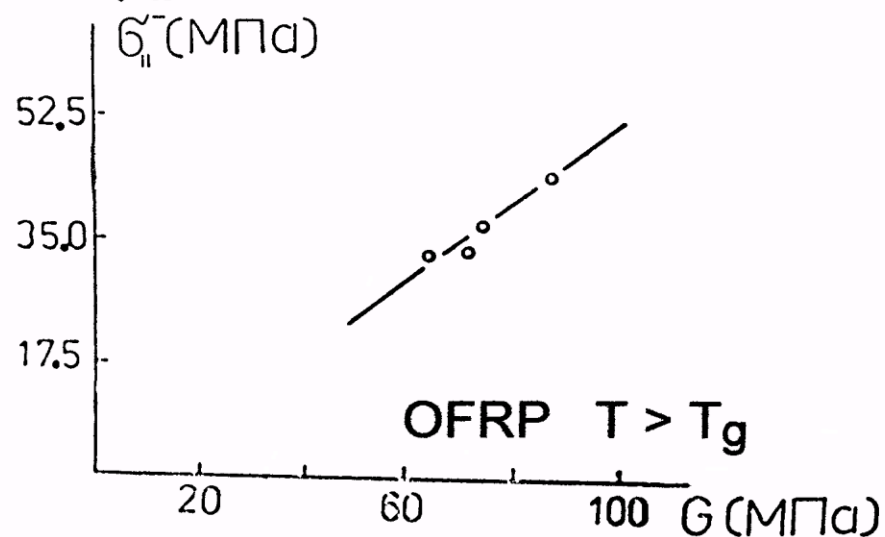
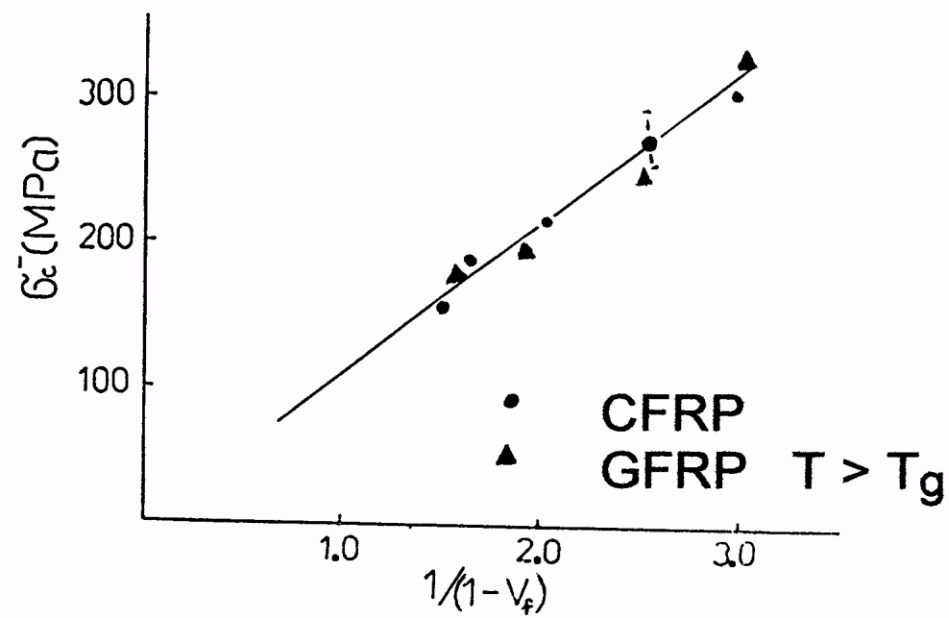
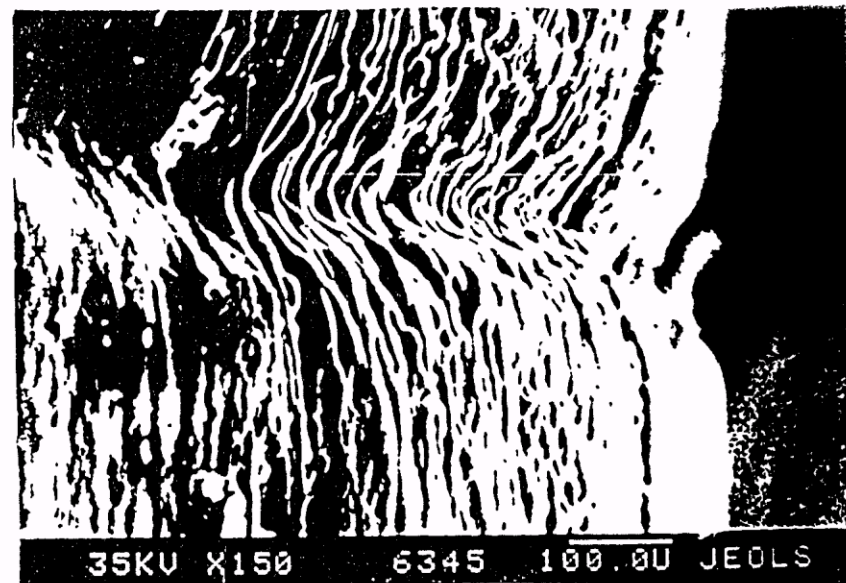
II. COMPRESSIVE LOADING ALONG FIBER AXIS

1. Microbuckling of fibers

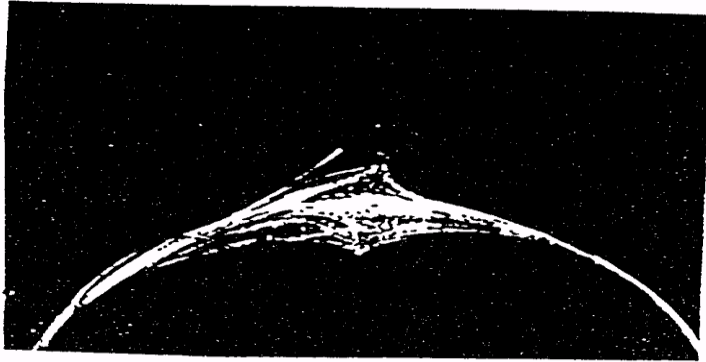


$$G_c^- = \frac{G_m}{1 - V_f}$$

where G_m — shear modulus of polymeric matrix,
 V_f — volume content of fibers.

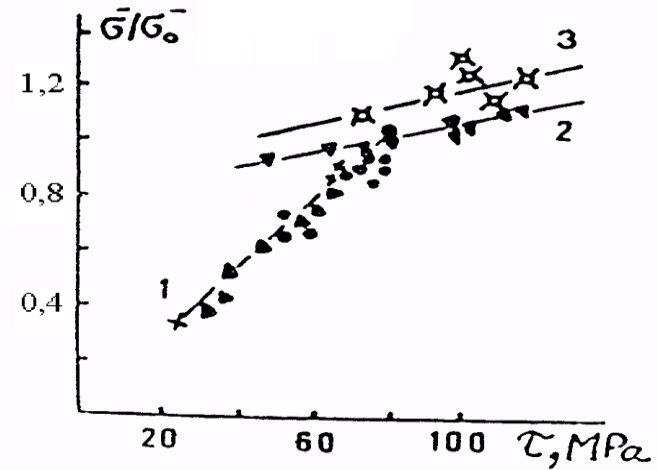


2. Splitting and consecutive buckling of splitted parts

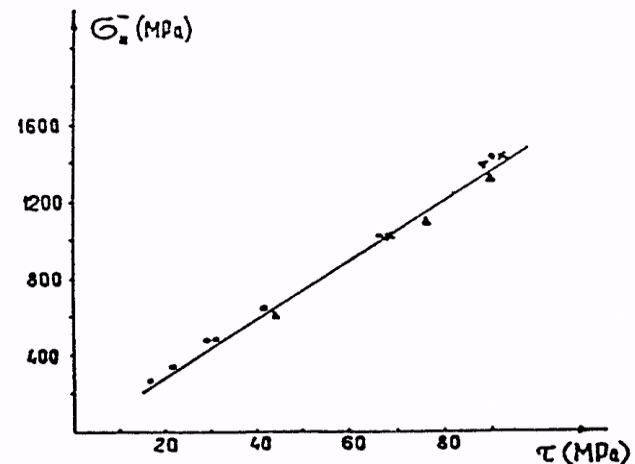
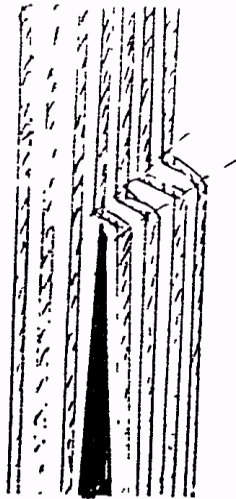


$$\bar{\sigma}_c \sim \tau_c$$

where τ_c - composite shear strength.



Splitting and consecutive shear band formation (kinking) from the top of split



EFFECT OF MATRIX PROPERTIES ON THE COMPOSITE STRENGTH

The strength of composite increases with:

I. TENSILE LOADING ALONG FIBER AXIS	
1. Accumulation of fiber breaks	increasing of the strength or yielding point of matrix;
2. Crack propagation from stress concentrator	decreasing of the strength, yielding point or stiffness of matrix;
3. Splitting, unwinding	increasing of the toughness, fracture energy of matrix and adhesion strength;
II. COMPRESSIVE LOADING ALONG FIBER AXIS	
1. Microbuckling of fibers	increasing of the shear modulus of the matrix;
2. Splitting and consecutive buckling of splitted parts	increasing of the toughness and the strength of matrix and adhesion strength;
3. Kinking, forming of the shear band at approximately 45° to the loading axis	practical independence of the composite strength on the strength of matrix at the high fiber volume content.

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.

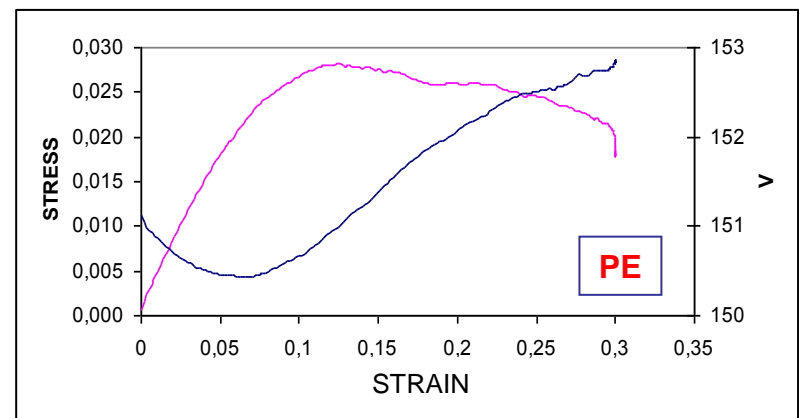
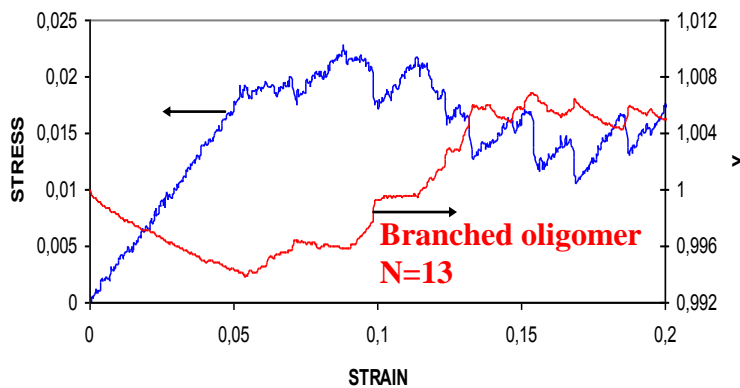
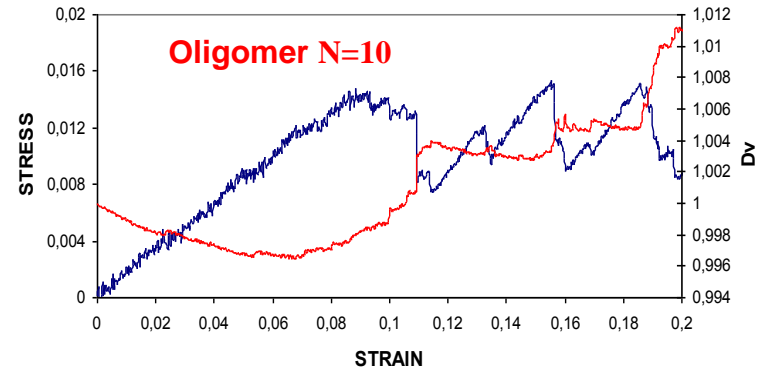
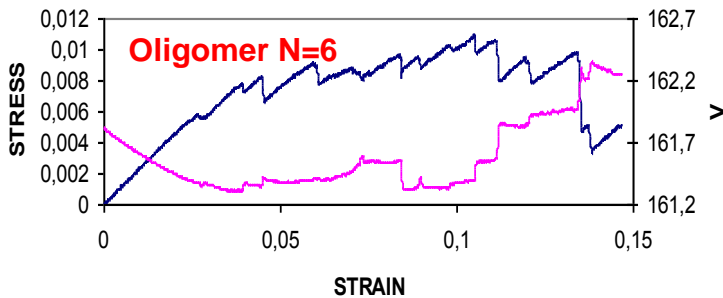
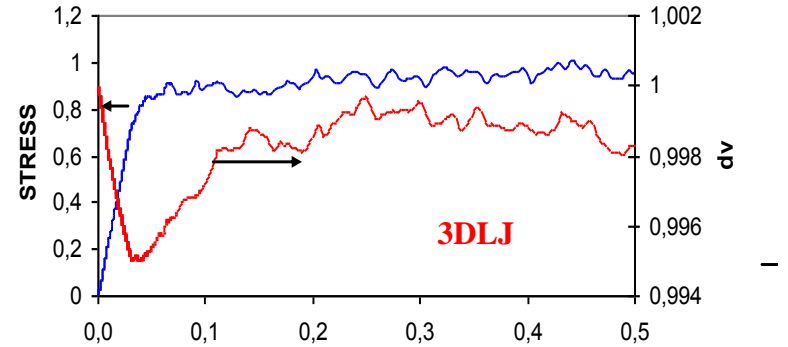
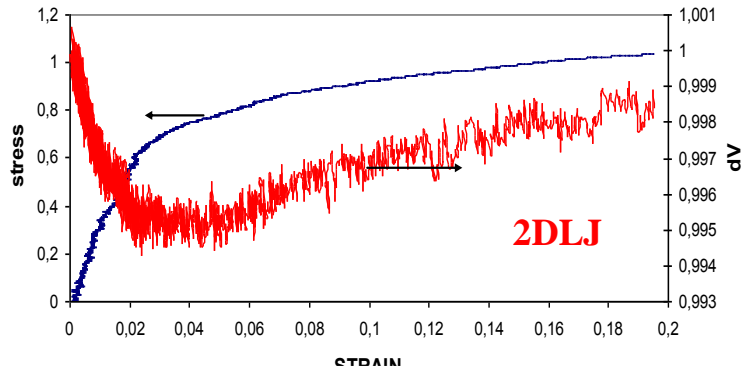
Кроме того существует и динамическое или ударное нагружение, циклическое приложение растягивающих, сжимающих или изгибных внешних сил, длительная прочность при постоянной нагрузке и пр.

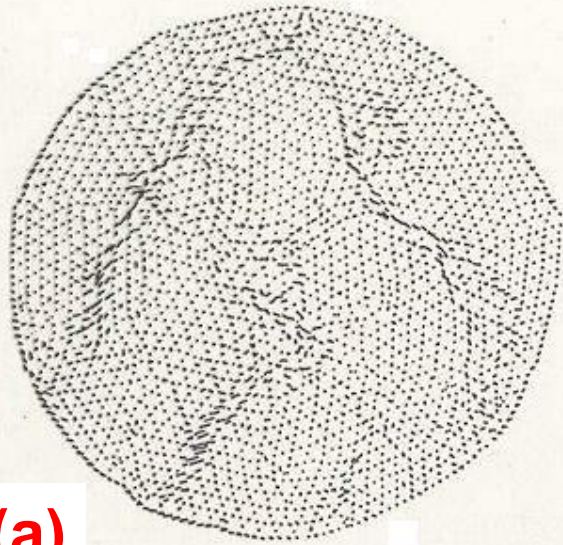
И каждый вариант характеризуется своим значением разрушающего напряжения, прочности материала.

УСТАЛОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

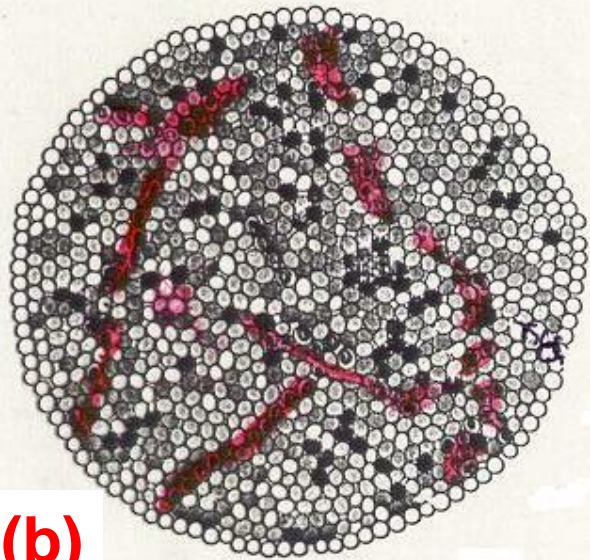
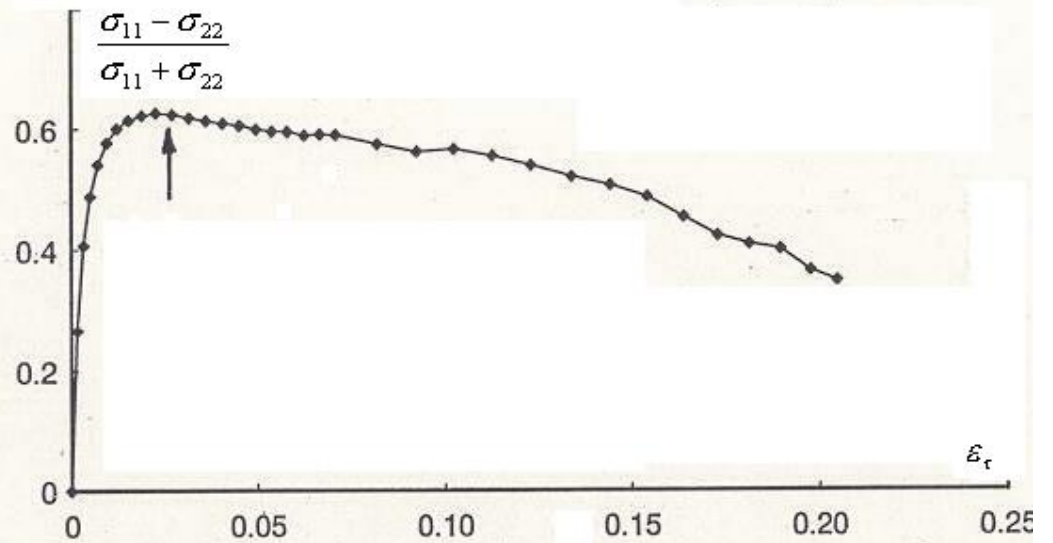
Еще одна характеристика прочности материала - это усталостная прочность при циклическом изгибе. Хорошо известно, что металлическая проволока легко ломается после нескольких изгибов. То же самое произойдет, например, с пластиковой расческой. Дело в том, что при больших пластических деформациях твердые вещества накапливают дефекты (дислокации в кристаллических материалах, дилатации в стеклах, крейзы в полимерах и т. д.). Эти дефекты превращаются в трещины, ведущие к разрушению материала. В отличие от твердых тел, в жидкостях во время деформации (течения) дефекты не накапливаются или они быстро релаксируют и тело возвращается в равновесное состояние. Для больших изгибных деформаций, скажем, костей, природа изобрела специальное «устройство» в качестве сочленения, содержащего жидкую смазку, которая способна выдерживать большие деформации. Аналогично, смазка работает в подшипниках.

Пластическая деформация твердых тел **всегда** сопровождается увеличением объёма даже при сжатии

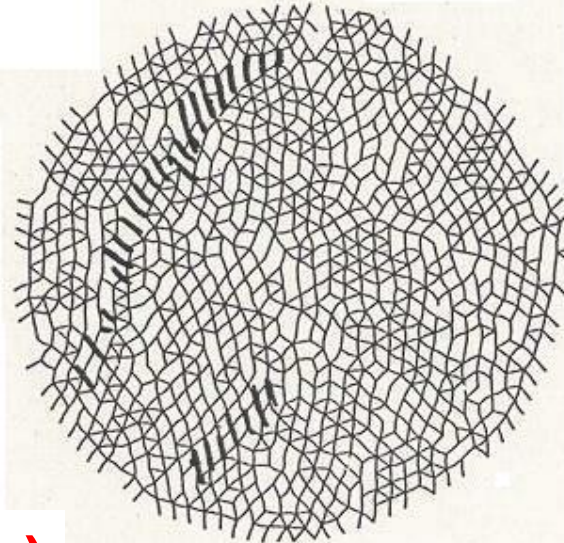




(a)



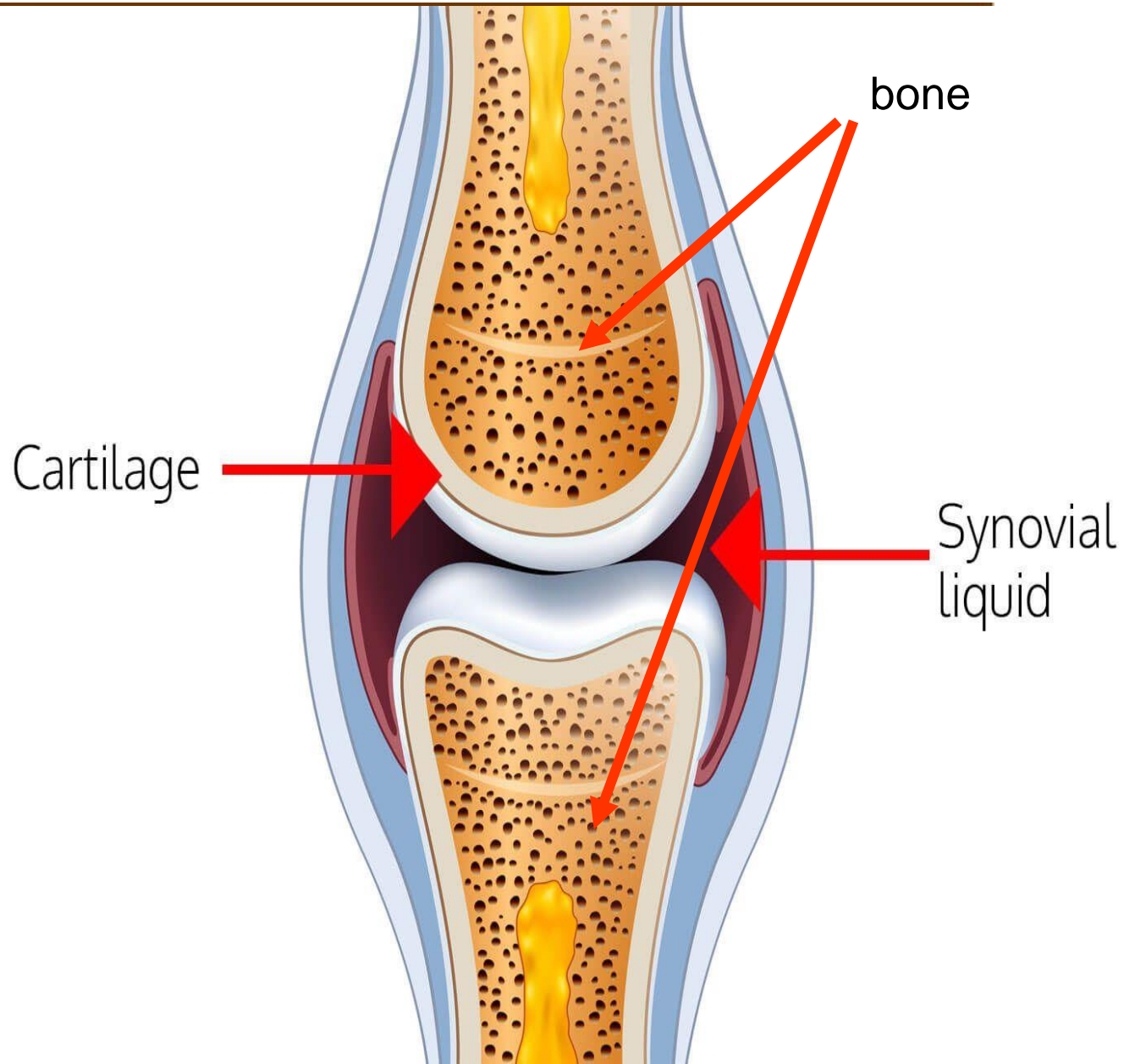
(b)



(c)

a - Local deformations of a granular system under uniaxial compression,
b - particles with paucity contacts (red marks) after yield point.

JOINT STRUCTURE



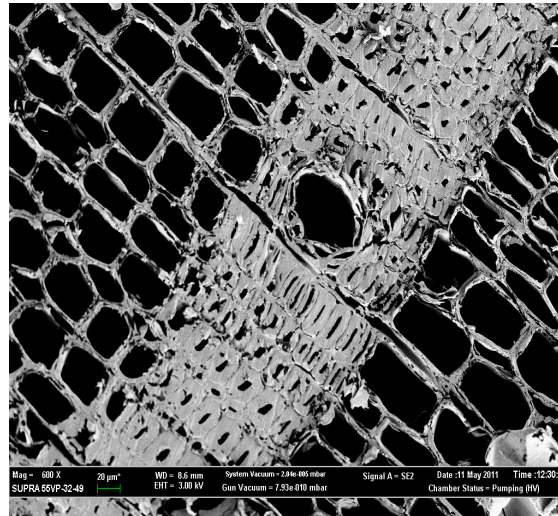
bearing

Дерево представляет особый интерес из-за высокой усталостной прочности. Жидкий сок в живых ветвях, по-видимому, принимает на себя большие изгибные деформации. Если дерево или ветвь высыхают, они становятся ломкими и легко ломаются при сгибании. При низких температурах жидкий сок, по-видимому, должен замерзнуть, а дерево должно стать ломким. Да, это правда. Однако в таких деревьях, как лиственница, которая может выжить даже при сибирских морозах, ее сок представляет собой водный раствор полисахарида (арабиногалактана), который замерзает при очень низких температурах (эвтектика).

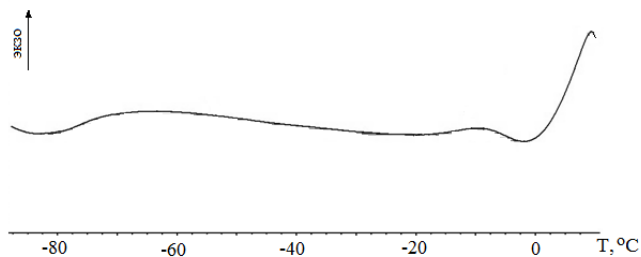
Эластомеры и каучуки - это материалы, которые также не накапливают дефекты во время деформации. Эти материалы находятся в жидком состоянии при нормальных условиях ($T > T_g$, T - рабочая температура, T_g - температура стеклования), и времена релаксации их структуры относительно невелики. Мышцы животных и людей или шины и другие резиновые изделия, созданные человеком, вот примеры таких объектов.



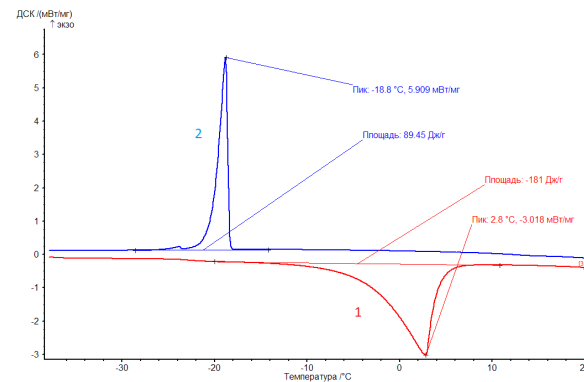
SIBERIAN LARCH



Электронная микрофотография одного годового кольца, включающего слой ранней (крупные поры, тонкие стенки) и поздней (мелкие поры, толстые стенки) древесины лиственницы после экстракции АГ.



а



б

ДСК-кривые опилок древесины лиственницы из средней части ядра (а) и 26%-ного водного раствора АГ (б).



muscles



tires

Природные материалы – значительно сложнее и таинственнее

- 1. Они способны подавать сигналы при разрушении, например, организм чувствует боль**
- 2. Природные материалы самозалечиваются, сами ремонтируются.**
- 3. Они могут подстраиваться к окружающей среде, прилагаемой нагрузке (“smart material”).**
- 4.**
- 5.**

Будущее:

1. Использование природных материалов ("зеленые" композиты) и, возможно, генетическая модификация (или селекция) источников (растения, деревья, паутина и пр.)
2. Неорганические связующие (негорючие, термостойкие, радиационностойкие, легко перерабатываемые и пр.), пластичная керамика.
- 3 Чувствительные к повреждениям, как человек или животное к боли.
- 4 Самозалечивающие композиты.
5. Композиты с высокой усталостной прочностью, как растущее дерево.
6. "Умные" композиты, подстраивающиеся под внешние условия, нагрузку температуру и пр.
7. Новые методы переработки: аддитивные и пр. и вторичной переработки.
8. Слоистые композиты, металл-графен и многие другие типа ракушек.
9. Градиентные материалы и изделия как иглы, перья и пр.
10. Биоразлагаемые материалы для упаковки, медицины и пр.