



О механизмах аккомодации напряжений в материалах на основе биоминерала

**Меженов Максим Евгеньевич^{1,2},
Панфилов П.Е.^{1,2}, Зайцев Д.В.^{1,2}**

1 - Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург;

2 - Уральский Государственный Горный Университет, Екатеринбург.



Постановка задачи

Разработка ресторативных материалов представляется важнейшей задачей биомедицинского материаловедения.

Биосовместимость и технологичность являются главными параметрами, определяющими перспективы материала для замены утраченных тканей организма человека.

Перспективным ресторативным материалом, отвечающим этим требованиям, является скорлупа куриных яиц, которая представляет собой минерал биологического генезиса.

В докладе рассмотрено деформационное поведение образцов, вырезанных из скорлупы птичьих яиц и приготовленных из измельченной куриной скорлупы методом компактирования.



Материал для исследования: скорлупа птичьих яиц

Куриные яйца куплены в супермаркете «Магнит» (Екатеринбург)



Куриные яйца
Gallus gallus domesticus

Куриные яйца на 95% состоят из карбоната кальция биологического происхождения.

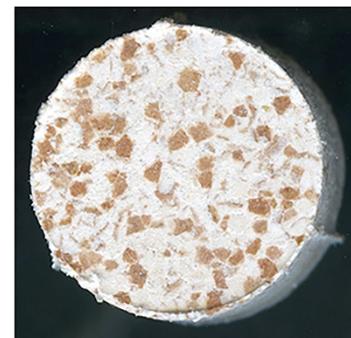
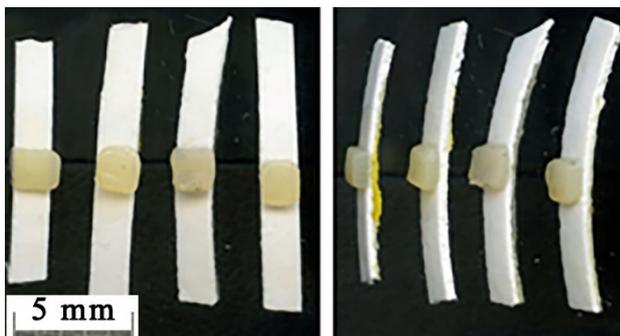
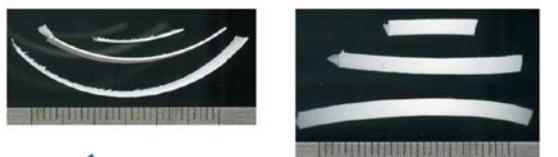
ЭТО БИОМИНЕРАЛ с «природными» поверхностями, образцы которого можно испытывать не обрабатывая поверхность

Схема приготовления образцов:

- (1) Фиксация яйца на подложке из монтажной пены;
- (2) Закрепление яйца на устройстве для резки и резка;
- (3) Аттестация образцов перед резкой.

Образцы «скорлупа – полимерная пломба»

Компактированные образцы из порошка скорлупы куриных яиц для испытаний на одноосное и диаметрально сжатие.



5 мм

Испытания образцов из скорлупы куриных яиц



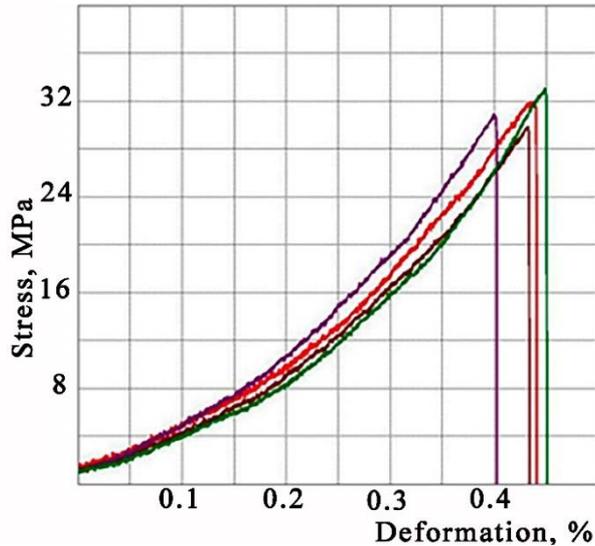
3-х точечный изгиб и сдвиг / срез
Shimadzu™ AG-X-50KN



Испытания на изгиб на
металлографическом
микроскопе МММ-8М

Механические свойства образцов из скорлупы куриных яиц

3-х точечный изгиб



куриных яиц

Сдвиг / срез



Курица: упругий модуль 15ГПа, предел прочности 28МПа при деформации 0.18%

Курица: модуль сдвига 0,13ГПа, прочность на сдвиг 12МПа при деформации 6%

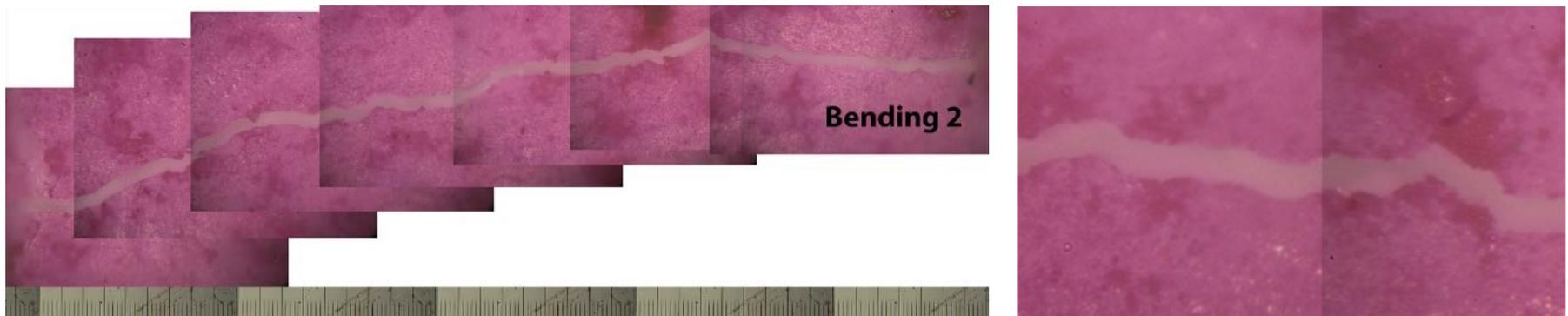
При изгибе лабораторные образцы, вырезанные из скорлупы куриных яиц, демонстрируют **хрупкое поведение**, тогда как при сдвиге они ведут себя как **вязкий материал**.



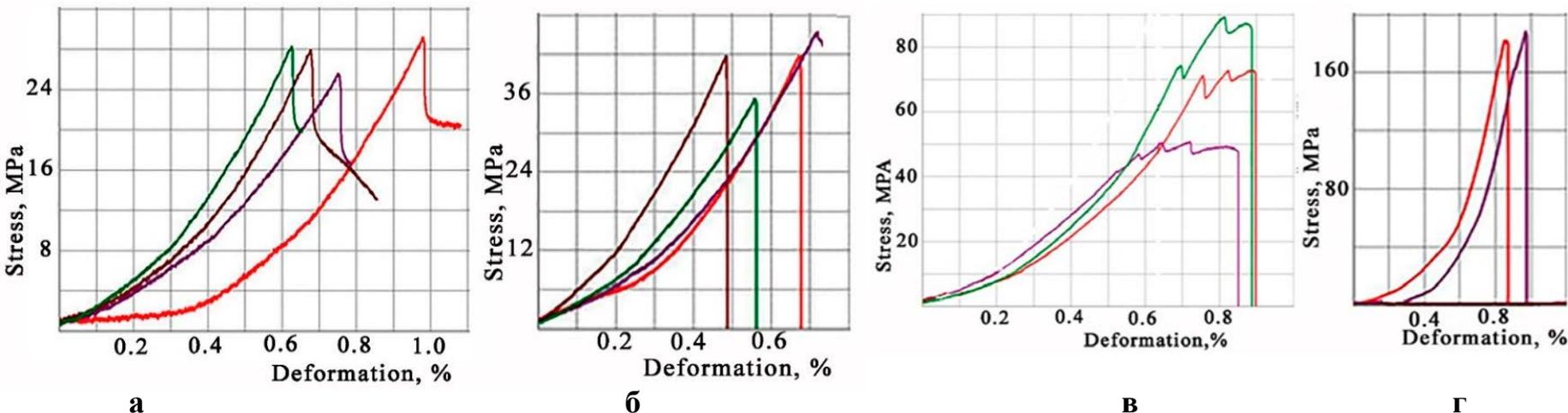
Развитие трещин в скорлупе куриных яиц при изгибе



Подрастание трещины при стреле прогиба 100 мкм



Механические свойства композитов «скорлупа – полимерная пломба» при изгибе



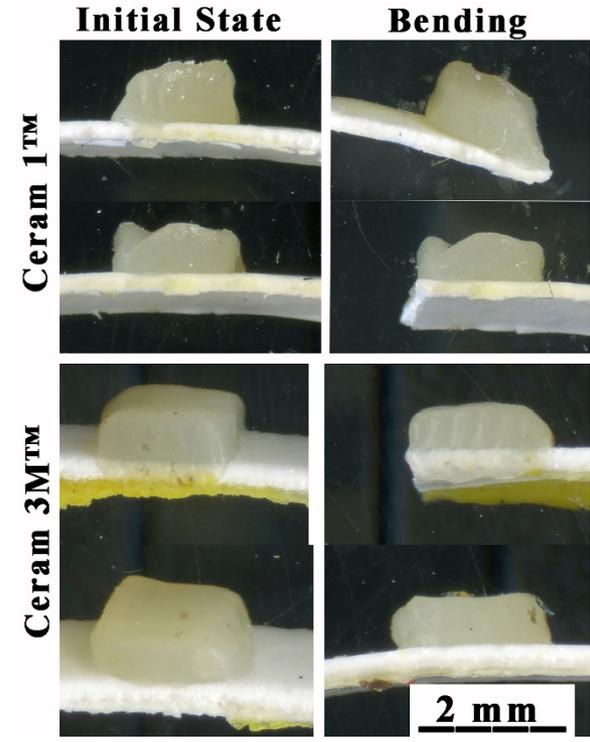
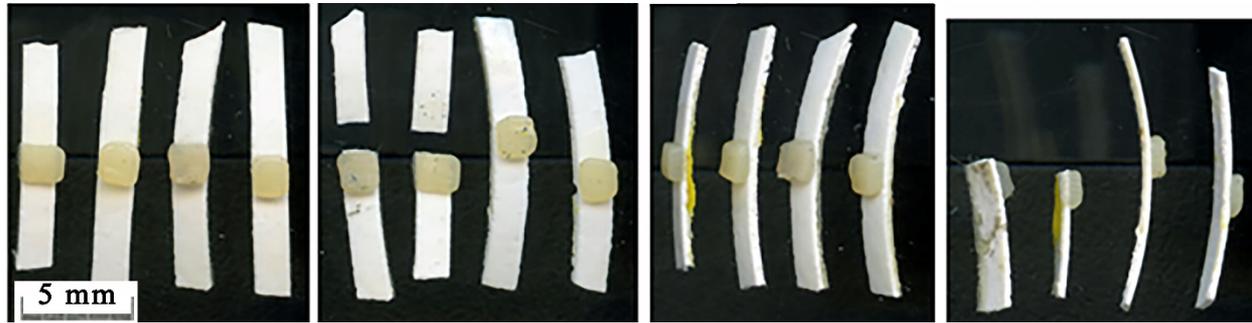
Деформационные кривые композита «скорлупа – полимерная пломба»: а - «Boston Arkona™»; б - «Ceram 1™»; в - «Ceram 3M™»; г - «DX Flow Composite™»

Set №	Samples	Elastic modulus, GPa	Deformation, %	Ultimate stress, MPa
1	Hen's eggshell 1	10	0.5	30
2	Hen's eggshell + plomb «Boston Arkona™»	10	0.6	60
3	Hen's eggshell + plomb «Ceram 1™»	9	0.6	40
4	Hen's eggshell + plomb «Ceram 3M™»	10	0.8	80
5	Hen's eggshell + plomb «DX Flow Composite™»	14	0.8	180

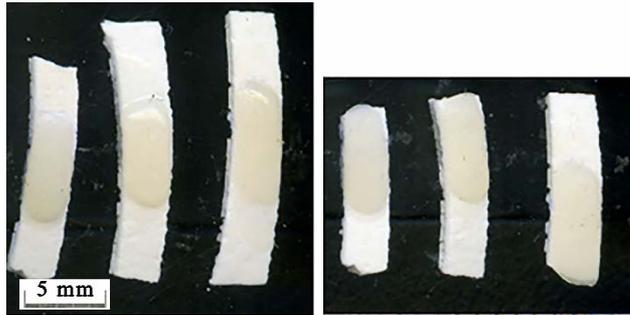


Разрушение композитов «скорлупа – полимерная пломба» при изгибе

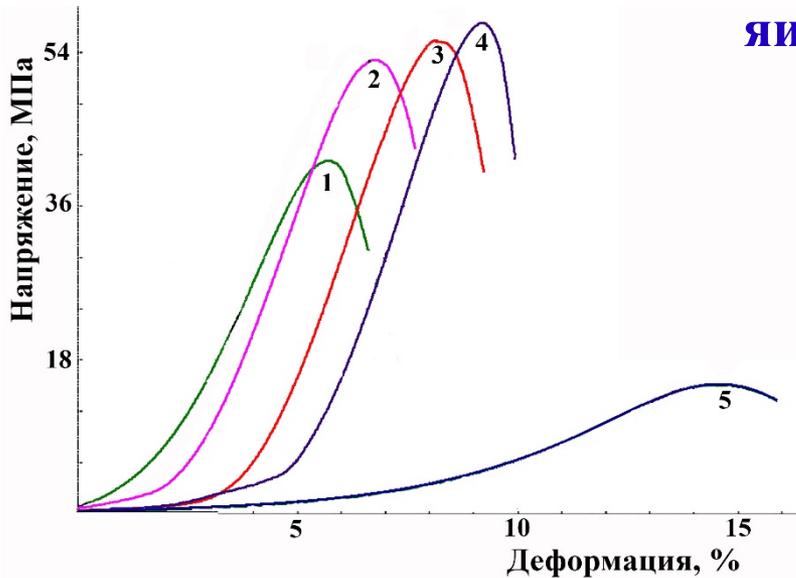
«Ceram 1™»



«DX Flow Composite™»



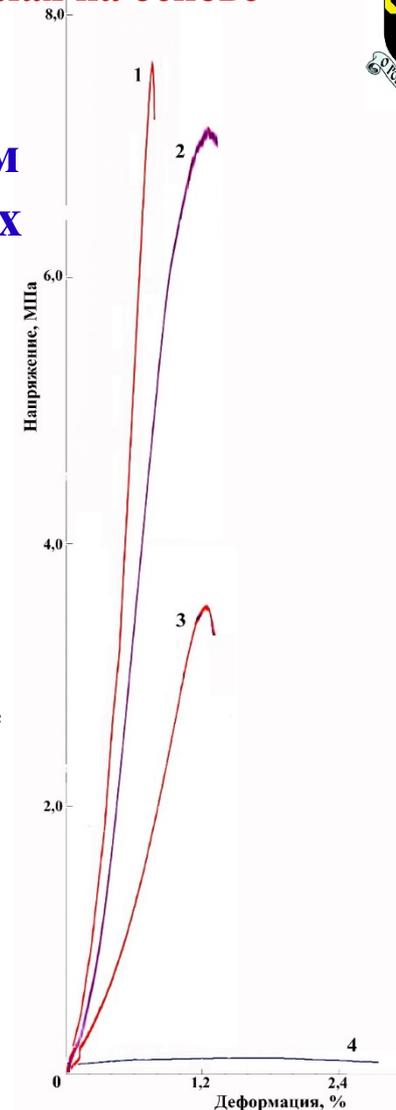
Деформационное поведение при одноосном сжатии и диаметральном сжатии (бразильском тесте) образцов из порошка скорлупы куриных яиц



Деформационные кривые при одноосном сжатии образцов из компактированного порошка куриной скорлупы: кривая 1 – связующее клей БФ6 (0,035 г клея на 1,4 г порошка); кривая 2 – связующее клей ПВА; кривая 3 – без связующего; кривая 4 – связующее силикатный клей; кривая 5 – связующее клей БФ6 (0,300 г клея на 1,4 г порошка).

При одноосном сжатии образцы из порошка скорлупы куриных яиц с малой концентрацией связующего демонстрируют вязкое поведение, а при диаметральном сжатии – хрупкое, то есть ведут себя как **ГОРНЫЕ ПОРОДЫ**

Деформационные кривые при диаметральном сжатии образцов из компактированного порошка куриной скорлупы: кривая 1 – связующее силикатный клей; кривая 2 – связующее клей ПВА; кривая 3 – связующее клей БФ-6 (0,035 г клея на 1,4 г порошка); кривая 4 – связующее клей БФ-6 (0,300 г клея на 1,4 г порошка).



Поведение образцов из порошка скорлупы куриных яиц с большой концентрацией связующего во всех случаях близко к **ПОВЕДЕНИЮ ВЯЗКИХ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ.**

Механические свойства образцов из порошка скорлупы куриных яиц при одноосном сжатии и диаметральном сжатии

Материал	Упругий модуль, МПа	Предел прочности, МПа	Предельная деформация, %
Одноосное сжатие			
Компактирование без связи	50	10	5,20
Компактирование с клеем БФ-6	40	9	5,00
Компактирование с клеем ПВА	50	9	5,20
Компактирование с силикатным клеем	60	11	5,20
Диаметральное сжатие (бразильский тест)			
Компактирование без связи	3,3	0,6	0,7
Компактирование с клеем БФ-6	3,7	1,1	0,4
Компактирование с клеем ПВА	8,5	1,3	0,7
Компактирование с силикатным клеем	7,9	1,3	0,7

Разрушение образцов из порошка скорлупы куриных яиц при одноосном и диаметральной сжатии

Без связующего



5 мм

Клей БФ-06



5 мм

Клей ПВА



5 мм

Силикатный клей



5 мм

Образцы после
испытаний на
одноосное сжатие: без
связующего; связка –
клей БФ - 6; связка –
клей ПВА; связка –
клей силикатный.

Без связующего



5 мм

Клей БФ-6



5 мм

Клей ПВА



5 мм

Силикатный клей



5 мм

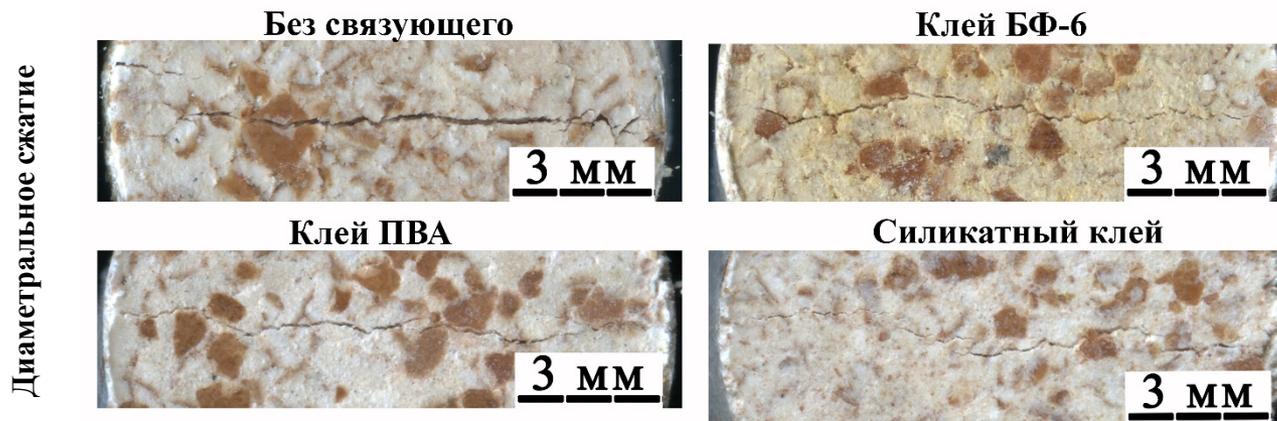
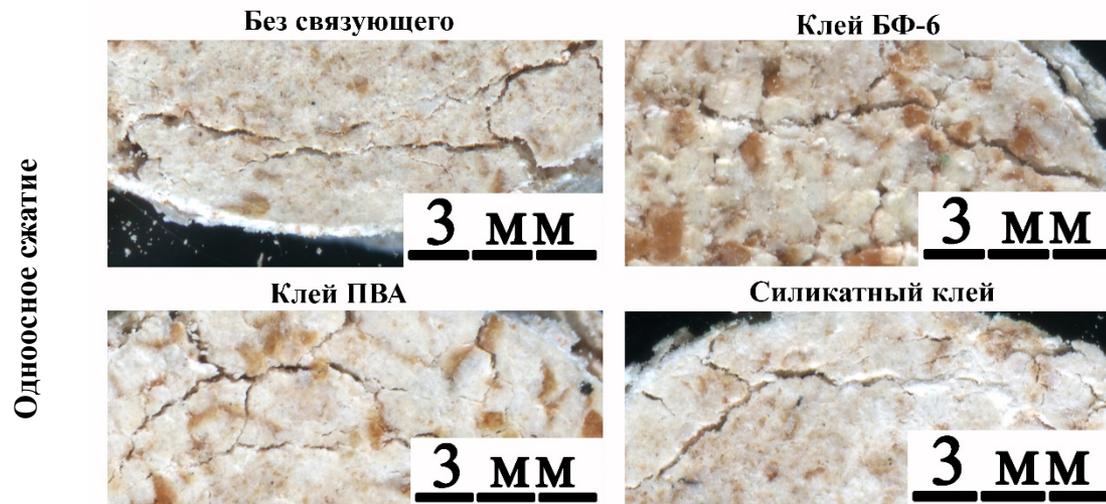
Образцы после
испытаний на
диаметральное сжатие:
без связующего; связка –
клей БФ - 6; связка –
клей ПВА; связка –
клей силикатный.

Траектория опасной трещины определяется геометрией приложенной нагрузки,
как в хрупком материале



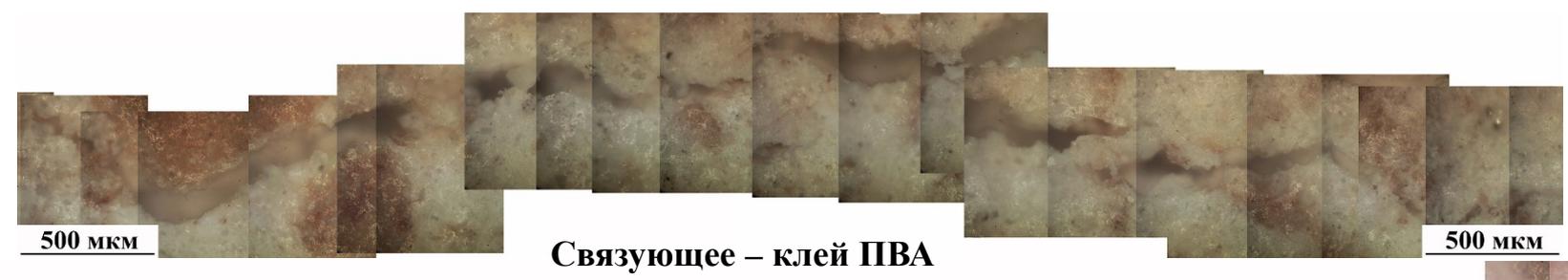
О механизмах аккомодации напряжений в материалах на основе биоминерала

Опасные трещины в образцах из порошка скорлупы куриных яиц при одноосном и диаметральном сжатии



Рост опасных трещин в образцах из порошка скорлупы куриных яиц заторможен, что указывает на значительный вклад вязкости в их деформационное поведение

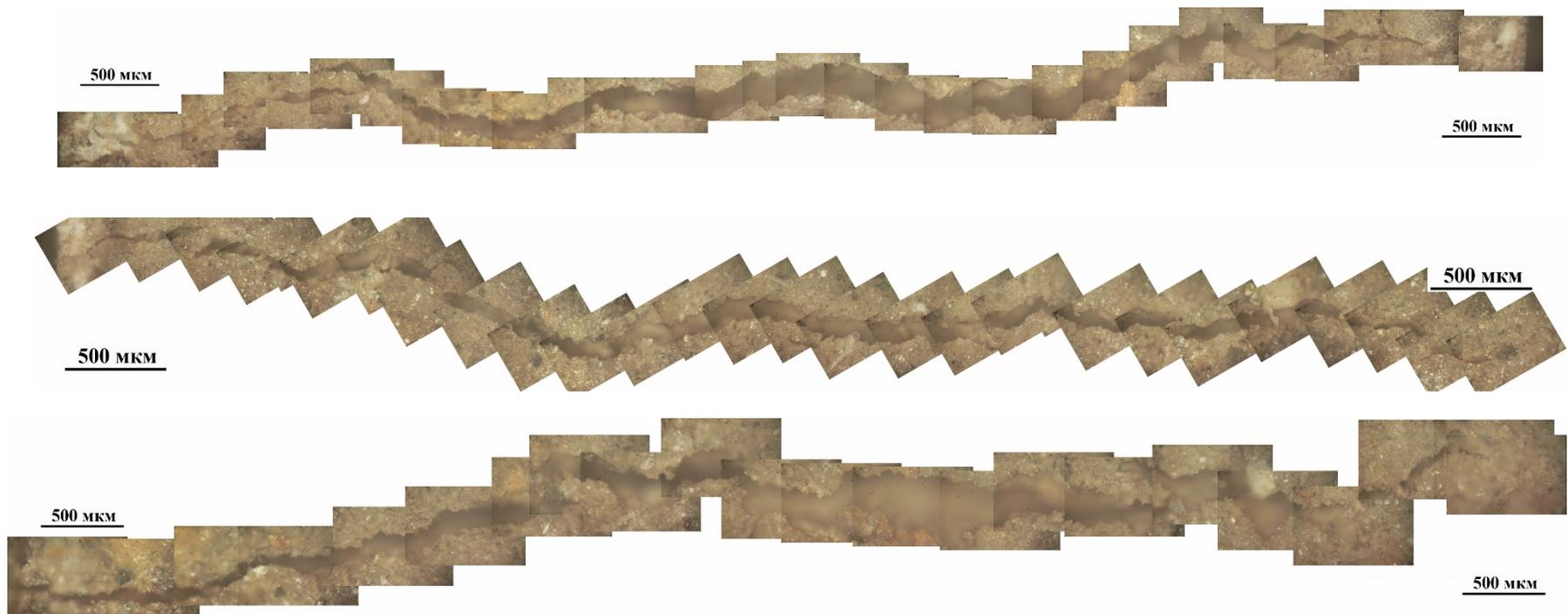
Трещины в образцах из порошка скорлупы куриных яиц при диаметральной сжатии



**Рост трещин в образцах из порошка скорлупы
куриных яиц заторможен, что указывает на
значительный вклад вязкости в их деформационное
поведение**

О механизмах аккомодации напряжений в материалах на основе биоминерала

Трещины в образцах компактированного глинистого грунта при диаметральном сжатии



Рост трещин в образцах из порошка скорлупы куриных яиц заторможен, что указывает на значительный вклад вязкости в их деформационное поведение



Трещины в сиените при 3-х точечном изгибе на воздухе



Рост трещин в образцах из порошка скорлупы куриных яиц заторможен, что указывает на значительный вклад вязкости в их деформационное поведение

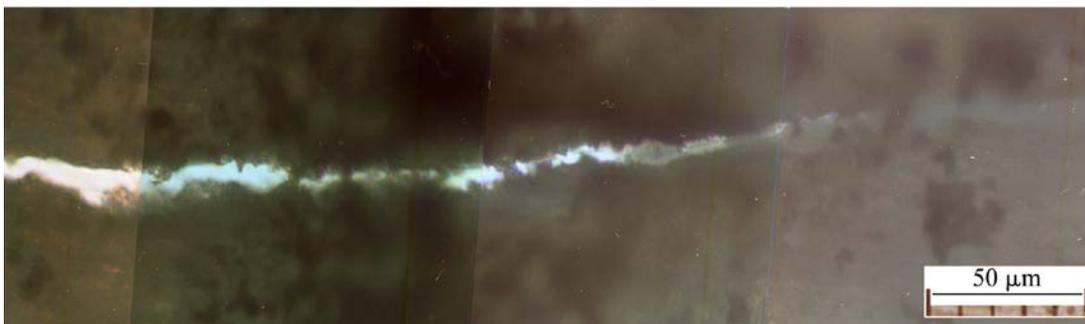
Трещины в тонких образцах дентина и эмали зубов человека



Трещины в тонких
образцах дентина зубов
человека (оптический
микроскоп в режиме «на
просвет»)



Трещина в тонком
образце эмали зубов
человека (оптический
микроскоп в режиме
«на просвет»)



**Рост трещин в образцах из порошка скорлупы куриных яиц заторможен, что указывает на
значительный вклад вязкости в их деформационное поведение**

Заключение

- Тип деформационного поведения биоминерала – скорлупы птичьих яиц на макроскопическом уровне определяется долей растягивающих напряжений в схеме нагружения и меняется от хрупкого при изгибе и диаметральной сжатии до вязкого при одноосном сжатии и срезе;
- На микроскопическом масштабе, поведение всех модельных материалов было аттестовано как вязкое при всех схемах нагружения.

Спасибо за внимание!

