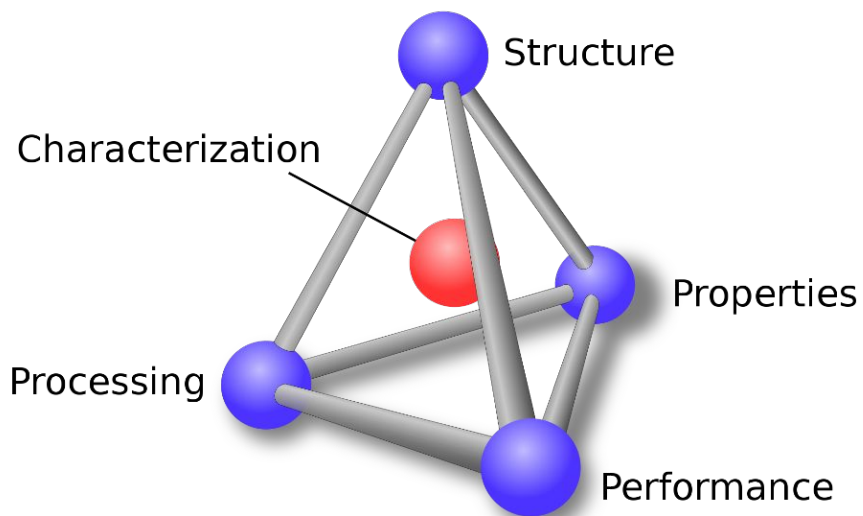


Материаловедение и науки о Земле

Роман Васин

ЛНФ ОИЯИ, 22.11.2022

Материалы



- ✓ Медицина
- ✓ Экология
- ✓ Энергетика
- ✓ Строительство
- ✓ Машиностроение
- ✓ ...

- ✓ Полимеры
- ✓ Металлы и сплавы
- ✓ Стёкла
- ✓ Бетон
- ✓ Керамики
- ✓ Композиты
- ✓ ...

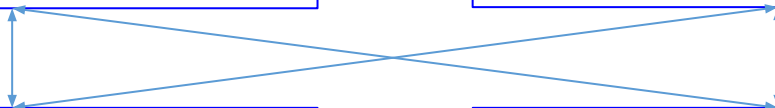
- ✓ Дифракция (...)
- ✓ Радиография (...)
- ✓ Малоугловое рассеяние (...)
- ✓ Рефлектометрия (...)
- ✓ ...

«Классические» материалы

Новые материалы

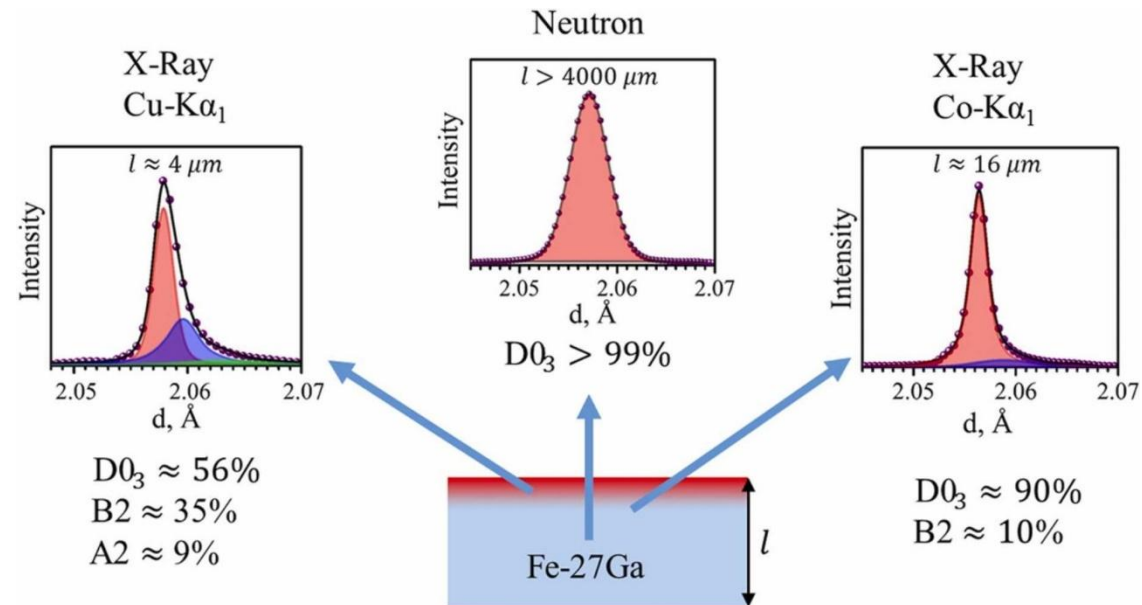
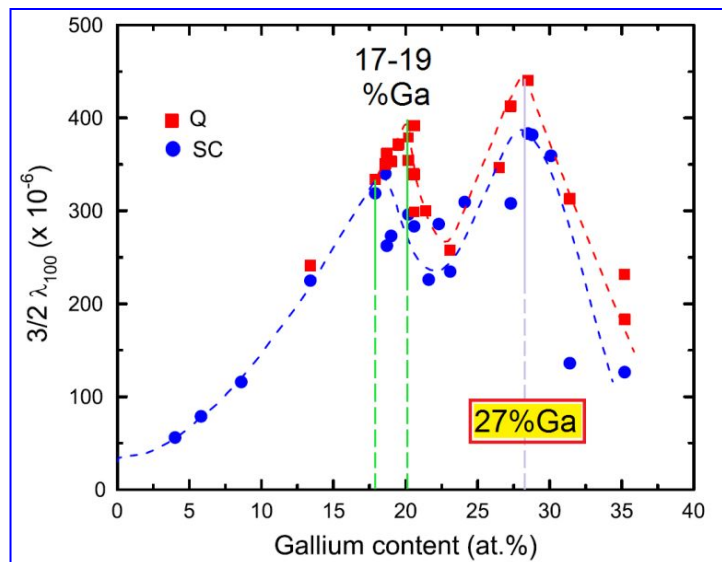
«Классические» методы
производства/обработки

Новые методы
производства/обработки



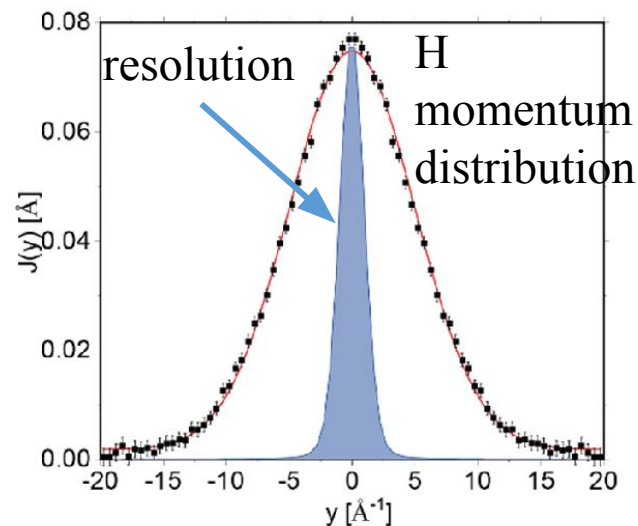
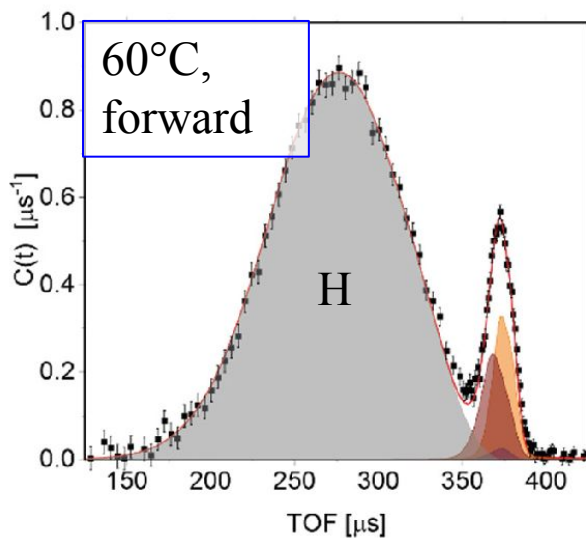
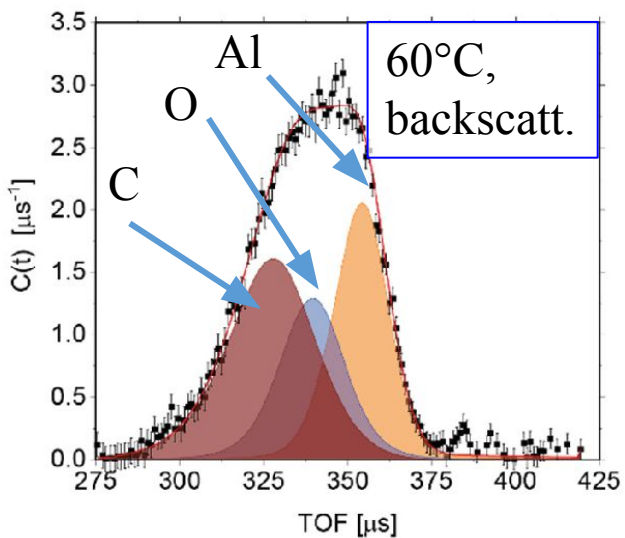
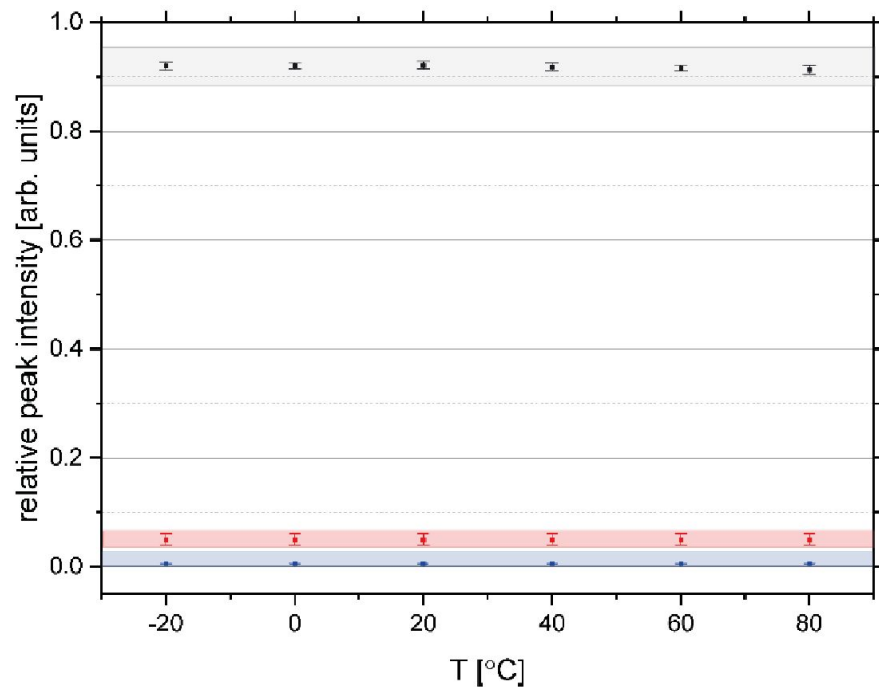
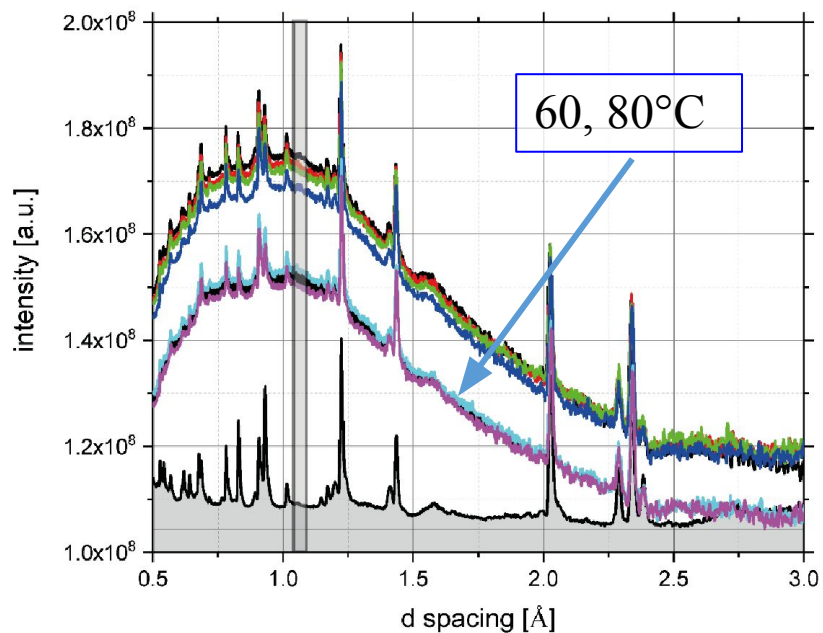
Преимущества (дифракции нейтронов)

- Измерение объёмных образцов (образцы с линейными размерами несколько см, gauge volume внутри объёма образца)
- Часто не требуется специальная подготовка образца (уникальные материалы, культурное наследие)
- Отличное разрешение и симметричная форма пиков при использовании TOF фурье-дифрактометрии (распределение кристаллитов по форме/размеру, типы дислокаций, дефекты упаковки, ...).
- Магнитный момент (core-shell модели магнитных наночастиц, магнитные текстуры)
- Чувствительность к водороду, изотопам



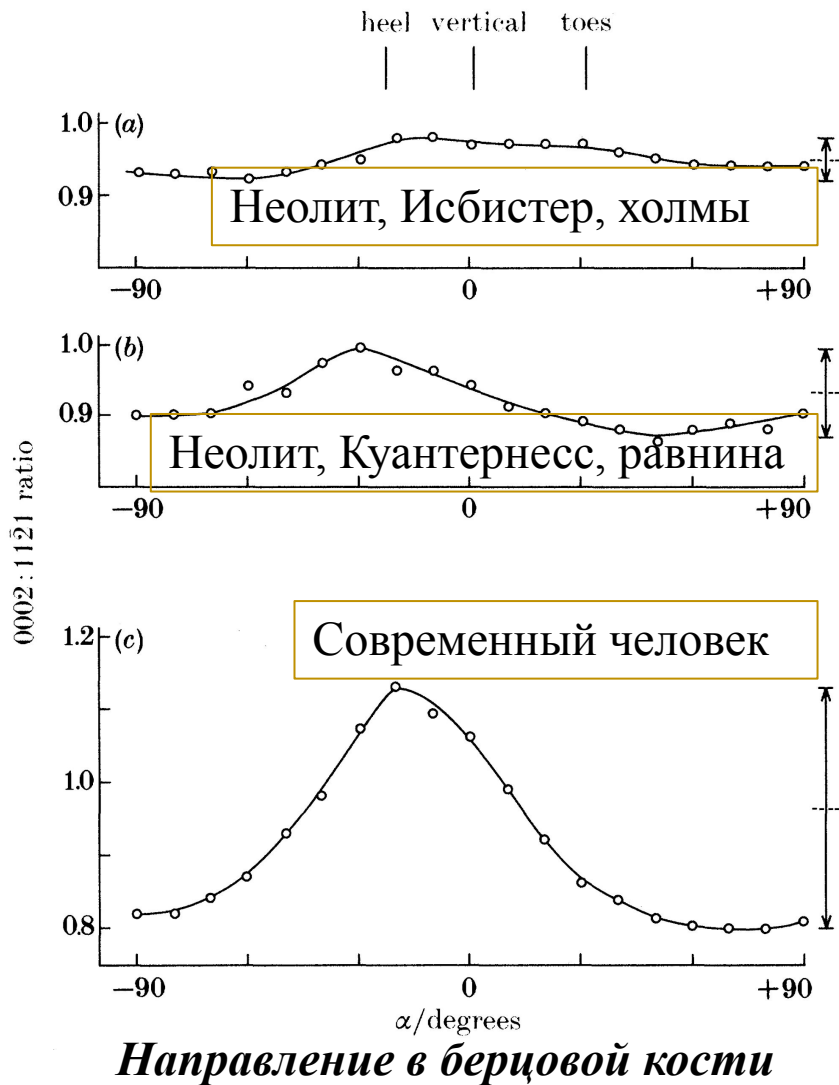
Материалы для... еды: варим рисовую лапшу

«Контроль качества» замороженной или сублимированной еды.

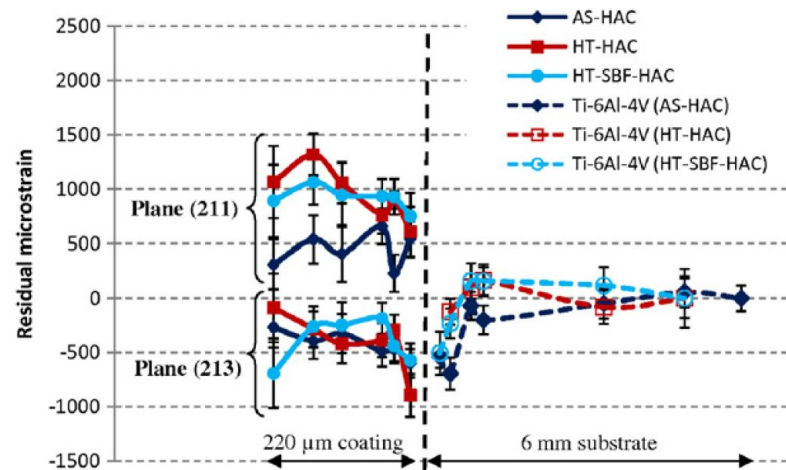
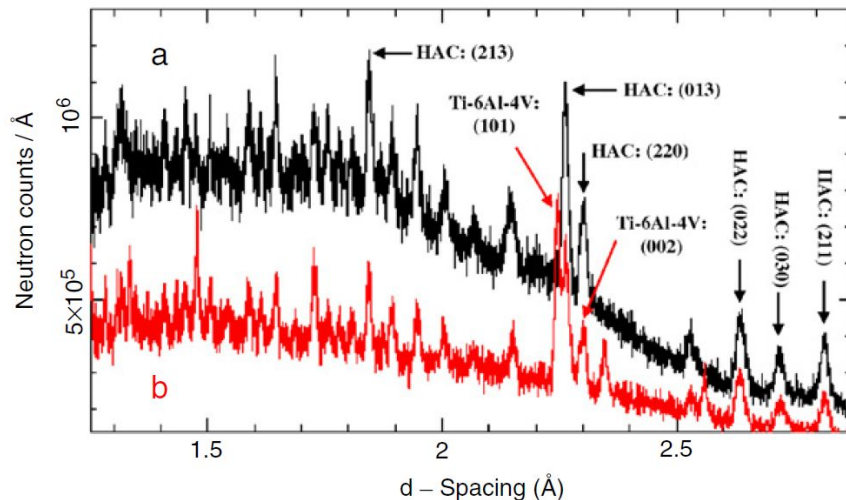


Структура костей, импланты, срастание...

Гидроксиапатит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ – основной минеральный компонент костей и зубов.



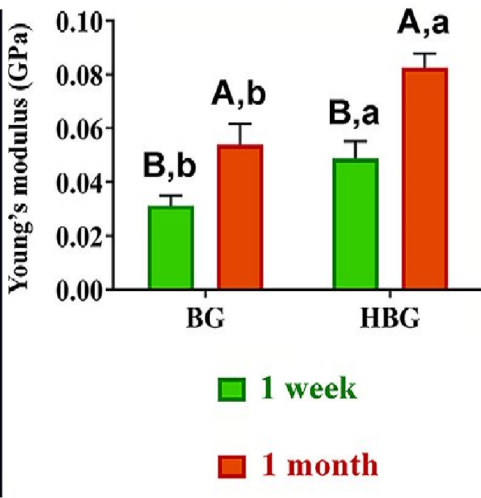
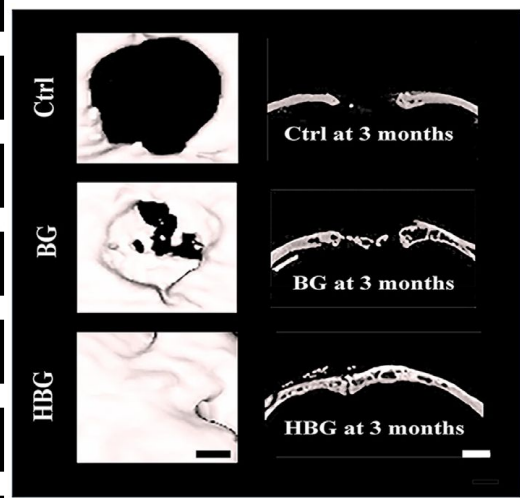
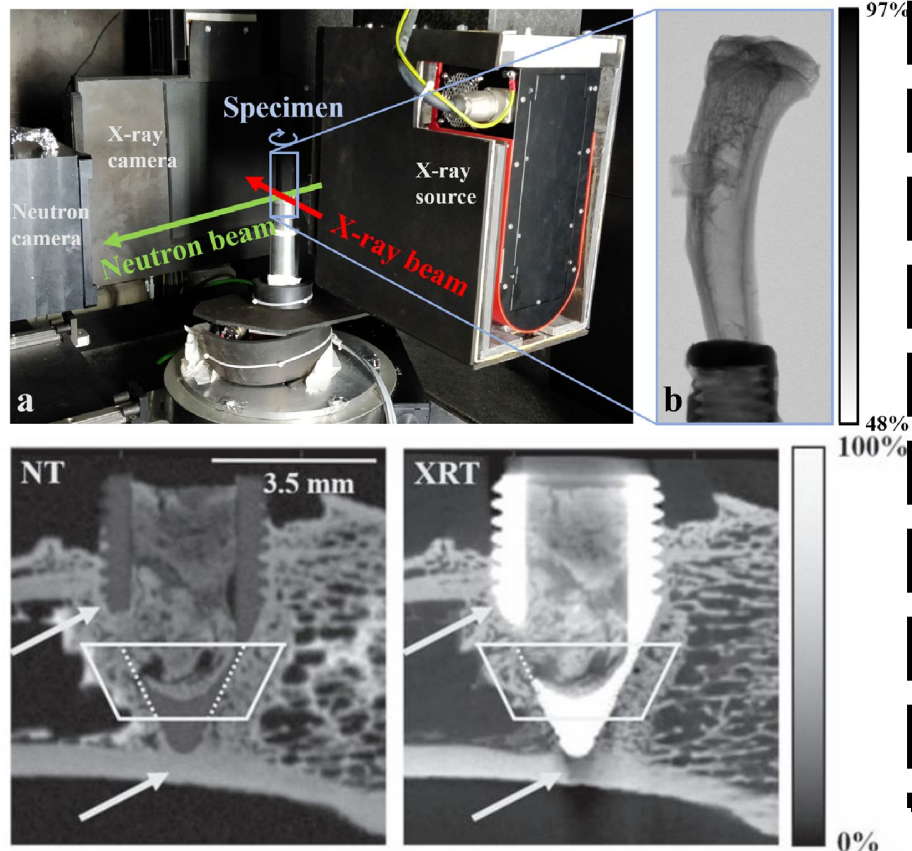
Ортопедический имплант: ГА на Ti-6Al-4V



Стабильность структуры? Прочность?

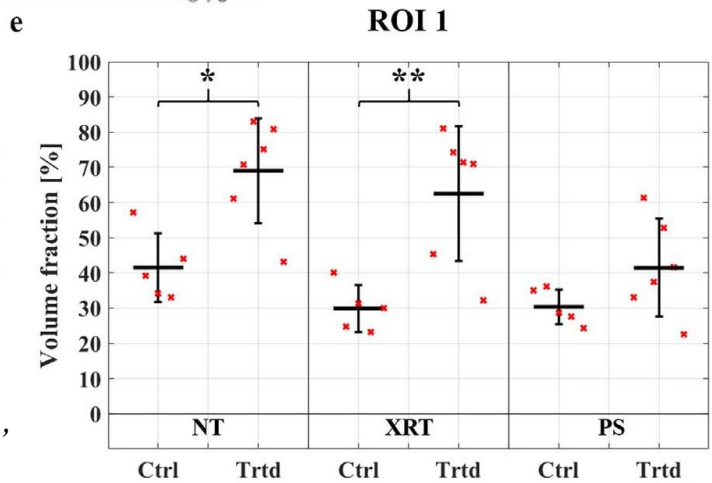
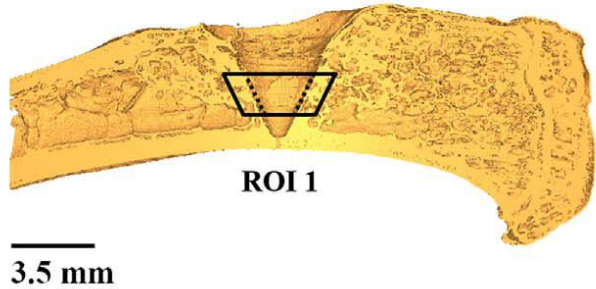
Структура костей, импланты, срастание...

Самоминерализующиеся резорбируемые мембраны: добавка полиакриловой кислоты с высоким молекулярным весом.



J. Li et al. (2021) Acta Biomater., 10.1016/j.actbio.2021.02.012

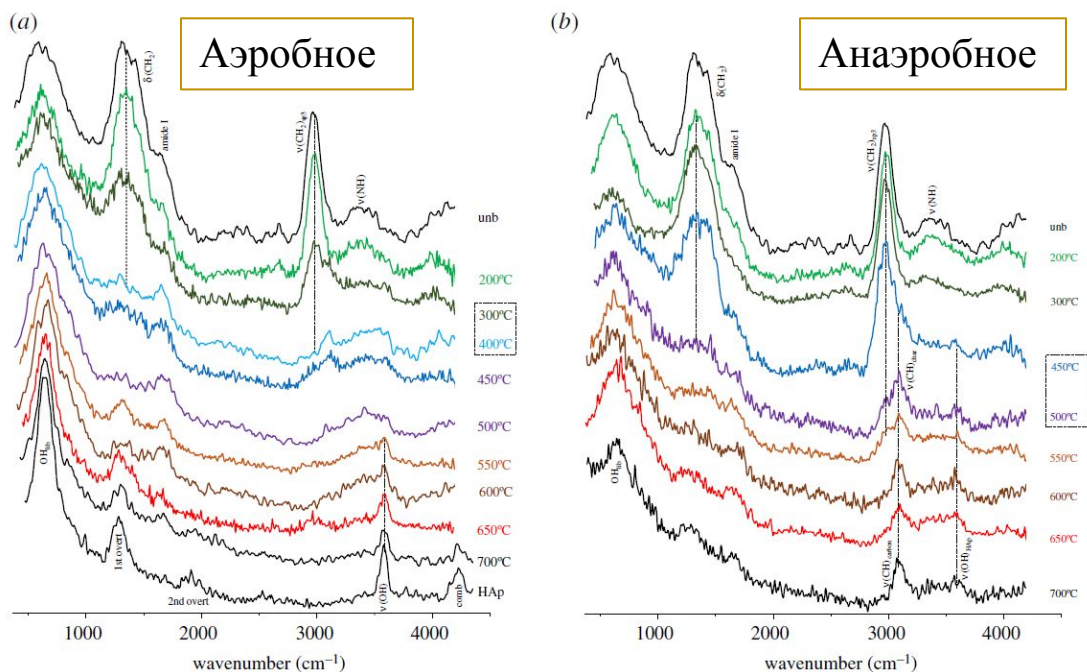
a NT - Trtd



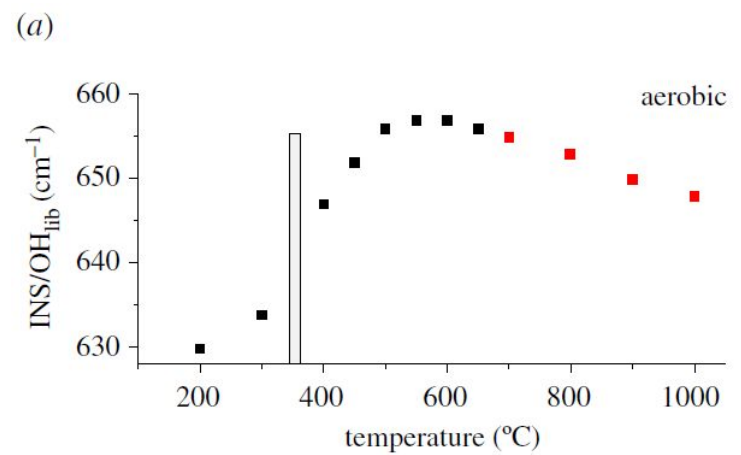
Объем костяной ткани вблизи импланта:
 Ctrl = контрольная группа
 Trtd = получили золедроновую кислоту + костный морфогенетический белок 2

E. Törnquist et al. (2021) Phys. Med. Biol., 10.1088/1361-6560/ac02d4

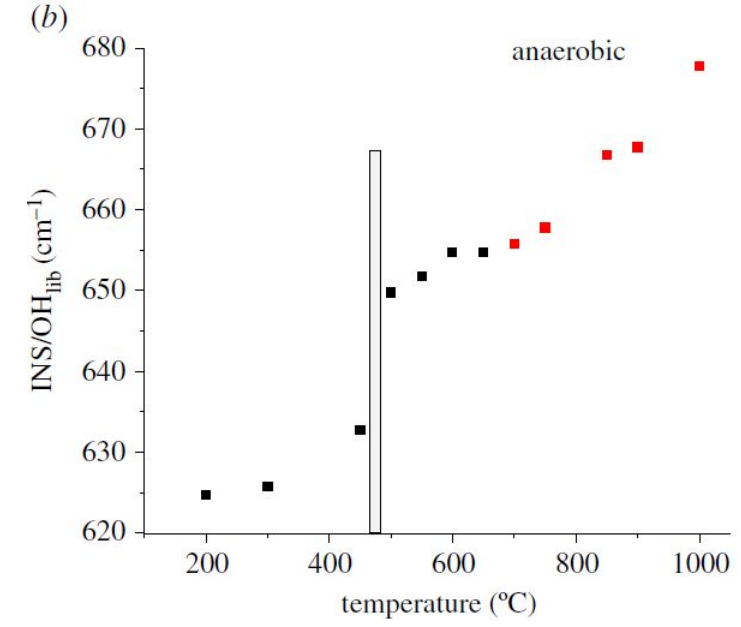
Динамика гидроксиапатита: сжигаем бедренную кость



Археология, судебная медицина



Частота либрации гидроксогрупп

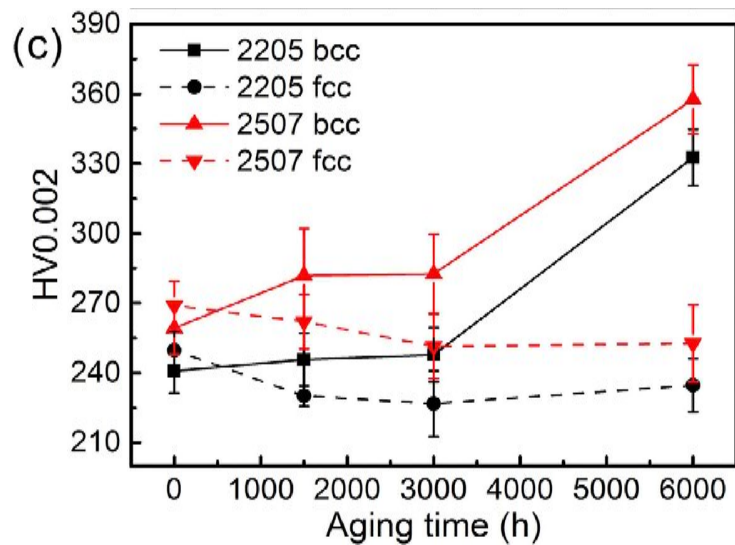
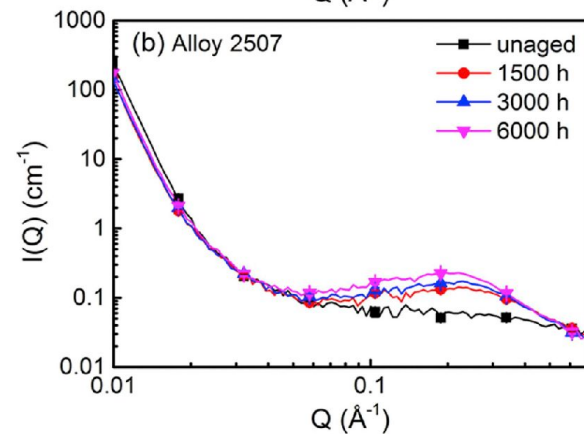
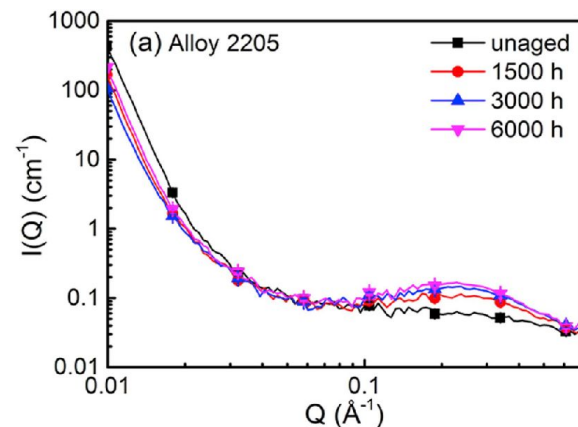
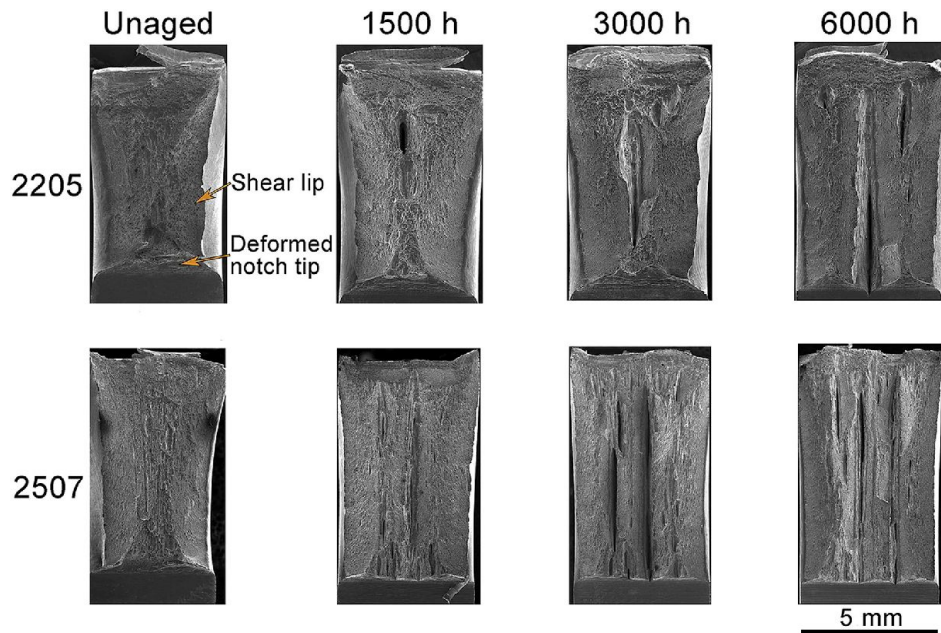


| vibrational band | wavenumber (cm ⁻¹) | observed by | burning conditions | |
|--|--------------------------------|-------------|--------------------|-----------|
| | | | aerobic | anaerobic |
| $\tau(\text{CH}_3)_{\text{protein}}$ | 250 | INS | 200°C | ≤450°C |
| $(\text{OH})_{\text{lib}}$ | 640–660 | INS | ≤650°C | ≤650°C |
| $\delta(\text{N}-\text{C}\equiv\text{N})_{\text{cyanamide}}$ | 700 | FTIR | not detected | ≥650°C |
| $\nu_3(\text{CO}_3)$ | ca 1450 | FTIR | ≤300°C | ≤600°C |
| $\delta(\text{CH}_2)_{\text{lipids/proteins}}$ | 1400–1500 | FTIR, INS | ≤300°C | ≤450°C |
| $\delta(\text{NH}) + \nu(\text{CN})_{\text{protein/amide II}}$ | 1550 | FTIR, INS | 200°C | ≤400°C |
| $\delta(\text{C}=\text{O})_{\text{protein/amide I}}$ | 1650 | FTIR, INS | ≤400–450°C | ≤650°C |
| $\nu(\text{C}\equiv\text{N})_{\text{cyanamide}}$ | 2009 | FTIR | not detected | ≥650°C |
| $\nu(\text{CH}_2)_{\text{sp}^3}$ | 2980 | INS | 200–300°C | 200–450°C |
| $\nu(\text{CH}_2)_{\text{sp}^2}$ | 3090–3100 | INS | 300–450°C | 450–650°C |
| $\nu(\text{NH})_{\text{protein/amide A}}$ | ca 3280 | FTIR, INS | ≤300°C | ≤550°C |
| $\nu(\text{NH})/\nu(\text{OH})_{\text{HAP-disorg}}$ | ca 3360 | FTIR | ≥300°C | ≥550°C |
| $\nu(\text{OH})_{\text{HAP}}$ | 3570 | FTIR, INS | ≥300°C | ≥300°C |

M.P.M. Marques et al. (2021) R. Soc. Open Sci., 10.1098/rsos.210774

Duplex stainless steels (DSSs)

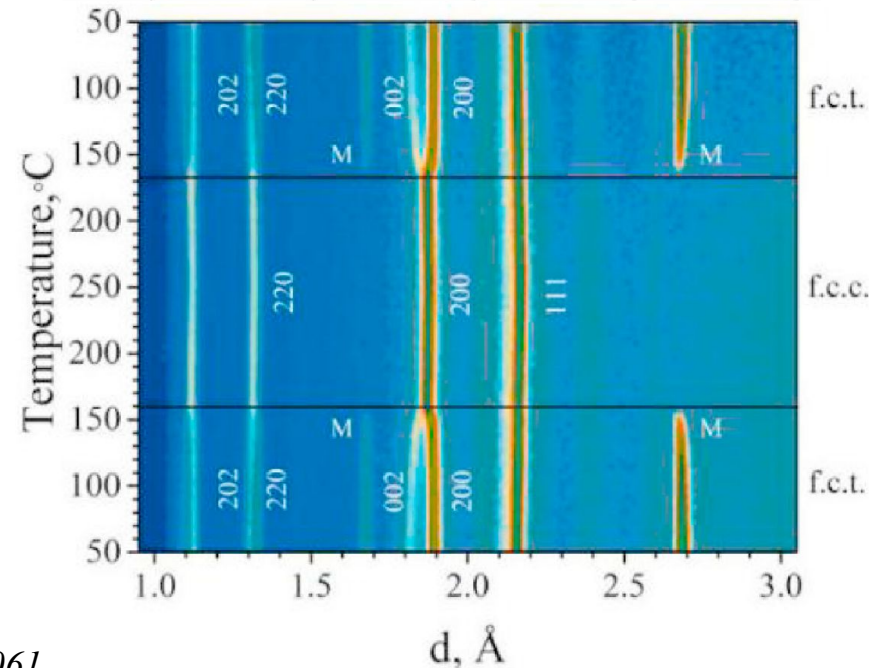
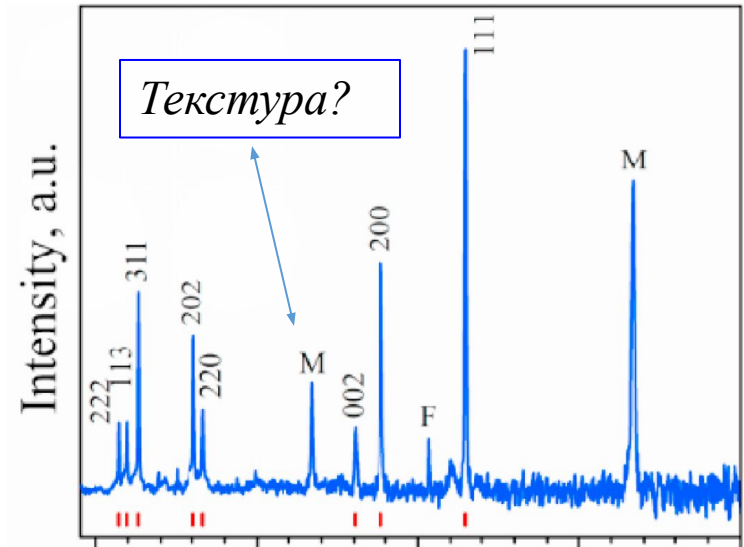
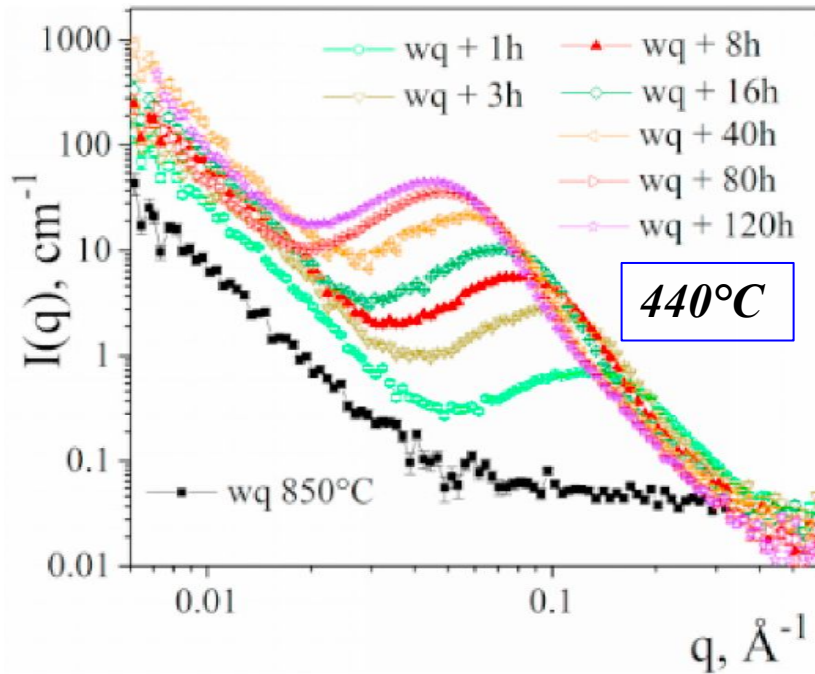
Феррит + аустенит; превосходная прочность и устойчивость к агрессивным средам (химическая, нефтегазовая промышленность, энергетика, ...).



- Разные механизмы охрупчивания в зависимости от T ?
- Фазовый переход в феррите при высоких T : спинодальный распад или ОРЗ?

Спинодальный распад в Mn-Cu

Демпфирующие свойства, эффект памяти формы, отличная прочность, пластичность



- *Расслоение на Mn-матрицу (3.5-6.5 ат.%Cu) + кластеры (40-46 ат.%Cu)*
- *Увеличение T или $t \rightarrow$ увеличение объёма кластеров до $\sim 200 \text{ нм}^3$*
- *Объёмная доля кластеров $\approx 24-26\%$*
- *α -Mn появляется при максимальных T или t*

Большое количество образцов!

MnCu и NiMnGa сплавы

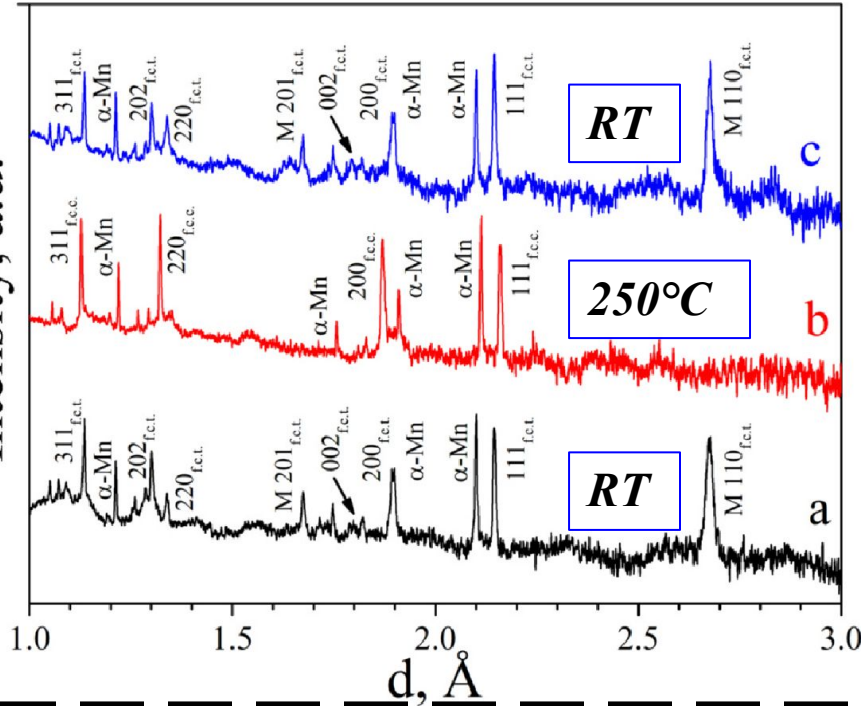
Mn-10Cu-4Cr aged for 8 h at 440°C

Интегральные ширины пиков

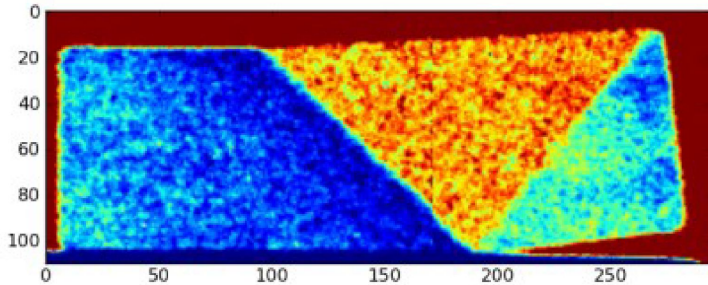
| | RT | 250°C | RT after 2c |
|------------------------|------------|------------|-------------|
| 110 _{FCT} (m) | 0.0301(72) | - | 0.0213(36) |
| 111 _{FCT/FCC} | 0.0084(8) | 0.0097(10) | 0.0126(76) |
| 330 _{α-Mn} | 0.0083(17) | 0.0075(14) | 0.0084(17) |
| 201 _{FCT} (m) | 0.0113(43) | - | 0.0144(144) |

L. Sun et al. (2021). J. Alloys Compd., 10.1016/j.jallcom.2021.161082

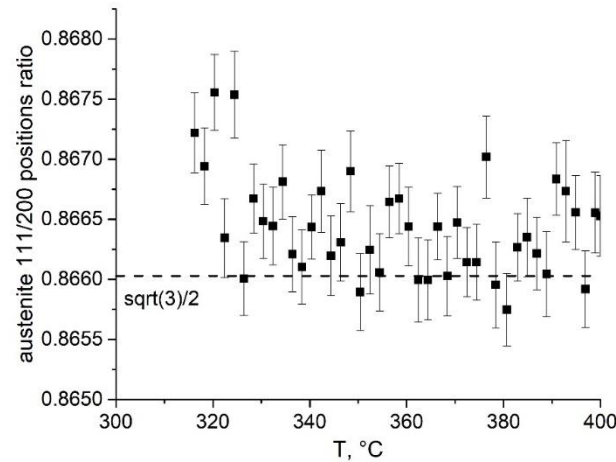
Intensity, a.u.



NiMnGa – магнитные сплавы с памятью формы.

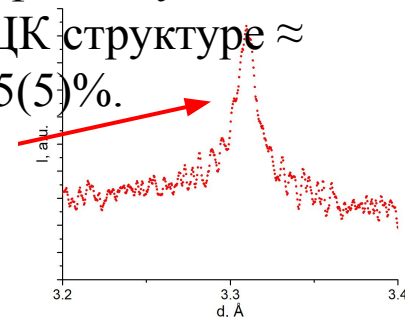


S. Kabra et al. (2016). J. Phys.: Conf. Ser., 10.1088/1742-6596/746/1/012056



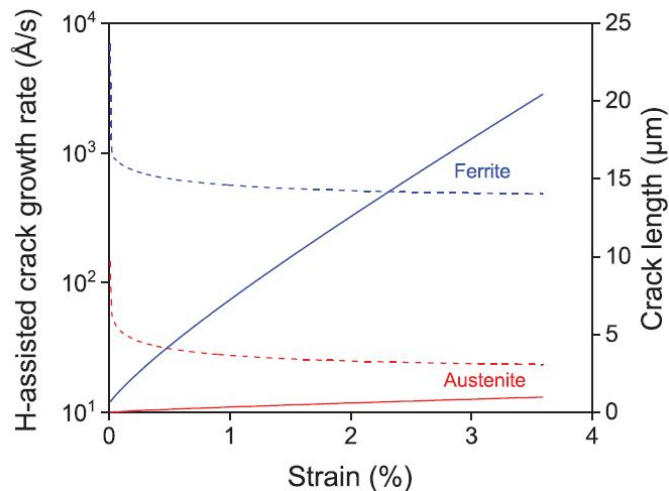
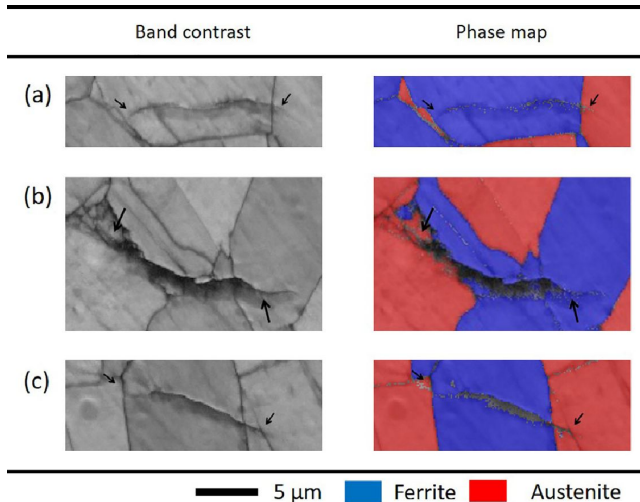
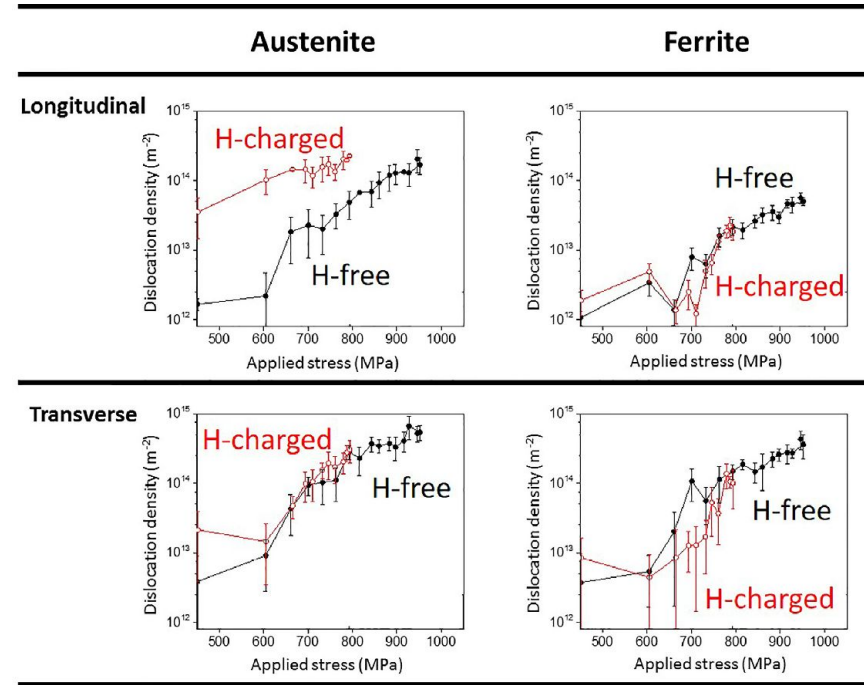
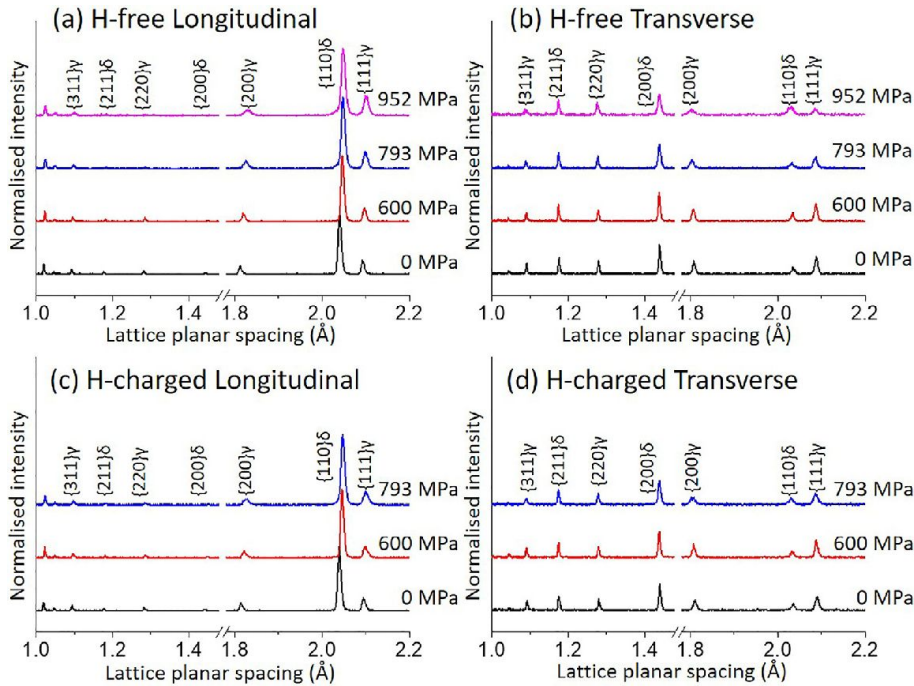
Ni_{2.36}Mn_{0.64}Ga_{1.0}

Средняя вероятность дефектов упаковки в ГЦК структуре ≈ 0.5(5)%.



Super duplex stainless steels (SDSSs)

Изучение механизма водородного охрупчивания

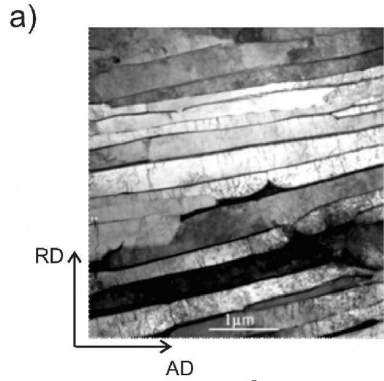


X.Z. Liang et al. (2020)
Materialia,
10.1016/j.mta.2019.100524

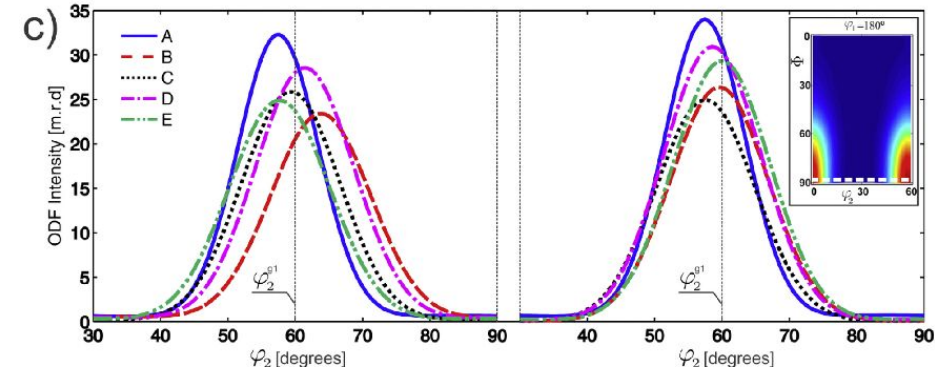
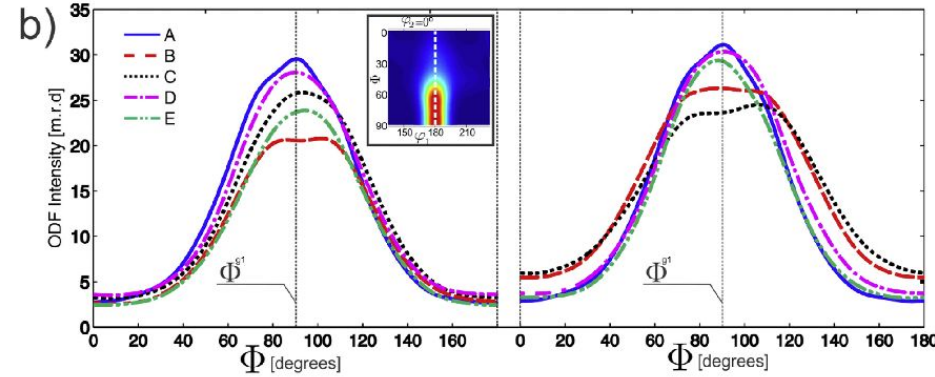
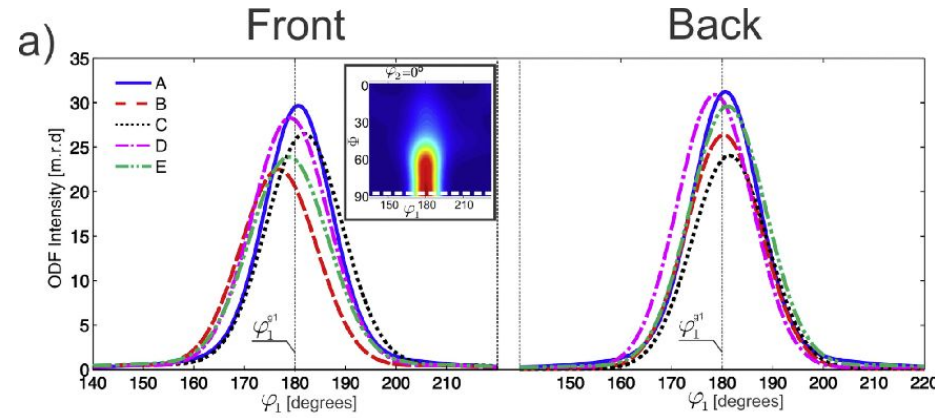
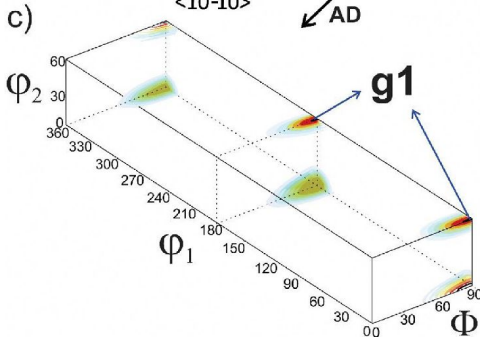
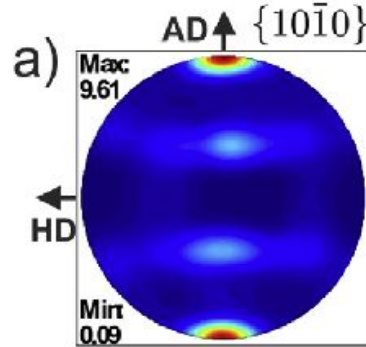
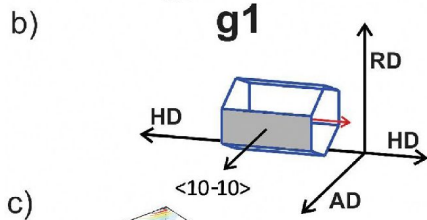
Циркониевые сплавы

CANDU pressure tubes, Zr+2.5%Nb:

- 1) an extrusion step at ~ 800 C;
- 2) air cooling down to room temperature;
- 3) cold-pilgerolling ($\sim 30\%$ reduction);
- 4) a final thermal treatment (autoclaving) at 400 C for 24 h.



Measurement time:
 HIPPO ~ 0.5 h
 Engin-X ~ 0.5 h**
 SKAT ~ 1 d
 NTD ~ 2 h per PF
 Kowari ~ 8 h for 6 PF



«Библейские» монеты

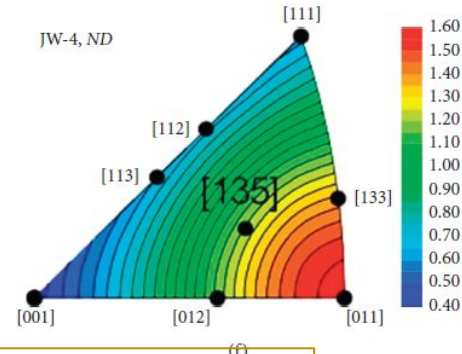
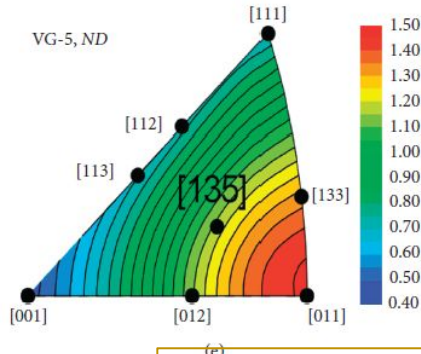
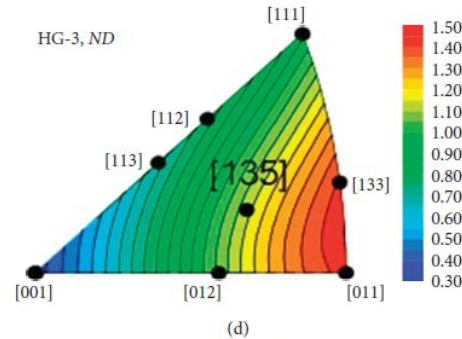
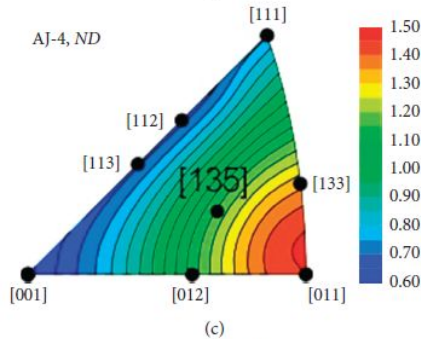
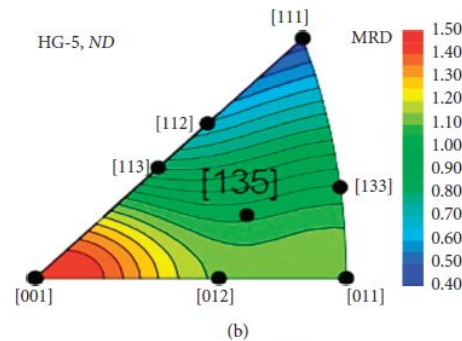
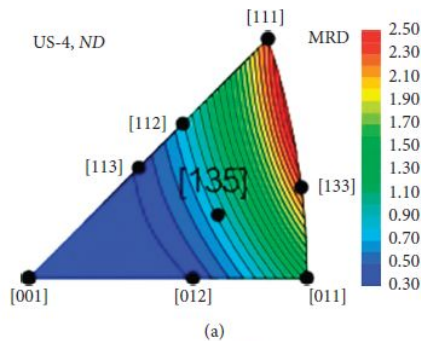
Бронзовые монеты, территория Израиля, ≈ 135 г. до н.э. – 70 г. н.э.

«Пустая»
отлитая
заготовка



Чеканка

Чеканка



Чеканка +
рекристаллизация
(«горячая»)

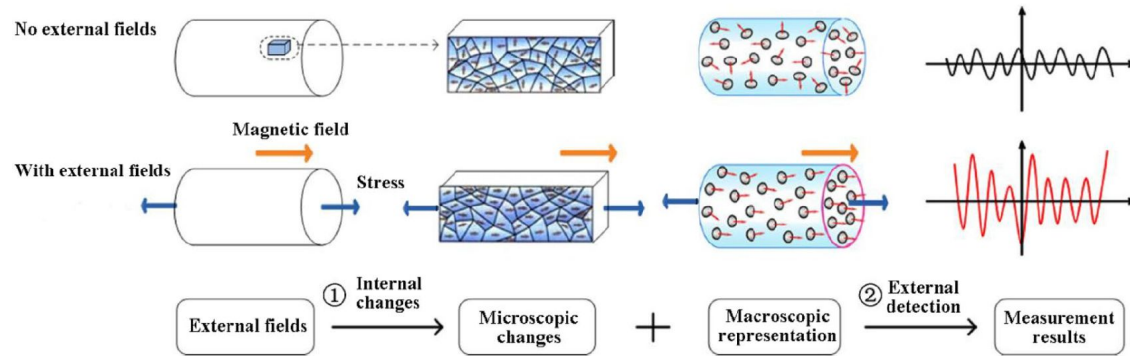
Чеканка

Микроструктура
«горячей» чеканки,
но ИПФ
«холодной».
Повторная чеканка?

ИПФ направления чеканки

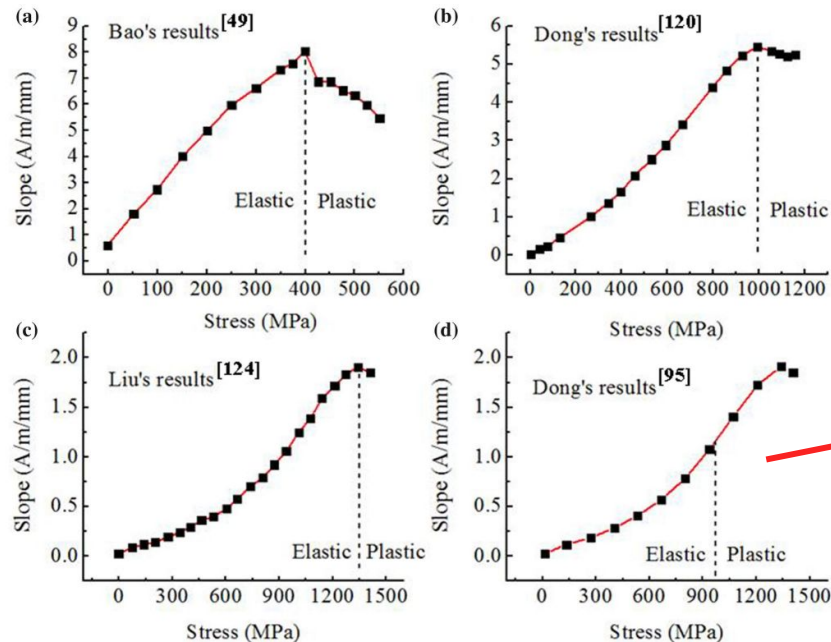
Магнитная память металла

«Магнитная память металла» - эффект «памяти» деформации металла, заключающийся в возникновении высокой намагниченности металла в магнитном поле Земли в зонах больших деформаций, обусловленных действием механических нагрузок и появлением ориентированных внутренних напряжений (А.А. Дубов, 1994).
Используется как метод неразрушающего контроля состояния конструкций.

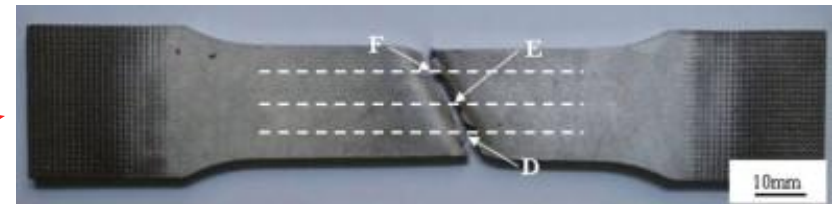


S. Bao et al. (2020) J. Nondestruct. Eval., 10.1007/s10921-020-0652-z

C.L. Shi et al. (2010) J. Magn. Magn. Mater., 10.1016/j.jmmm.2009.09.066



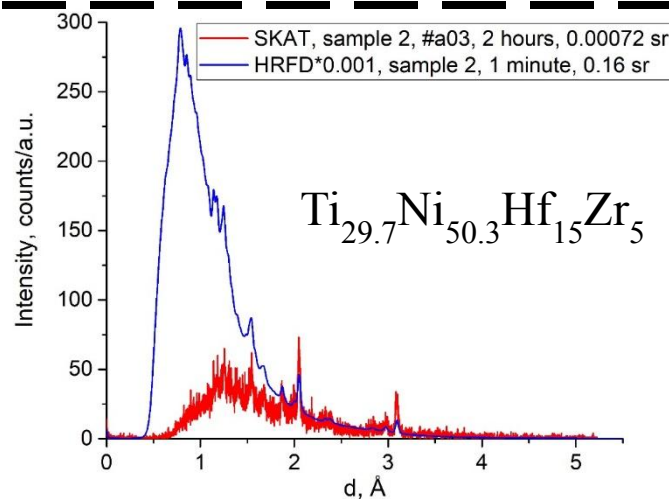
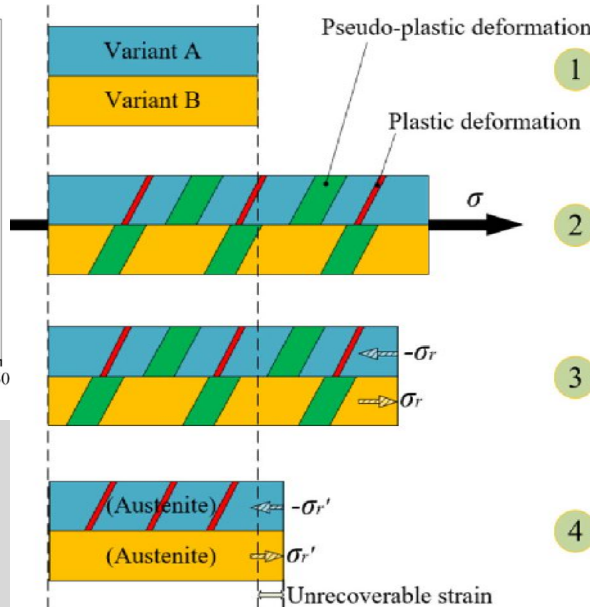
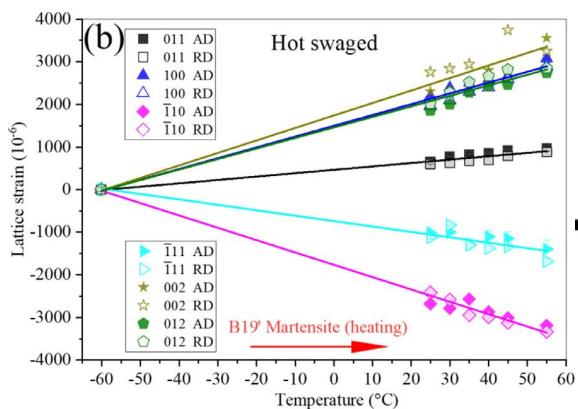
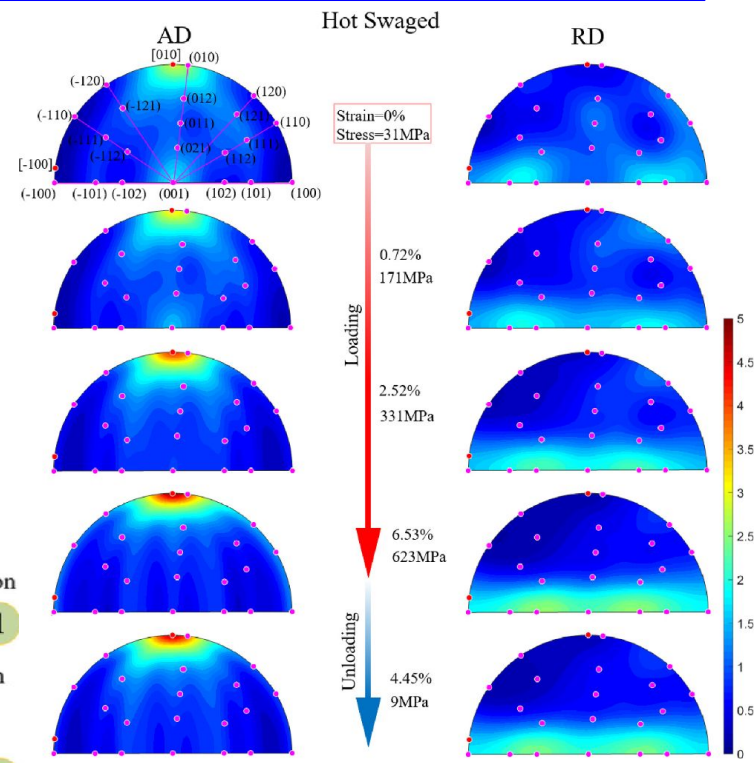
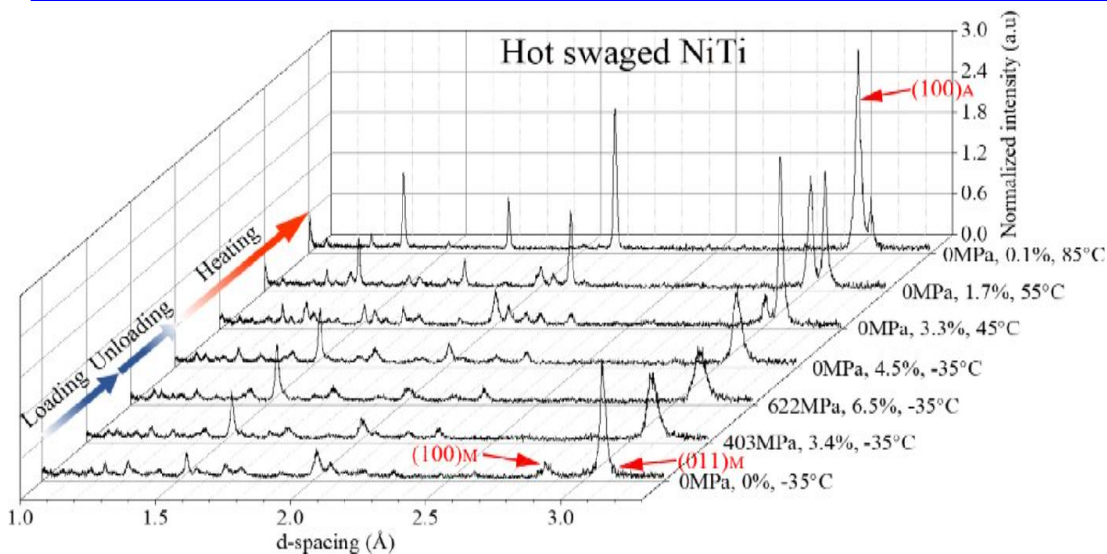
Наклон зависимости нормальной компоненты напряжённости магнитного поля от расстояния вдоль деформированной области в разных сталях при разных нагрузках.



Теория?

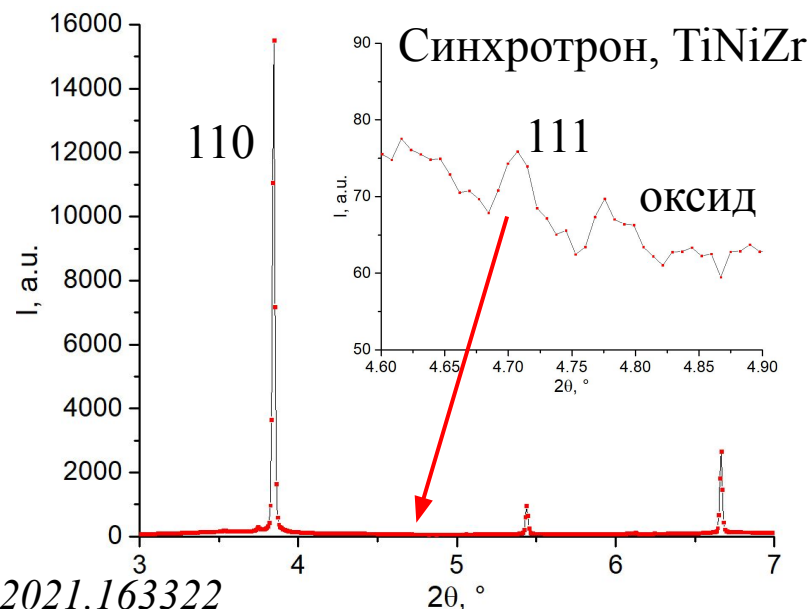
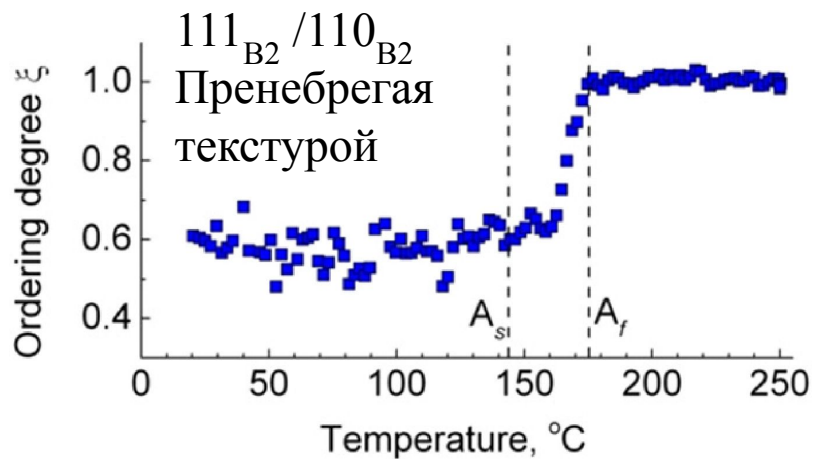
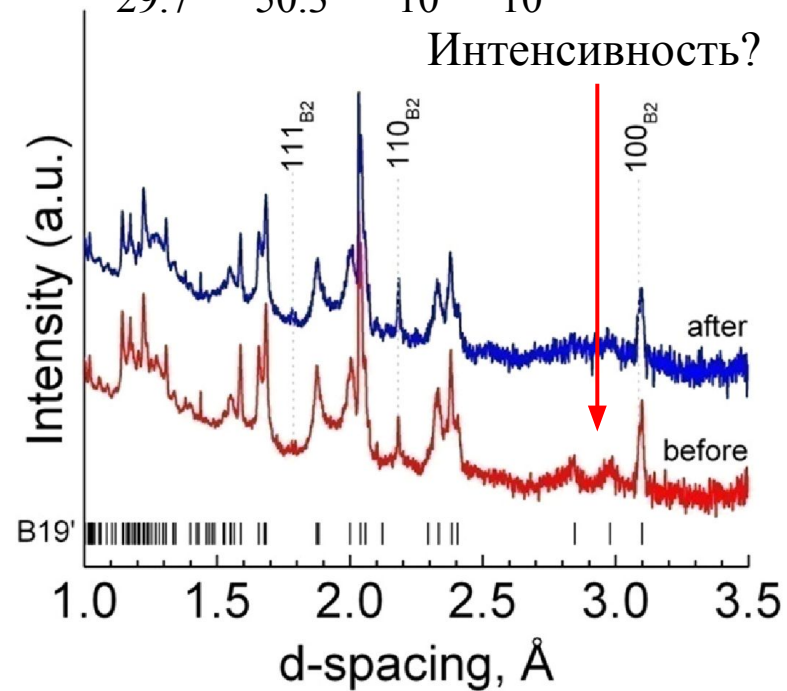
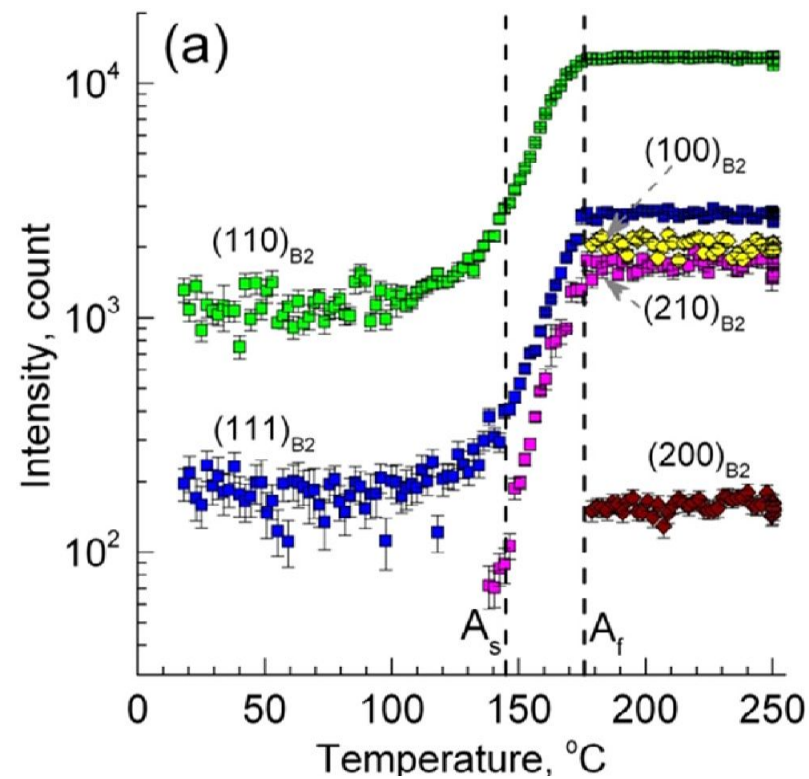
Сплавы с памятью формы

NiTi – великолепные термомеханические свойства и биосовместимость. Высокие T?



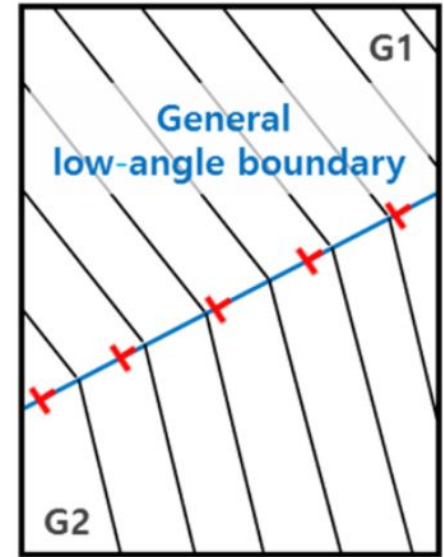
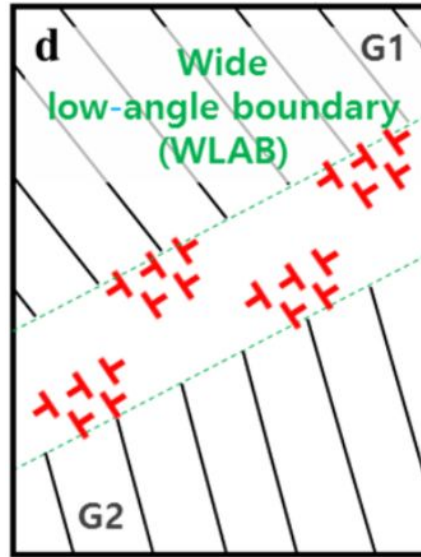
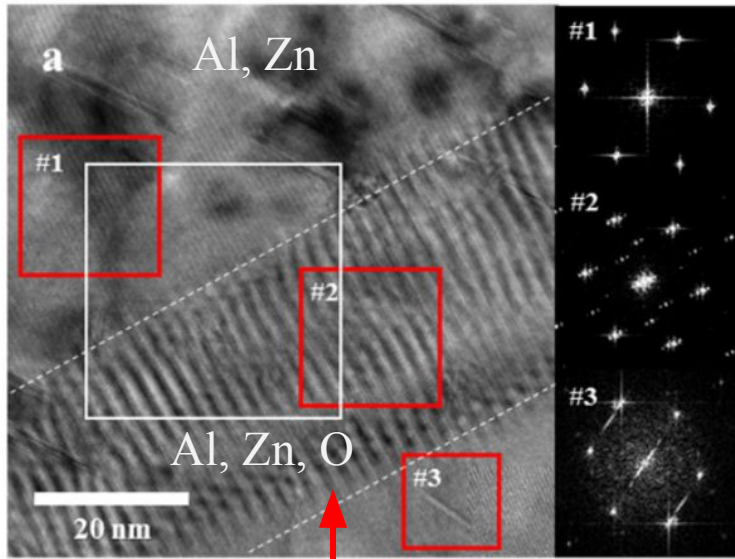
Режим деформации зависит от ориентации нагрузки относительно варианта; пластическая деформация не восстанавливается в аустените.

Сплавы с памятью формы: $Ti_{29.7}Ni_{50.3}Hf_{10}Zr_{10}$

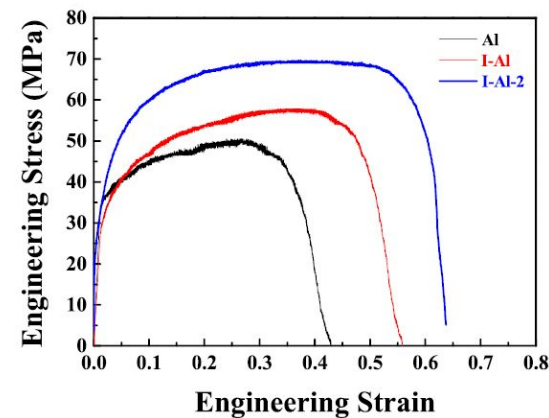
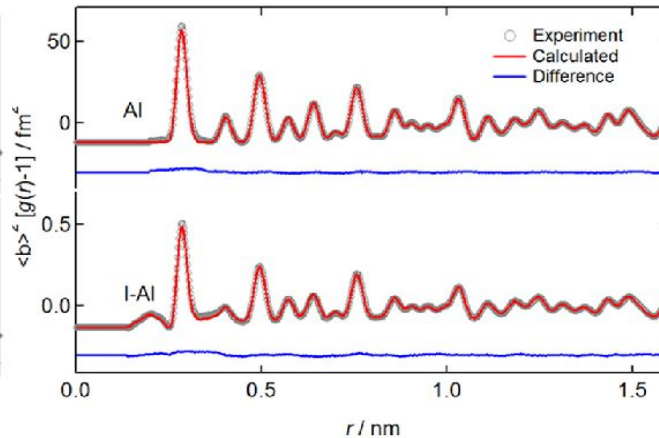
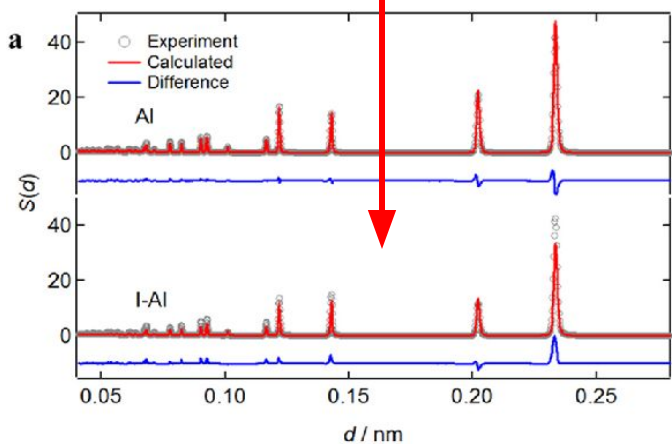


Высокопластичные Al сплавы

Субмикронные зёрна с широкими малоугловыми границами: высокая прочность и пластичность.



Al + ≈ 1 вес.% ZnO (20 нм)



Аддитивные технологии (металлы, сплавы)

Pros:

- Можно изготавливать материал исключительно сложной геометрии.
- Минимизация отходов производства.

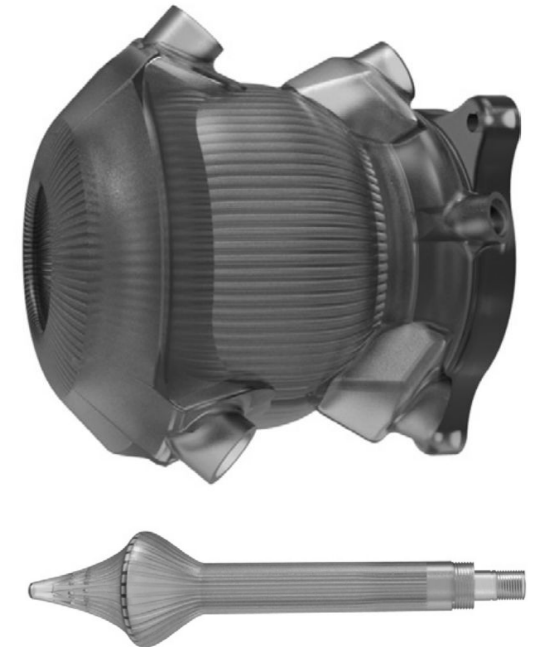
Cons:

- Специфическая микроструктура и форма зёрен.
- Нужен контроль остаточных напряжений, дефектов, пор.
- Низкая усталостная прочность.

| Material | AM Technology |
|---|---------------|
| Ti6Al4V/TiC (From 0% to 50% Ti [147]) | LMD |
| TA15/TiC (From 0% to 50% TiC) [148] | LMD |
| Ti6Al4V/TiC (From 0% to 30% Ti) [149] | DED |
| Ti6Al4V/SS304 L/V [150] | DED |
| TiAl4V/Invar (From Ti6Al4V to pure Invar with 3% increment) [151] | DED |
| Ti6Al4V/Mo (From Ti6Al4V to pure Mo with 25% increment) [152] | DED |
| Ti6Al4V/Al ₂ O ₃ [153] | LENS |
| SS AISI316L [154] | SLM |
| SS 316L/Stellite12 with few millimeter transition zone [155] | LDM |
| SS 316L/P21 with 25/50/75% graded layers [156] | DED |
| SS 316L/P21 + 316L SS/P21 [123] | DED |
| SS430 + SS316 [140] | LENS |
| AlSi10Mg + C18400 [143] | SLM |
| 316L SS + IN 718 [141] | L-PBF |
| CS 45 and CS/MS [142] | L-PBF |
| SS 304 [142] | L-PBF |
| Fe/Al-12Si [144] | SLM |

- **Laser Metal Deposition**
- **Direct Energy Deposition**
- **Laser Engineered Net Shaping**
- **Selective Laser Melting**
- **Laser-Powder Bed Fusion**

S. Hasanov (2021). J. Manuf. Mater. Process, 10.3390/jmmp6010004

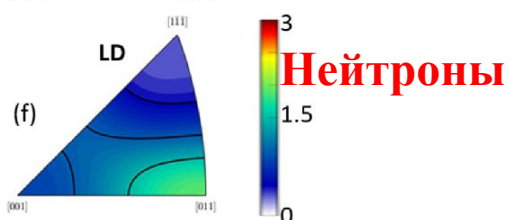
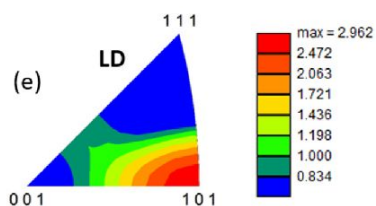
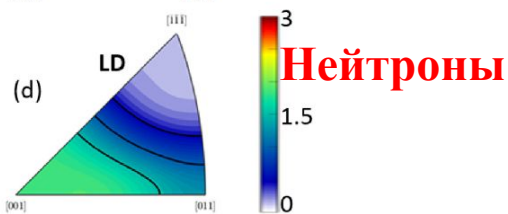
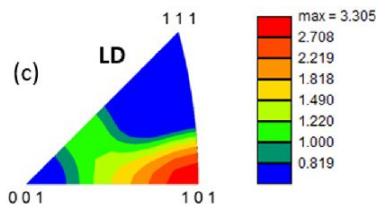
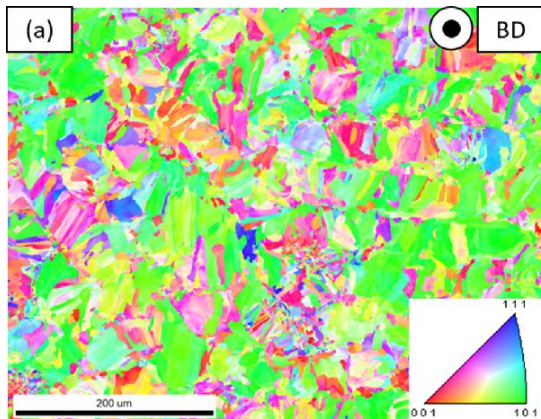


L. Nickels (2018). Metal Powder Report, 10.1016/j.mprp.2018.03.050

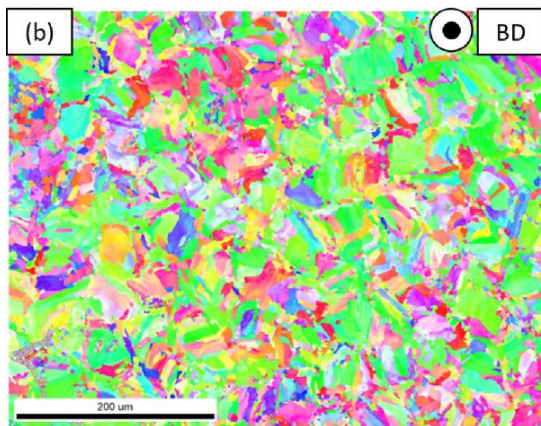
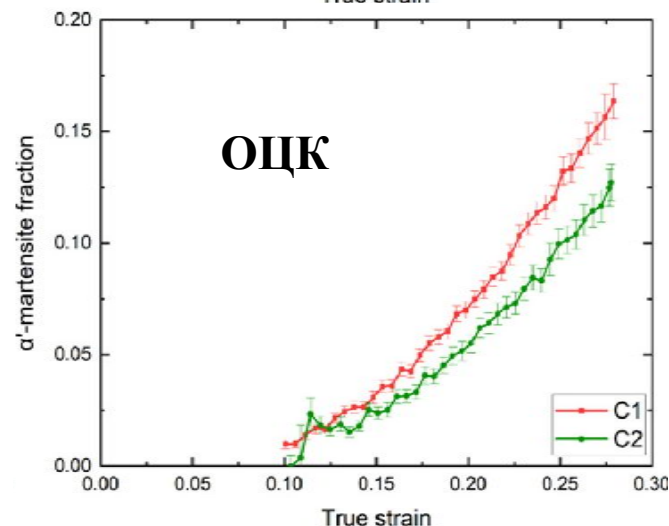
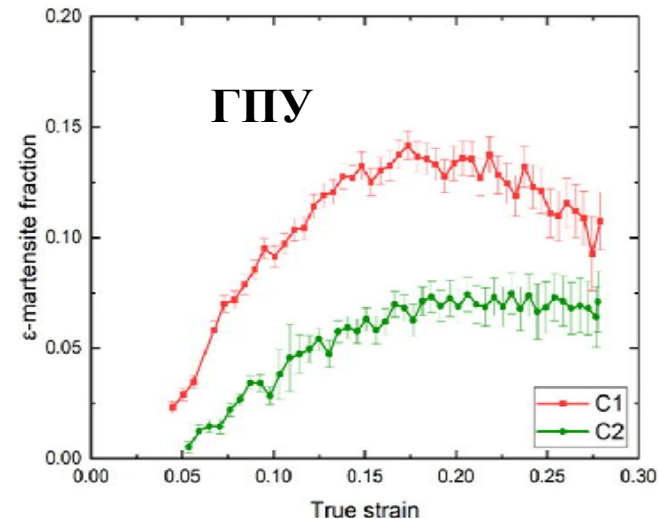
Аддитивные технологии (металлы, сплавы)

Порошок стали 304L (< 45 мкм), L-PBF в атмосфере аргона.

150 Вт, 450 мм/с



In-situ измерения: 0.26 Н/с в упругой области, 0.01 с⁻¹ в пластической.
Дифрактограммы каждую минуту!

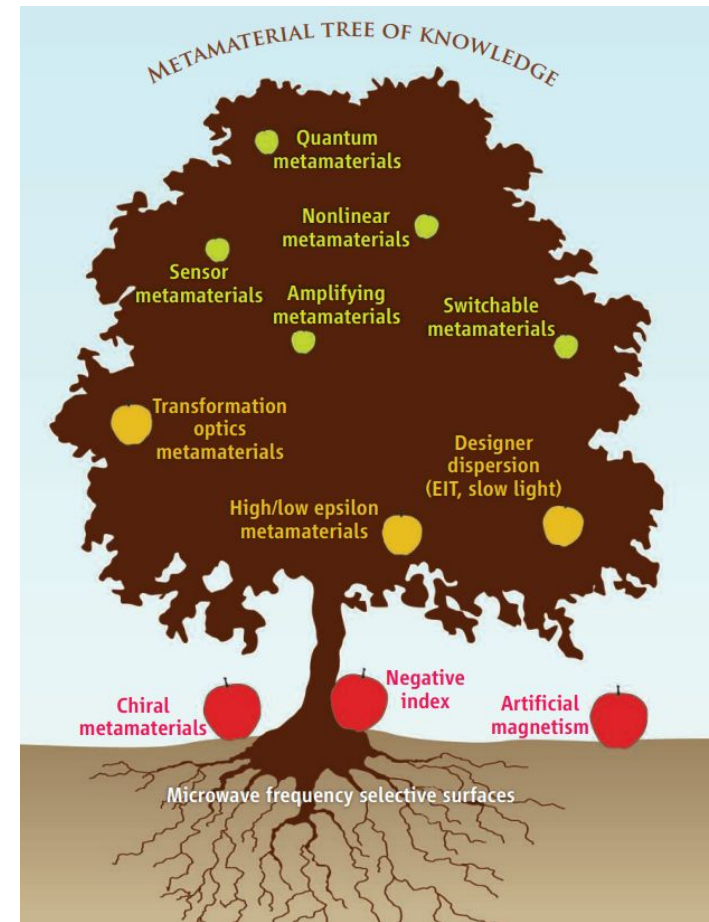
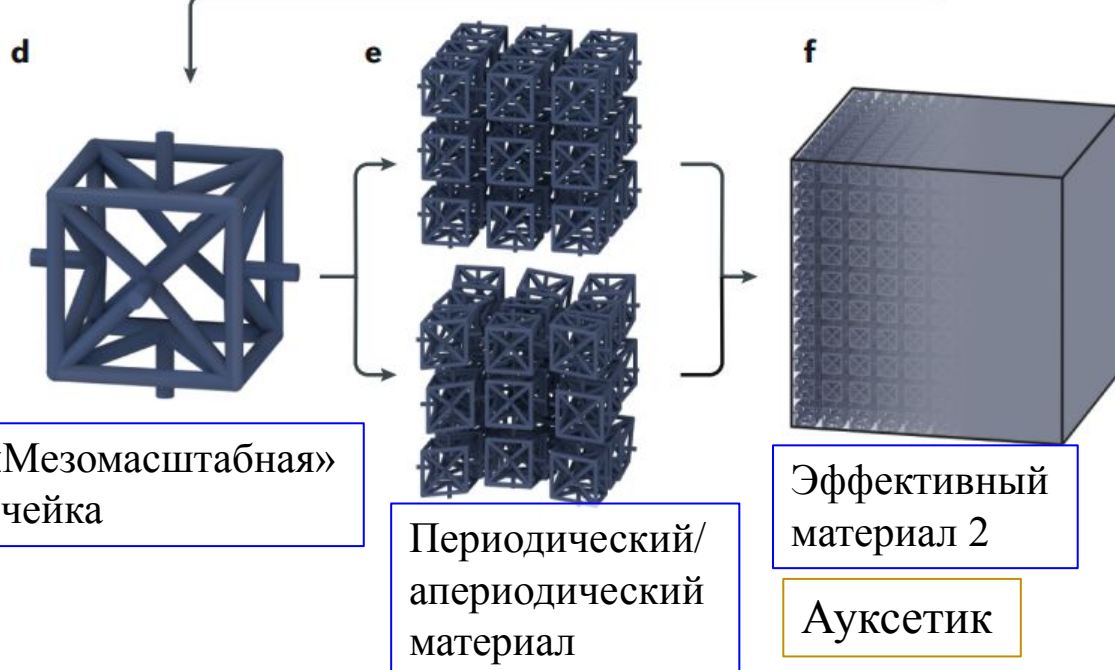
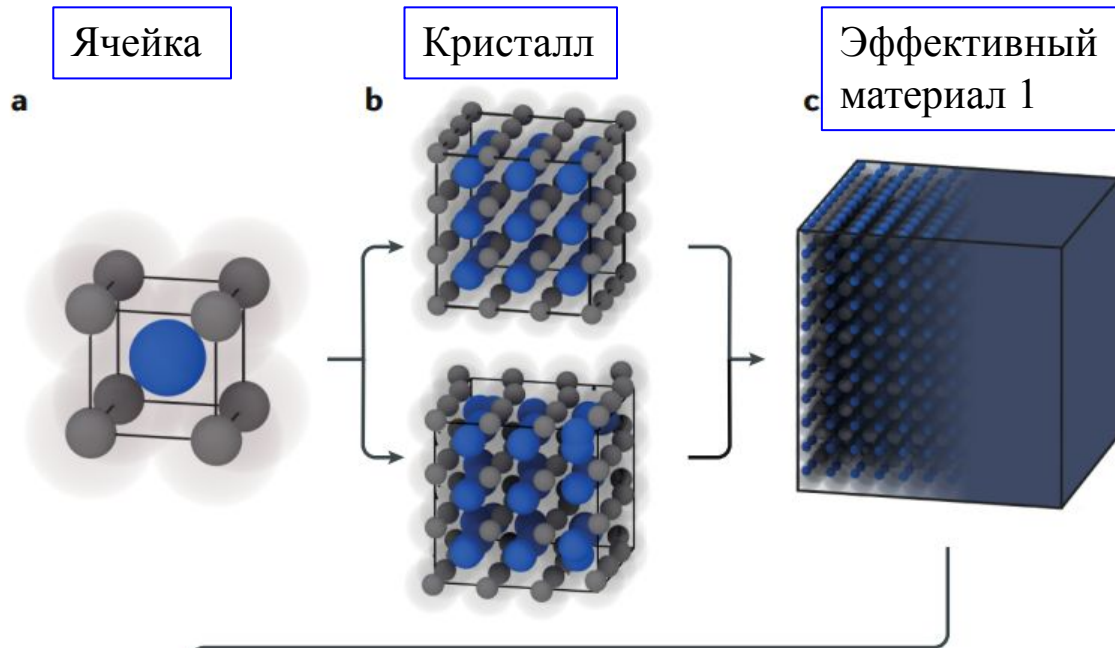


100 Вт, 300 мм/с

LD = loading direction
BD = building direction

**TRIP/TWIP эффекты.
Сильная зависимость
деформации от
начальной текстуры!**

Метаматериалы



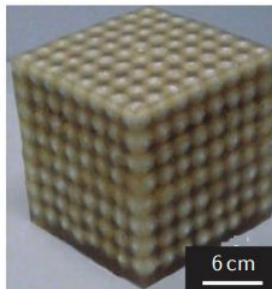
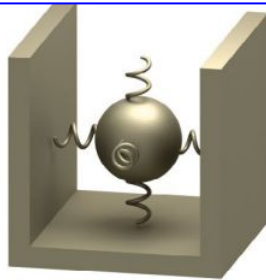
N. I. Zheludev (2010). Science, doi:10.1126/science.1186756

M. Kadic et al. (2019). Nature Reviews Physics, 10.1038/s42254-018-0018-y

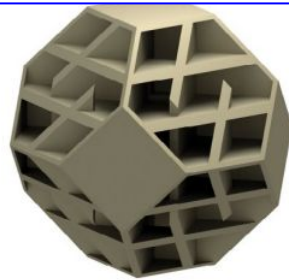
Метаматериалы

- Электромагнитные и оптические (отрицательный показатель преломления, «идеальное поглощение», хиральные эффекты, нелинейные эффекты, гиперболические материалы, ...)
 - Акустические и механические (отрицательный объёмный модуль, отрицательная плотность, ауксетики, self-aware композиты, ...)
 - Транспортные (анизотропная диффузия, электро- и теплопроводность, ...)
- + возможно управлять поведением метаматериалов внешними воздействиями

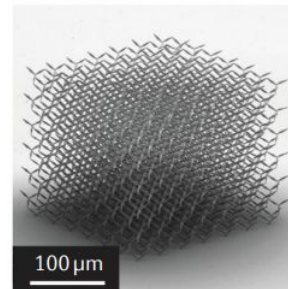
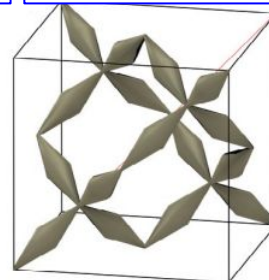
Отрицательная
плотность



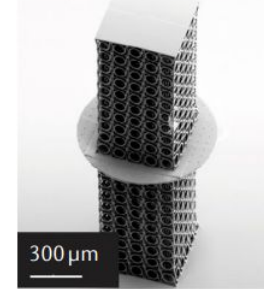
Изотропное
замедление звука



Модуль
сдвига $\rightarrow 0$



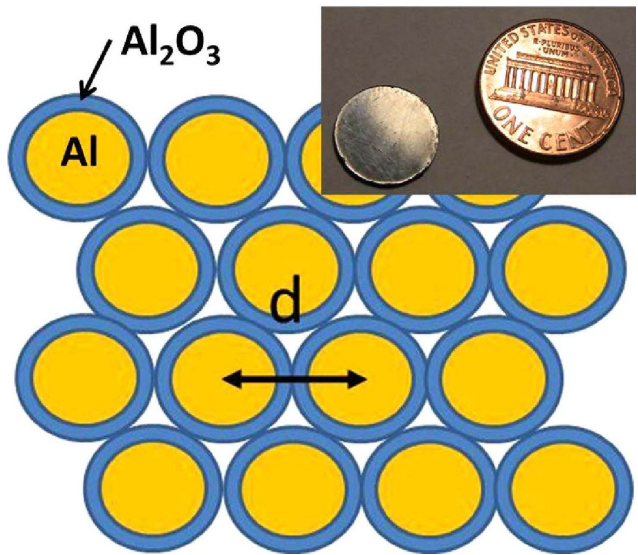
Механическая
хиральность



Антенны, плащи-невидимки, демпферы, всевозможные датчики, фильтры, волноводы...

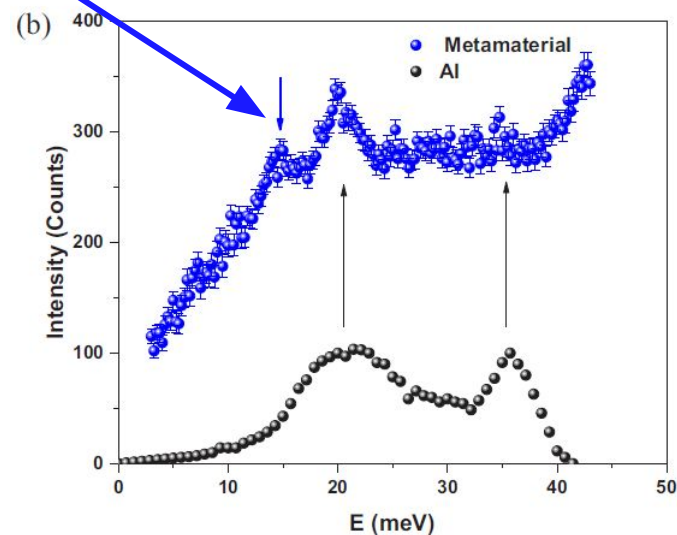
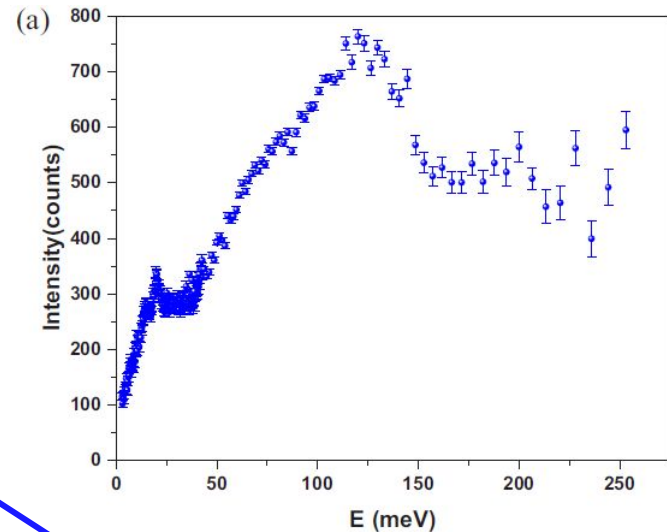
Метаматериалы

ВТСП в метаматериалах?

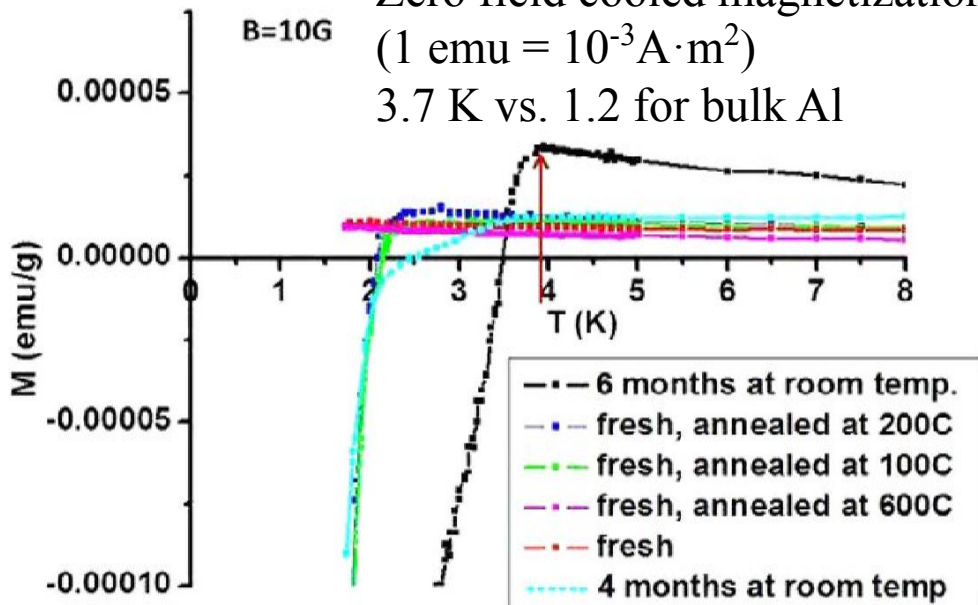


Core-shell Al+Al₂O₃,
d = 18 nm

Hybrid
plasmon-phonon
mode



Zero field cooled magnetization
(1 emu = 10⁻³ A·m²)
3.7 K vs. 1.2 for bulk Al

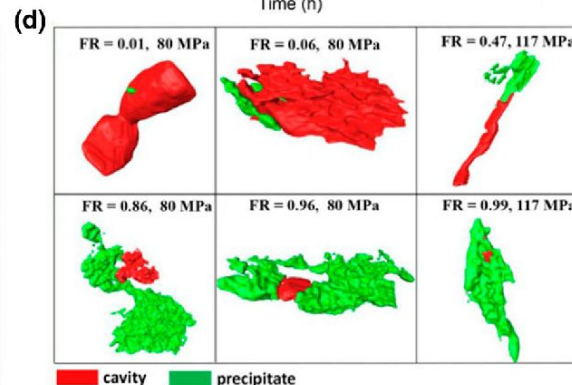
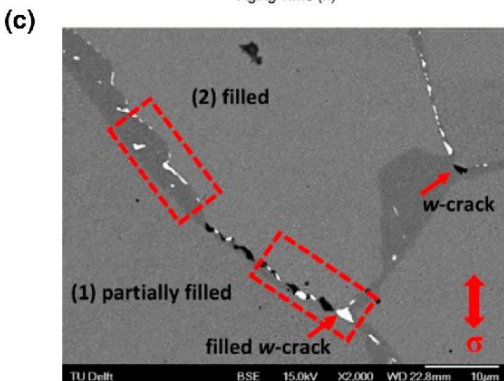
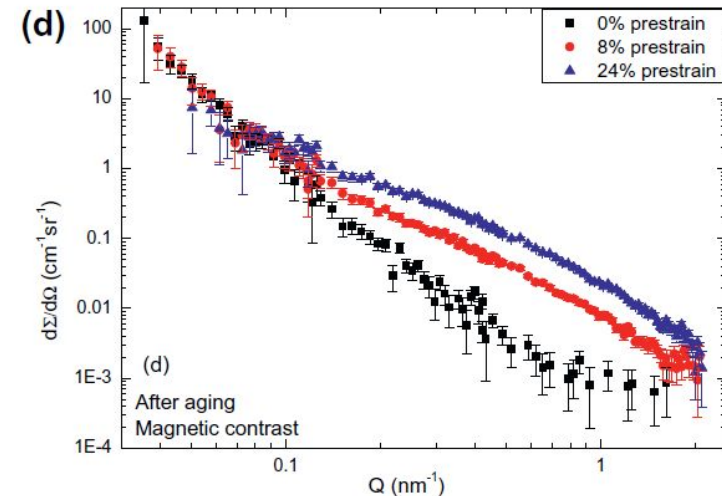
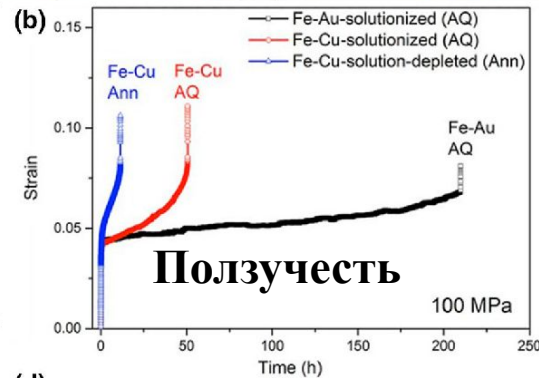
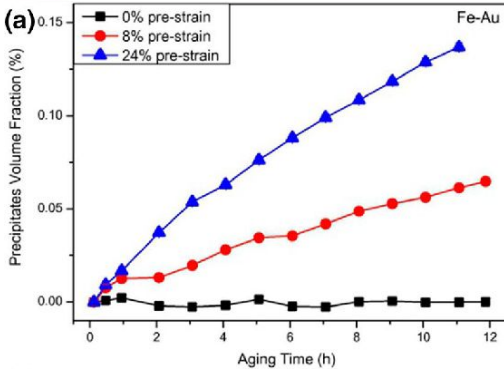
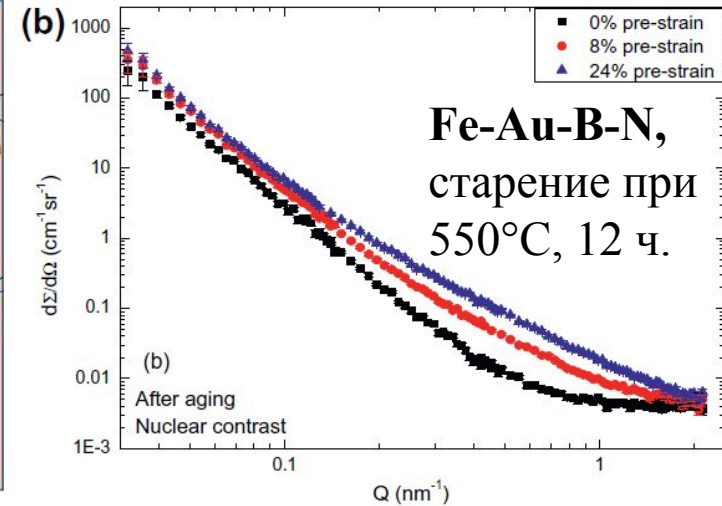
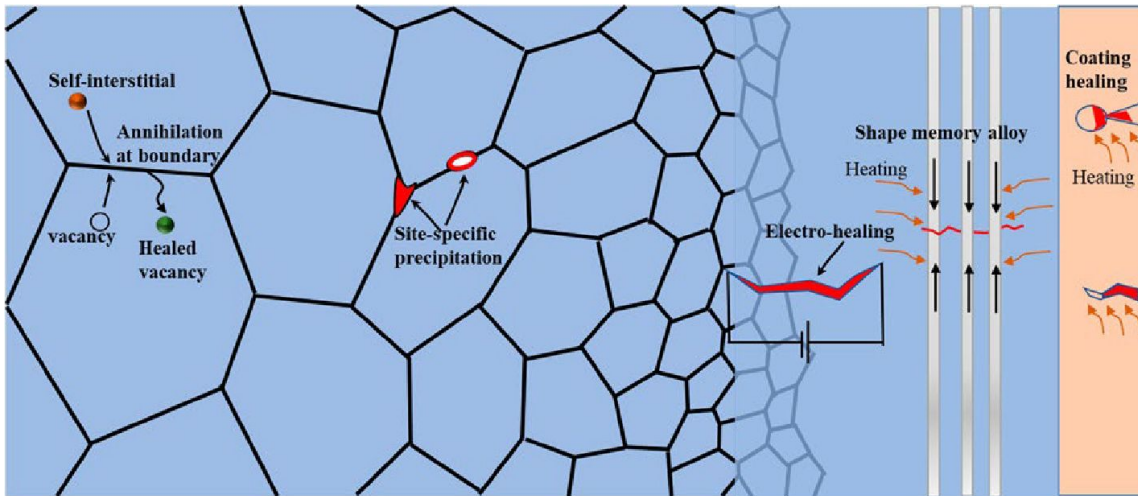


V.N. Smolyaninova et al. (2015) *Scientific Reports*, 10.1038/srep15777

V.N. Smolyaninova et al. (2019) *Phys. Rev. B*, 10.1103/PhysRevB.100.024515

Самозалечивающиеся материалы

Полимеры, керамики, бетон, металлы, электродные материалы...

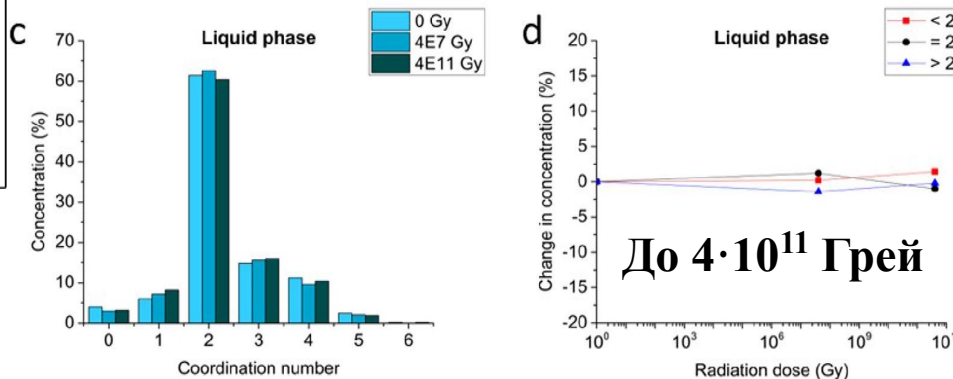
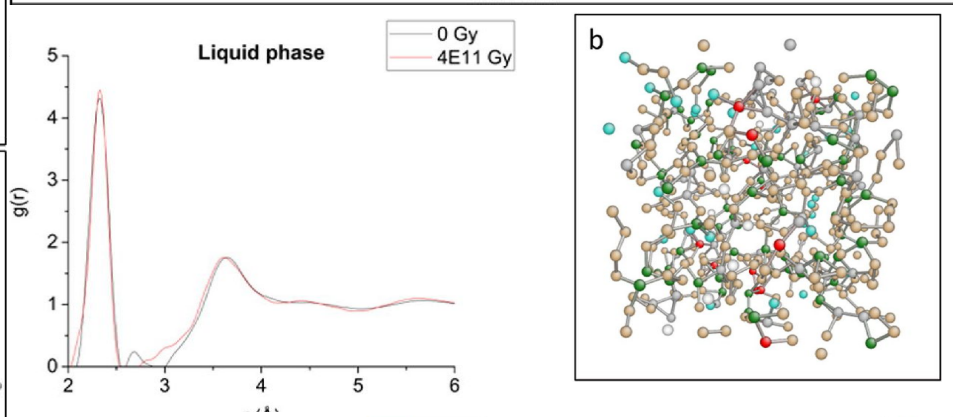
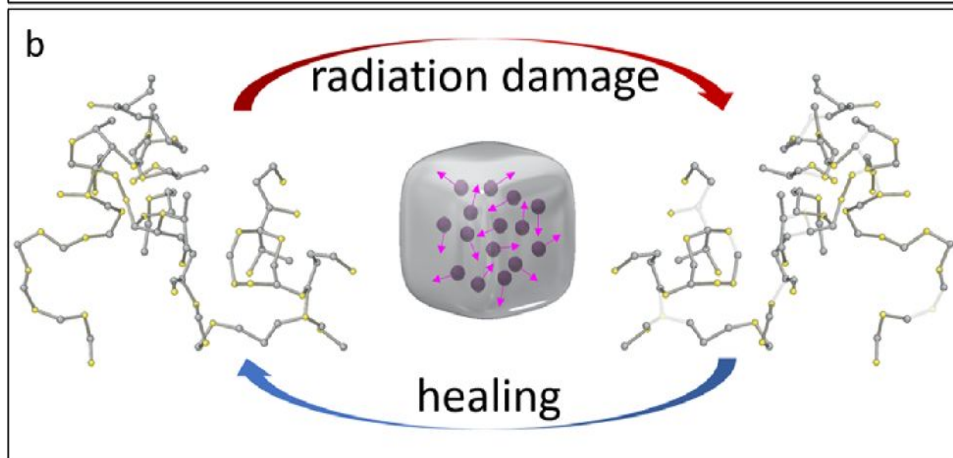
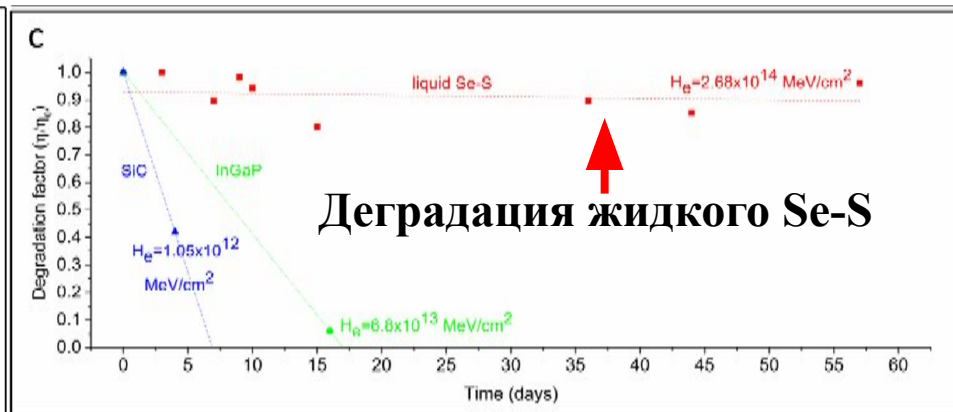
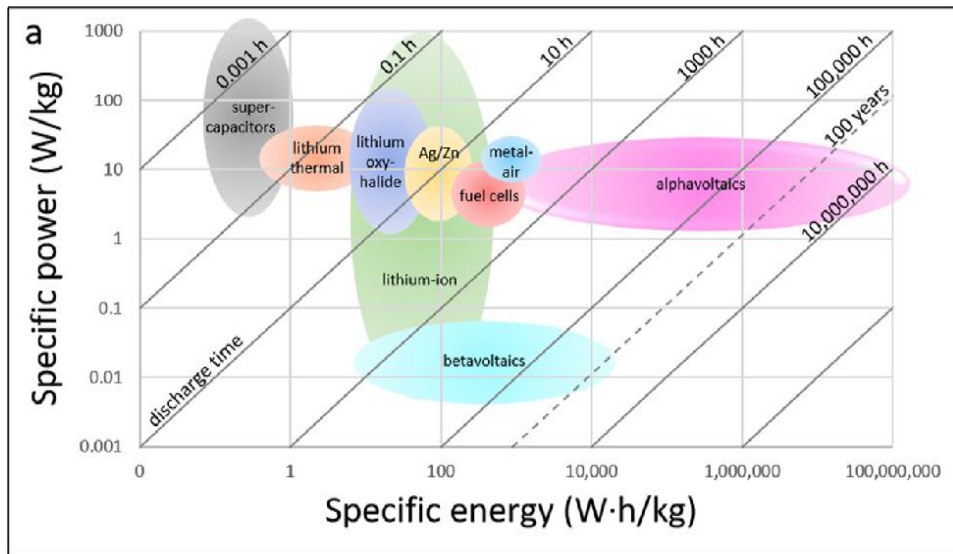


S. Zhang et al. (2013) Acta Mater., 10.1016/j.actamat.2013.08.015

S. Zhang et al. (2020) Acta Met. Sinica, 10.1007/s40195-020-01102-3

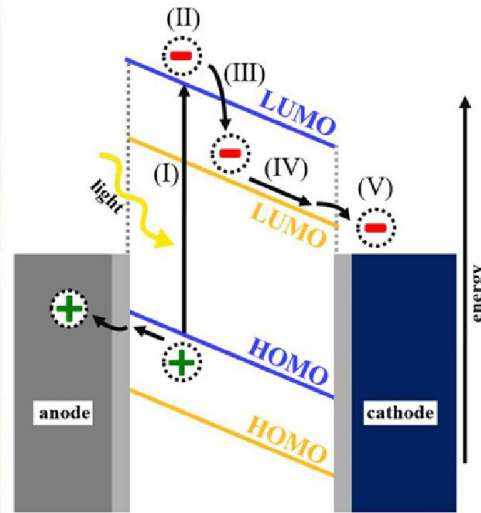
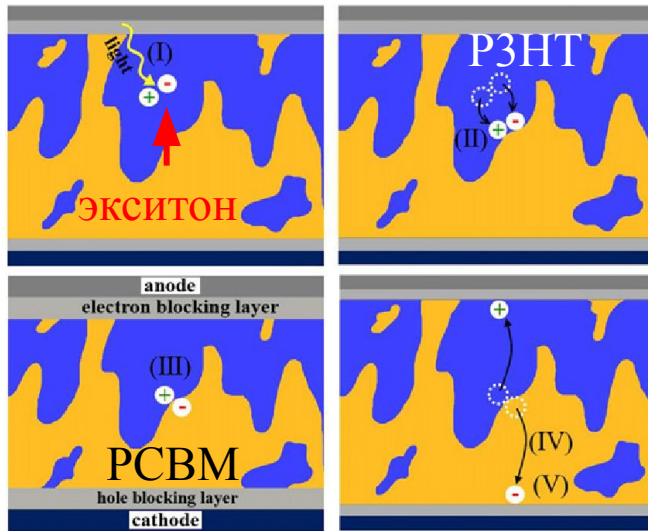
Альфа-вольтаические элементы

Импланты, космические миссии, ...

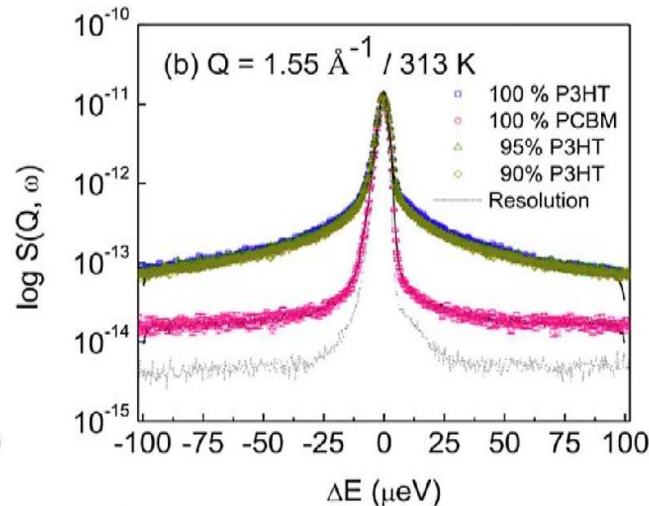
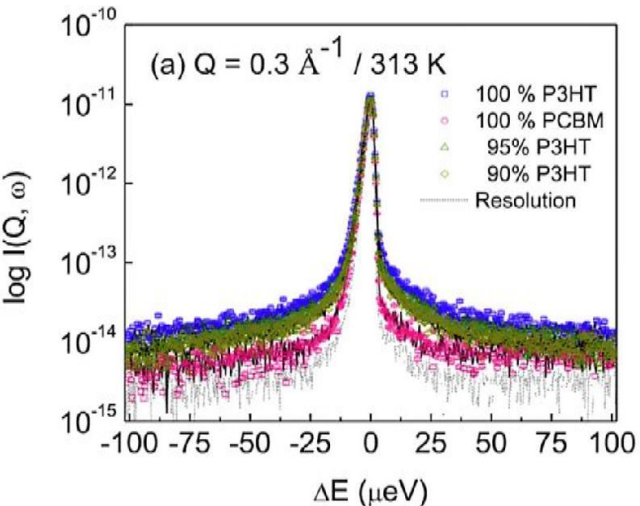
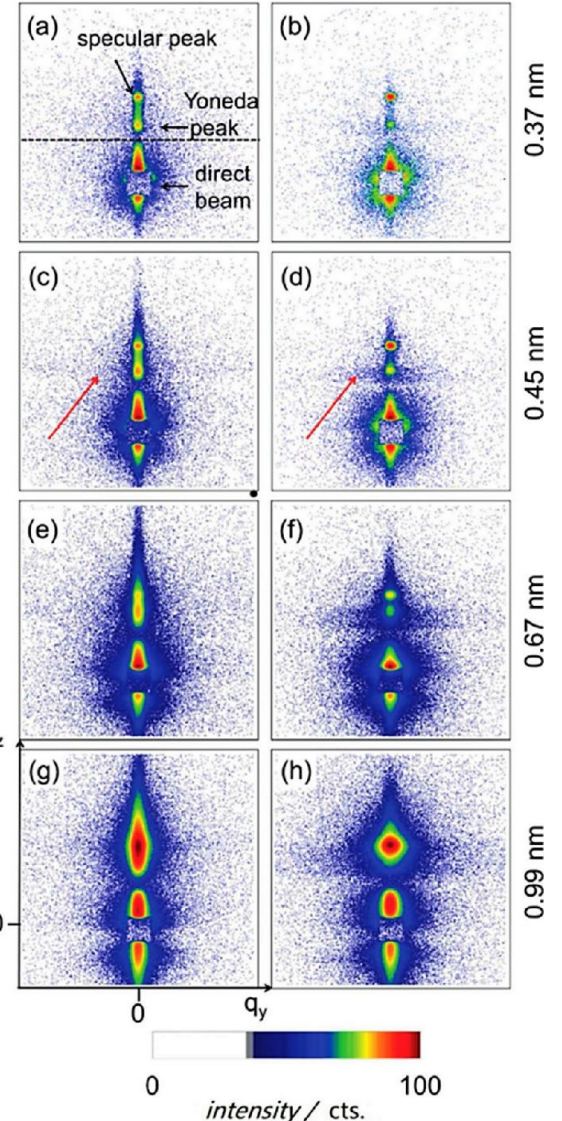


Органические солнечные батареи

Лёгкие, удобные, полупрозрачные, потенциально дешёвые, ... Оптимизация? Стабильность?

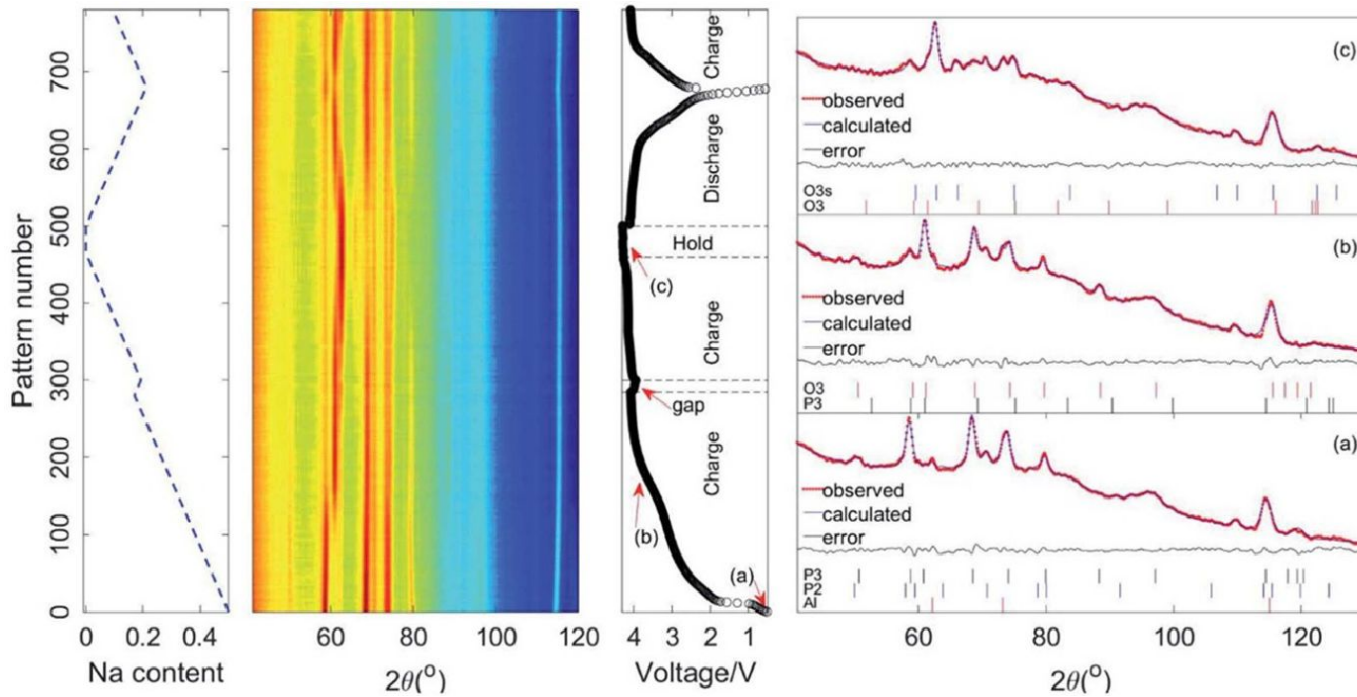


+ 9 vol.% 1,8-octanedithiol



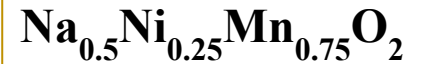
TOF-GISANS + QENS

Электродные материалы (Li-ion, Na-ion, K-ion, ...)



Operando

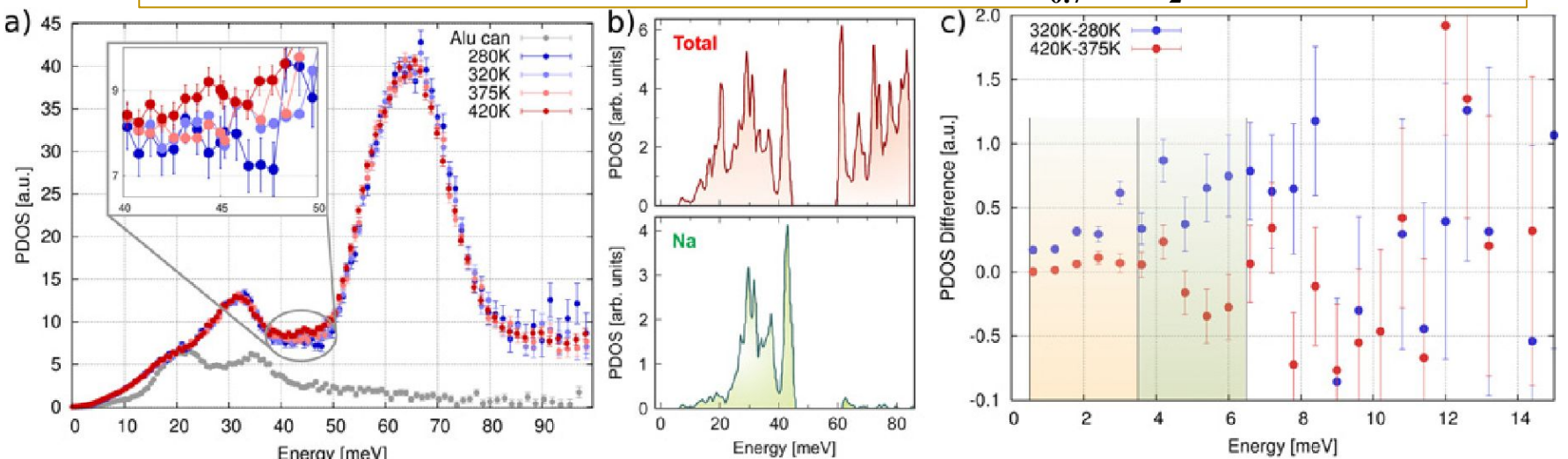
25 слоёв



Ni-Mn упорядочение
в P3 фазе

A.R. Shah et al. (2021) J. Phys.: Materials, 10.1088/2515-7639/ac24ec

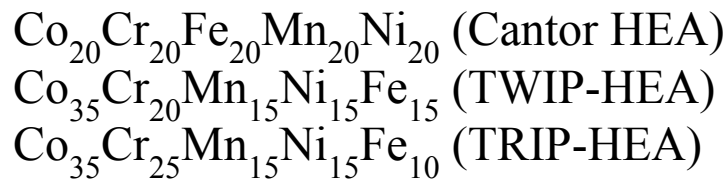
Связь структурных переходов (290 К, 400 К) в $\text{Na}_{0.7}\text{CoO}_2$ с диффузией Na



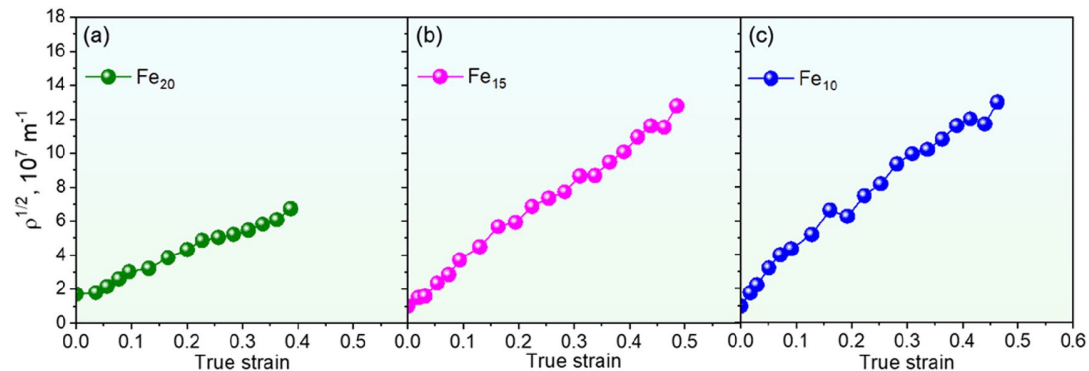
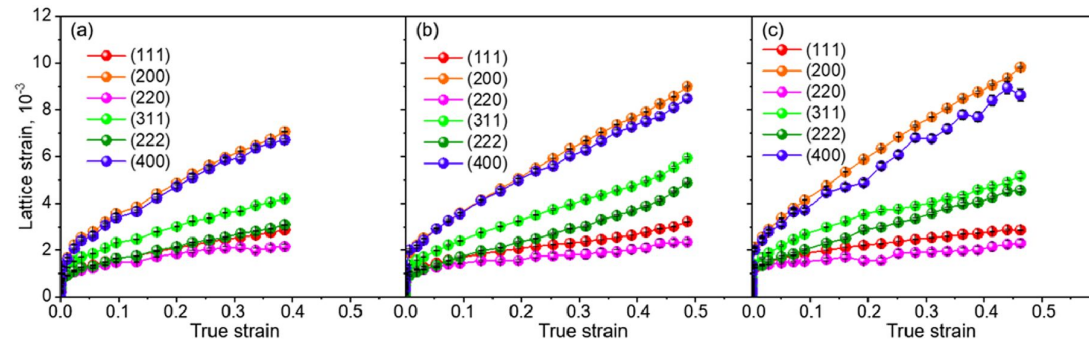
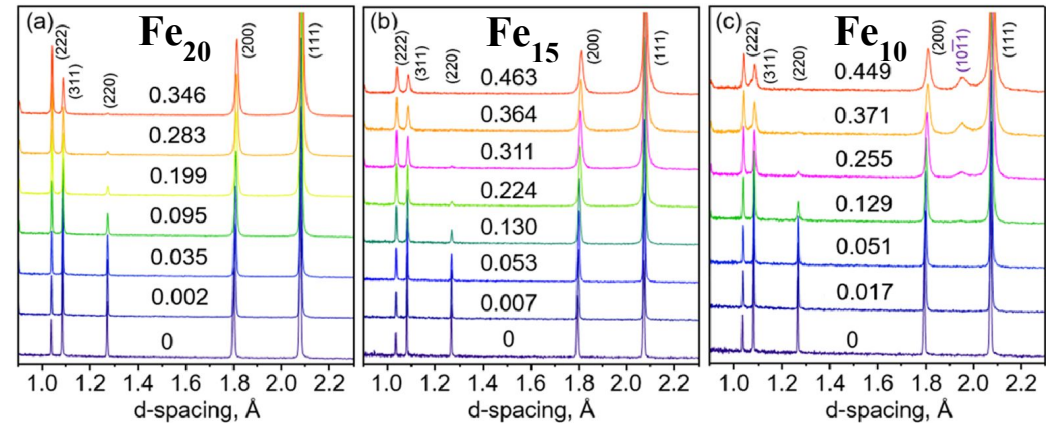
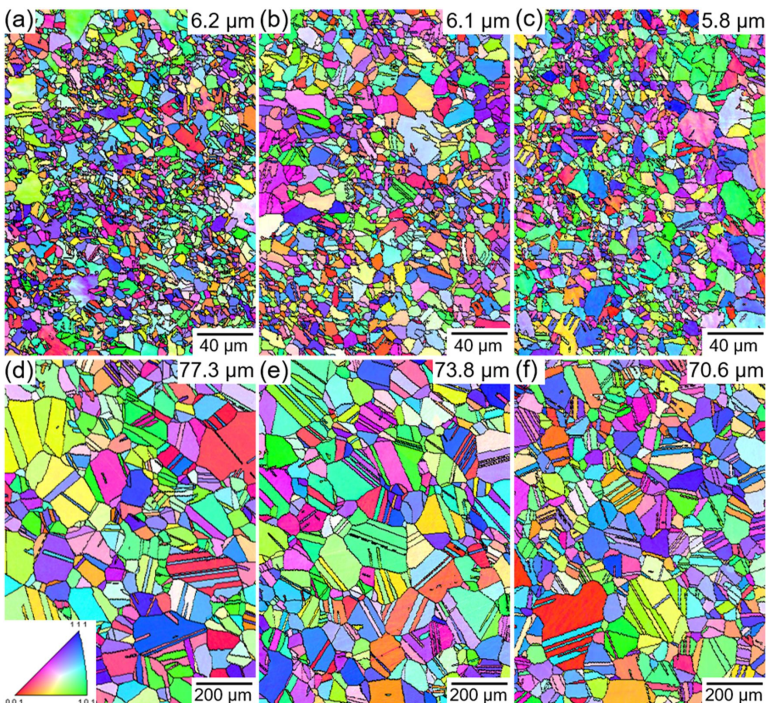
F. Juranyi et al. (2015) EPJ WoC, 10.1051/epjconf/20158302008

Высокоэнтропийные сплавы

Твердость, жаропрочность, коррозионная стойкость, стабильность, пластичность...



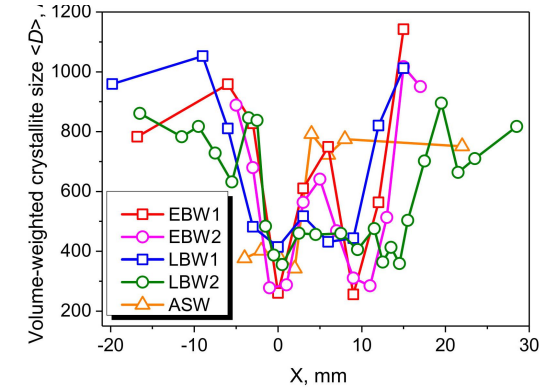
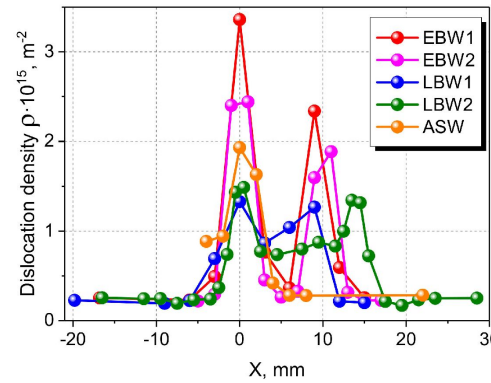
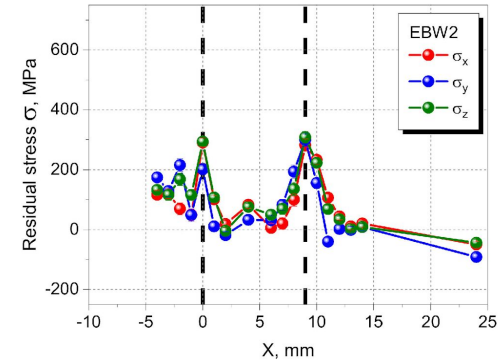
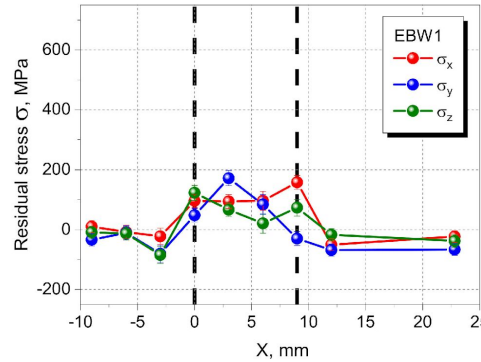
In situ нейтронная дифракция,
размер зёрен ≈ 6 мкм



**Основной режим
пластической деформации?**

Образцы-свидетели для теста Шарпи

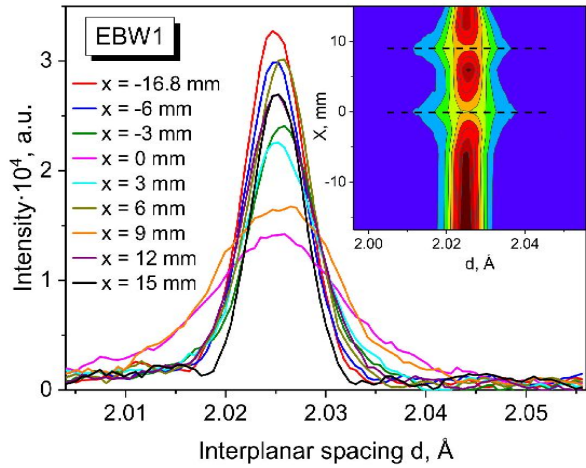
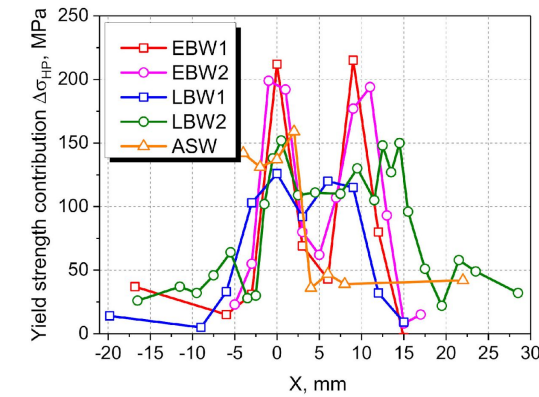
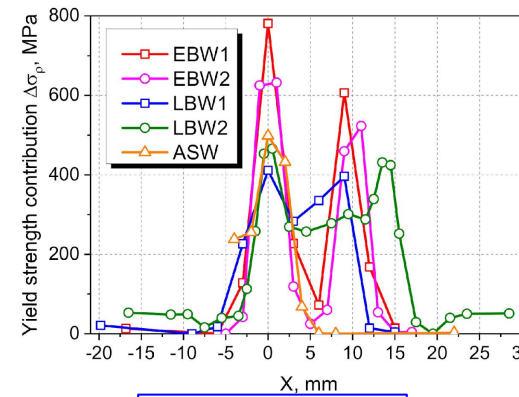
18MND5 steel, non-irradiated



ASW = arc stud welding

EBW = electron beam welding

LBW = laser beam welding



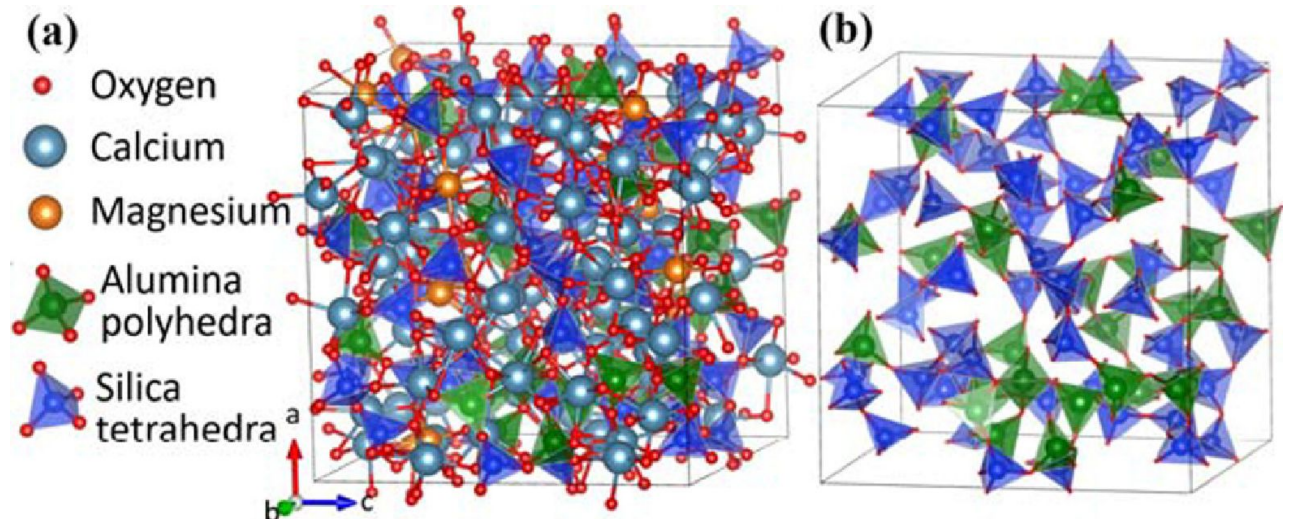
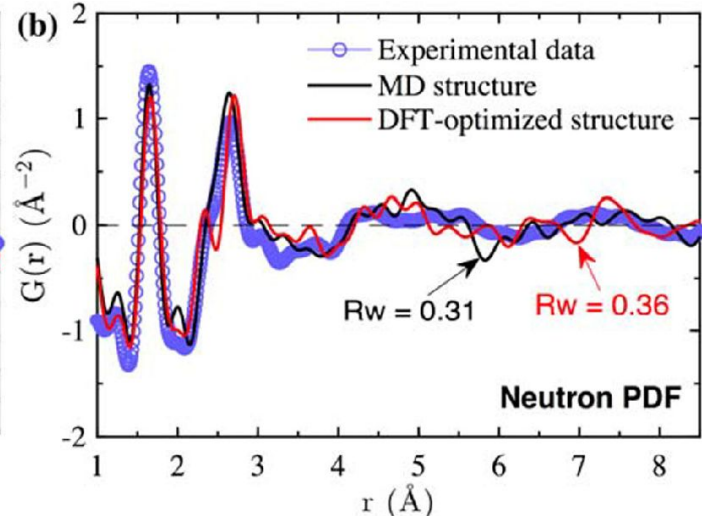
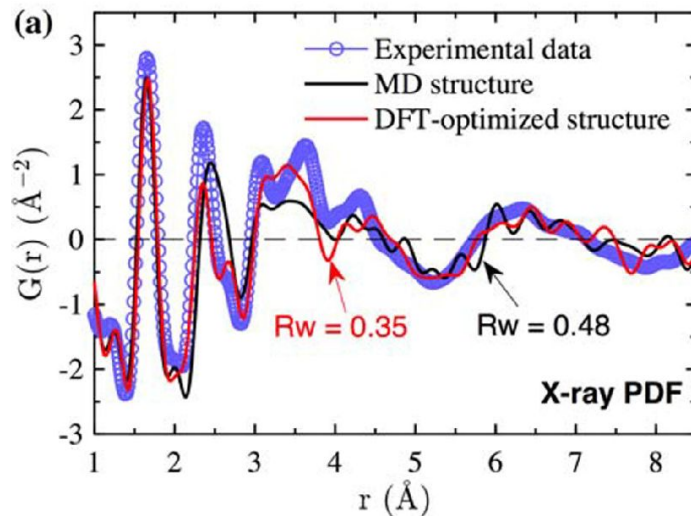
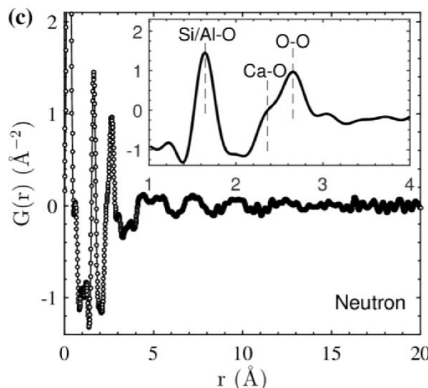
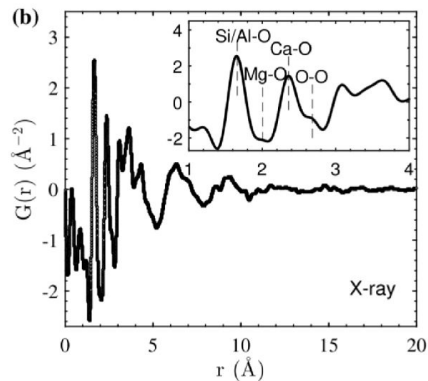
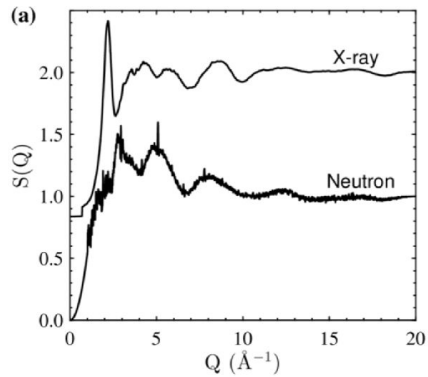
**Dislocations
(Taylor)**

**Grain boundaries
(Hall-Petch)**

CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) стёкла

Встречаются в породах нижней коры и мантии. (Частичная) замена Портландцемента (CO₂ ↓).

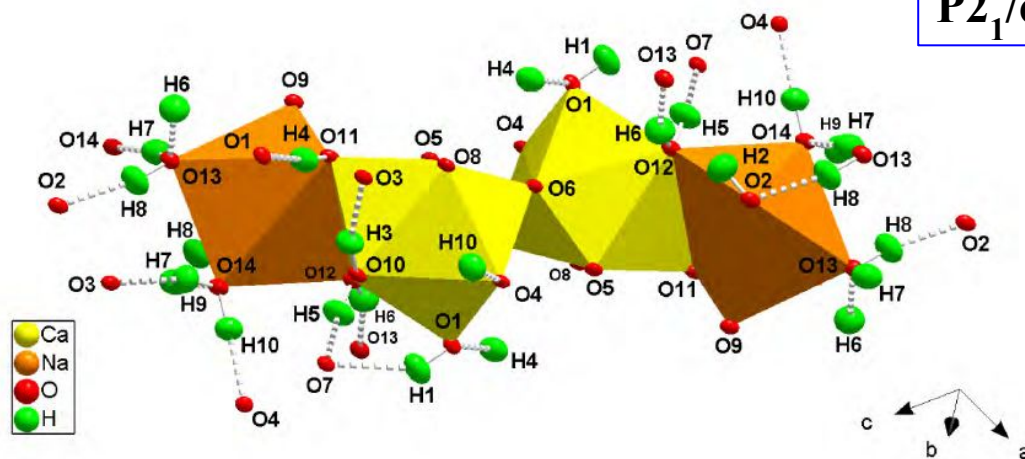
Состав ↔ структура ↔ свойства?



Структура минералов: позиции водорода

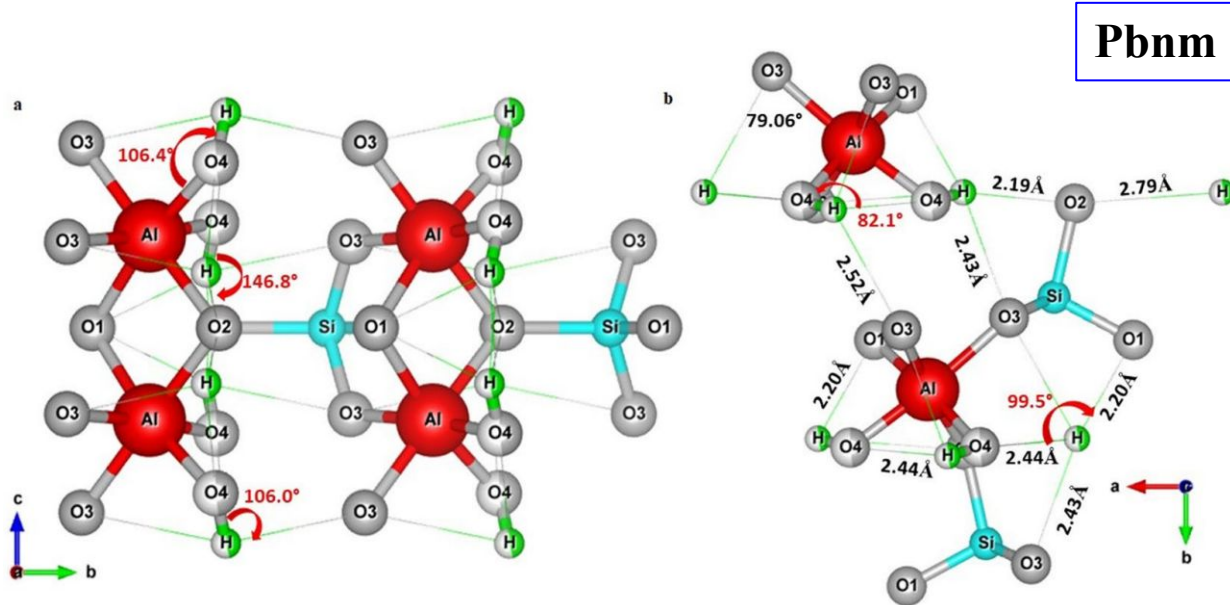
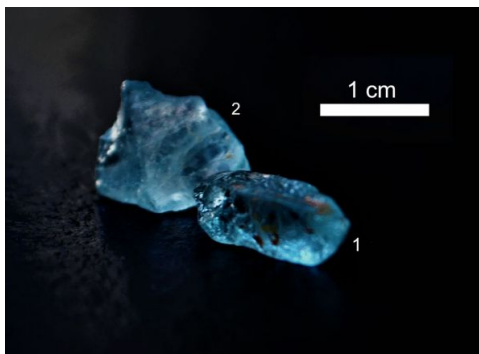
G. Diego Gatta et al. (2022) American Mineralogist, 10.2138/am-2022-8086

Пробертит,
 $\text{CaNa}[\text{B}_5\text{O}_7(\text{OH})_4] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$,
 минеральное сырьё В
 $(\text{B}_2\text{O}_3 \sim 50 \text{ wt}\%)$, Kramer
 Deposit (Kern County,
 California, USA).



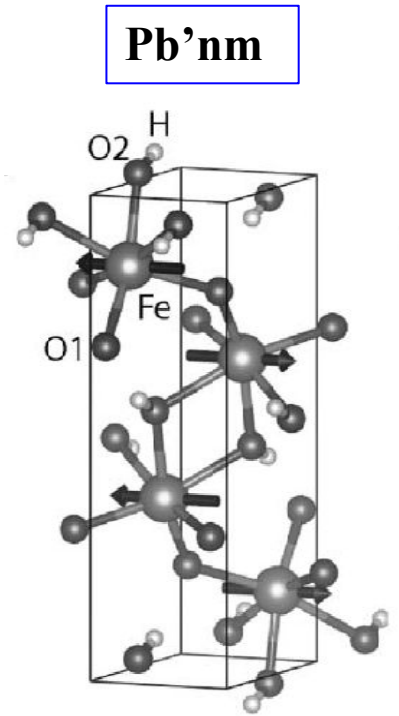
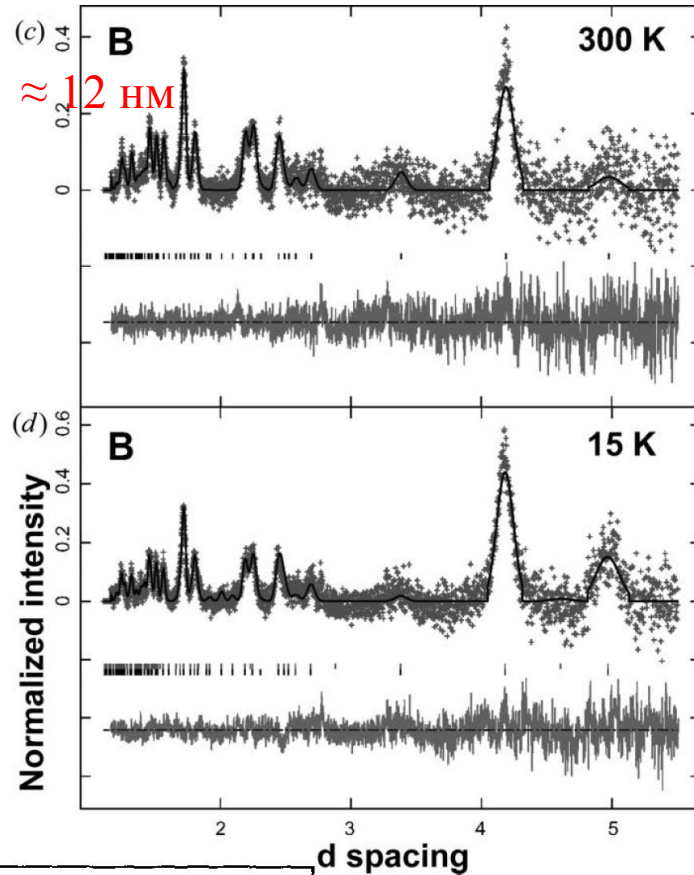
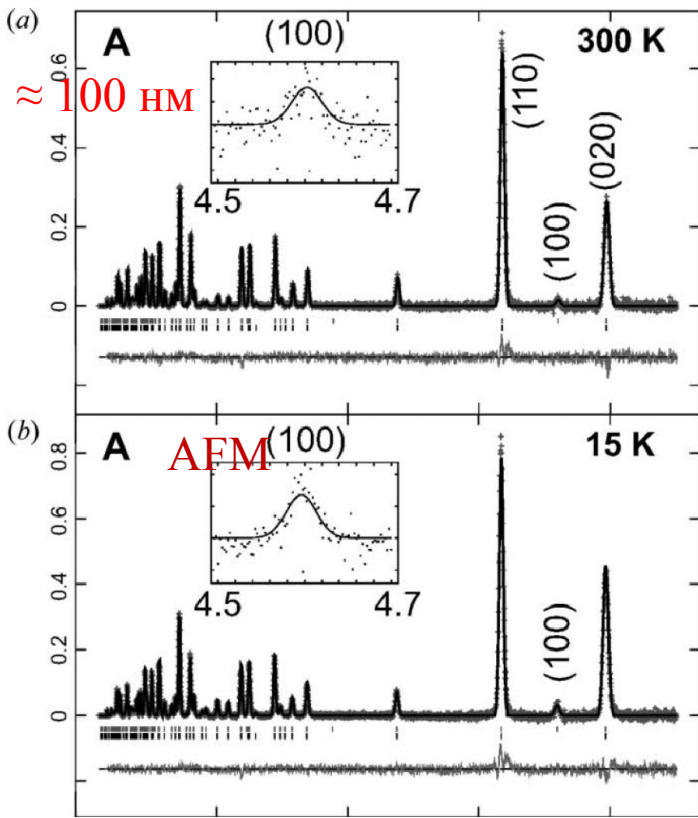
N. Precisvalle et al. (2021) Scientific Reports, 10.1038/s41598-021-82045-2

Фтор-дефицитный
 голубой топаз
 $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$, Padre
 Paraíso (Minas Gerais,
 Brazil)

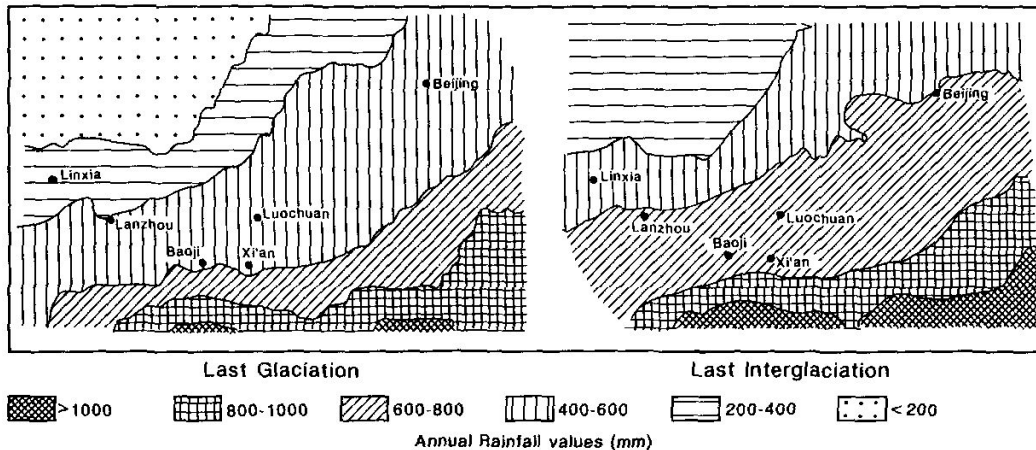


Н при высоких Р; полевые шпаты; цеолиты...

Связь магнитной структуры и микроструктуры: гётит (α -FeOOH)



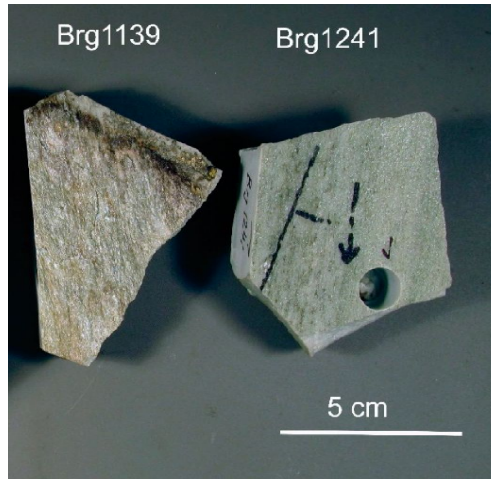
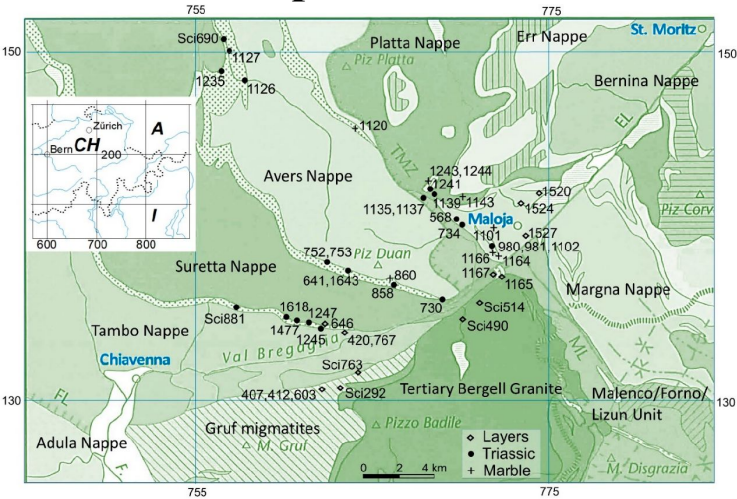
E. Zepeda-Alarcon et al. (2014). J. Appl. Crystallogr., 10.1107/S1600576714022651



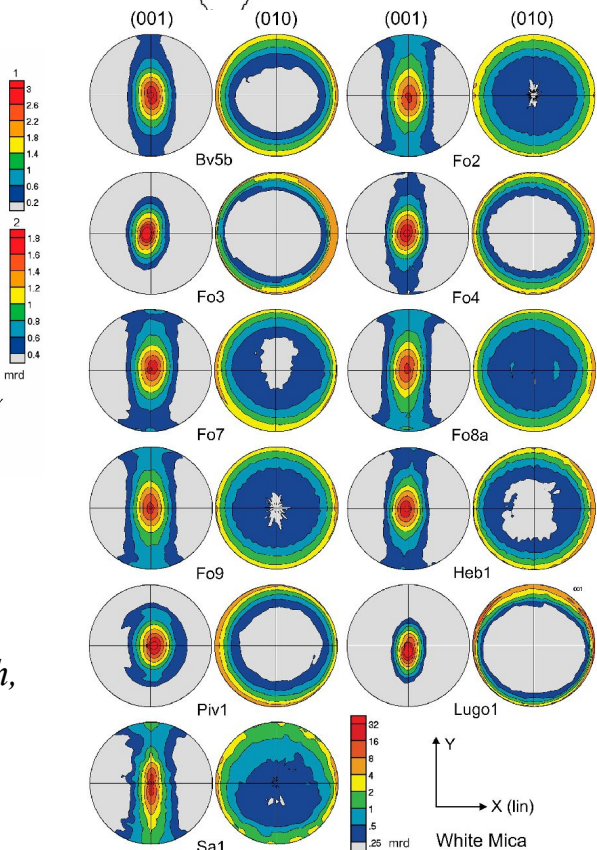
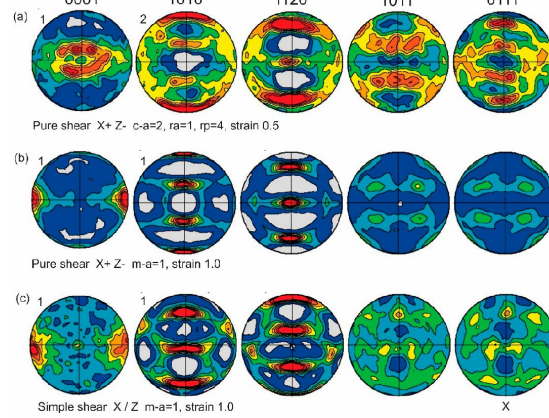
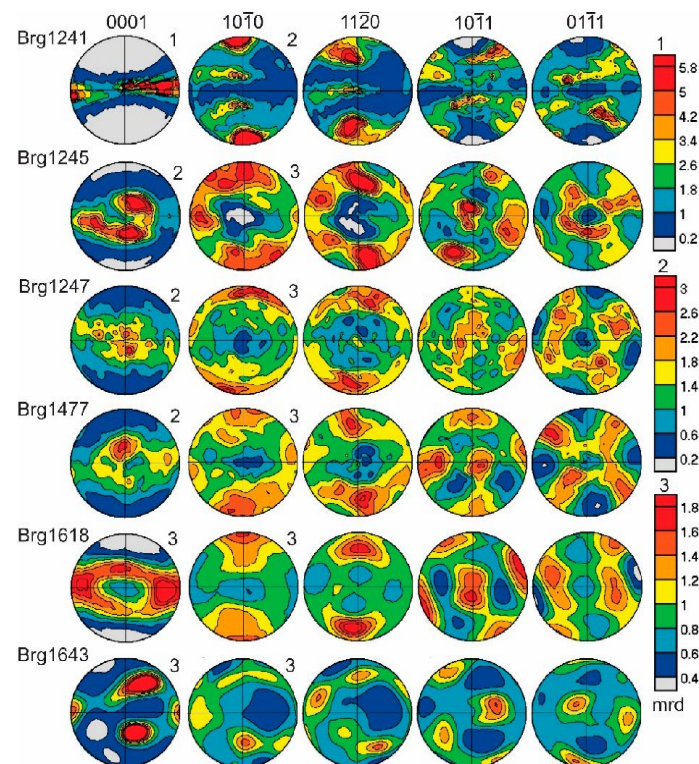
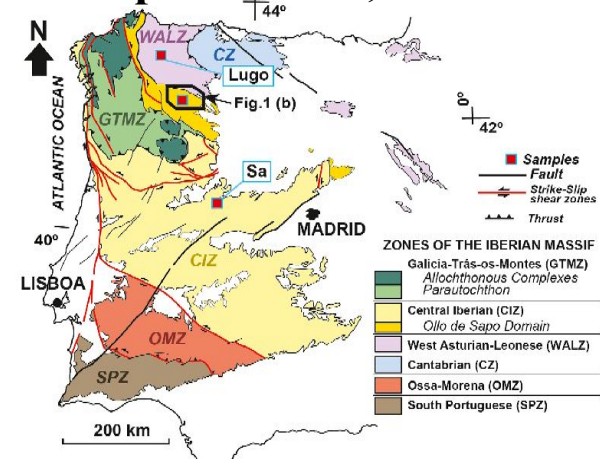
B.A. Maher & R. Thompson. (1995) Quaternary Res. 10.1006/qres.1995.1083

Преимущественные ориентировки минералов

Долина Бергелль, 47 Q + 8 M



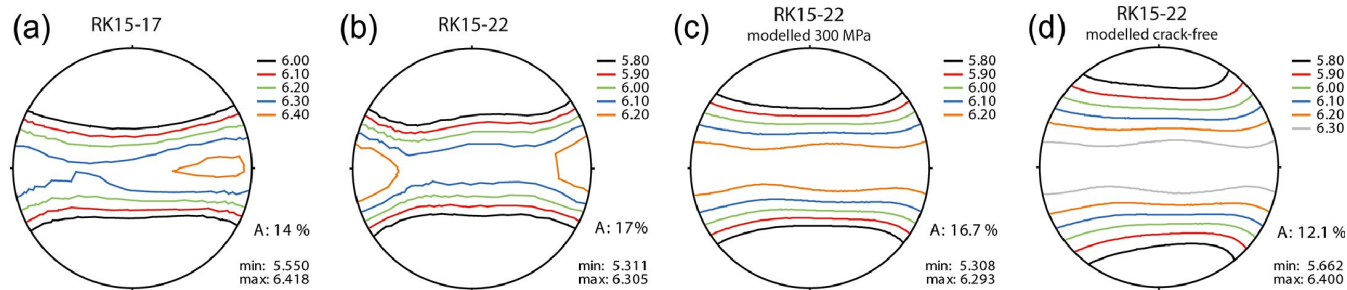
Север Испании, 10 Sl + Ph



H.-R. Wenk et al. (2019) *Minerals*, 10.3390/min9050277
 R. Keppler et al. (2021) *Solid Earth*, 10.5194/se-12-2303-2021
 H.-R. Wenk et al. (2022) *J. Struct. Geol.* 10.1016/j.jsg.2022.104730

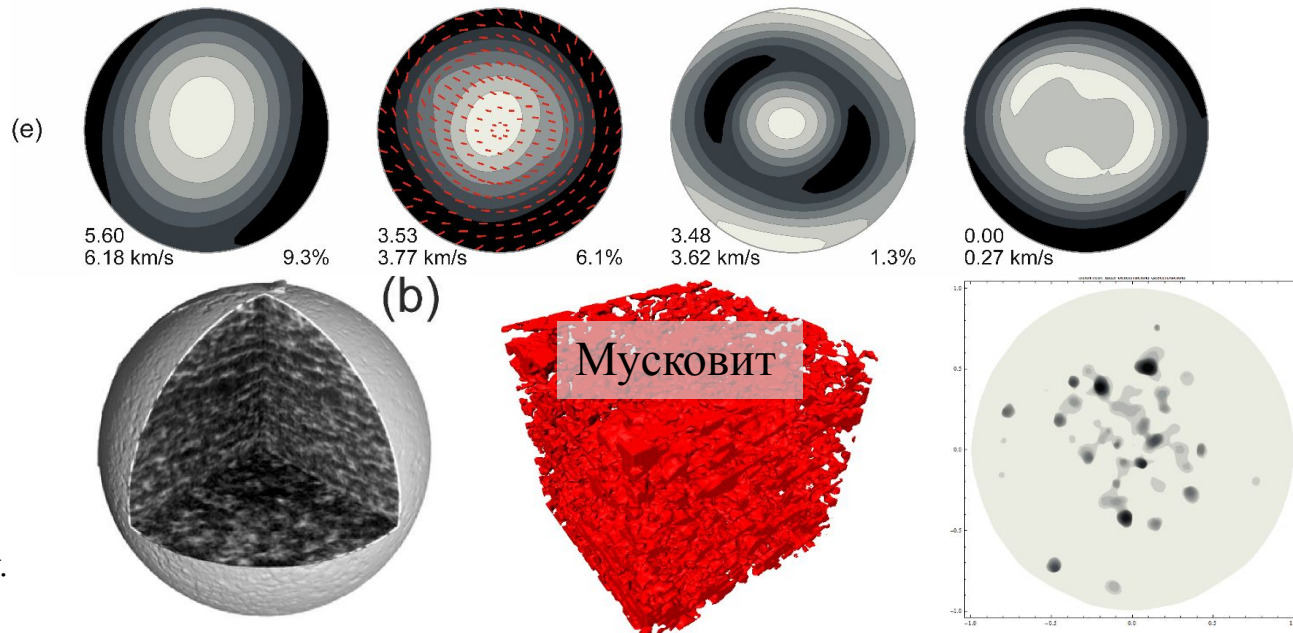
Преимущественные ориентировки минералов

Покров Адула, Альпы
32 образца, в основном
гнейсы



| Pressure (MPa) | Depth (km) | Density (kg/m ³) | Type I crack density | Type II crack density | Total crack porosity | V _p _{min} (km/s) | V _p _{max} (km/s) | AVp (%) | C ₁₁ (GPa) | C ₁₂ (GPa) | C ₁₃ (GPa) | C ₁₄ (GPa) |
|----------------|------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 5 | 0.2 | 2627.19 | 0.246 | 0.057 | 0.0163 | 4.203 | 4.728 | 12 | 58.0 | 9.1 | 7.8 | 0. |
| 10 | 0.4 | 2631.99 | 0.205 | 0.056 | 0.0145 | 4.442 | 4.891 | 10 | 62.2 | 10.2 | 9.0 | 0. |
| 20 | 0.8 | 2639.21 | 0.162 | 0.048 | 0.0118 | 4.721 | 5.121 | 8 | 68.4 | 11.8 | 10.6 | 0. |
| 50 | 1.9 | 2649.62 | 0.112 | 0.031 | 0.0079 | 5.077 | 5.454 | 7 | 77.9 | 14.6 | 13.3 | 0. |
| 100 | 3.8 | 2658.43 | 0.074 | 0.014 | 0.0046 | 5.372 | 5.748 | 7 | 86.8 | 17.5 | 16.1 | 0. |
| 200 | 7.6 | 2665.91 | 0.043 | 0 | 0.0018 | 5.630 | 6.012 | 7 | 95.2 | 20.7 | 19.1 | 0. |
| 300 | 11.5 | 2666.98 | 0.033 | 0 | 0.0014 | 5.709 | 6.057 | 6 | 96.7 | 21.3 | 19.8 | 0. |
| ≈ 740 | 28.2 | 2670.72 | 0 | 0 | 0 | 6.002 | 6.220 | 4 | 102.2 | 23.7 | 22.9 | 0. |

Гнейс, покров Тамбо, Альпы

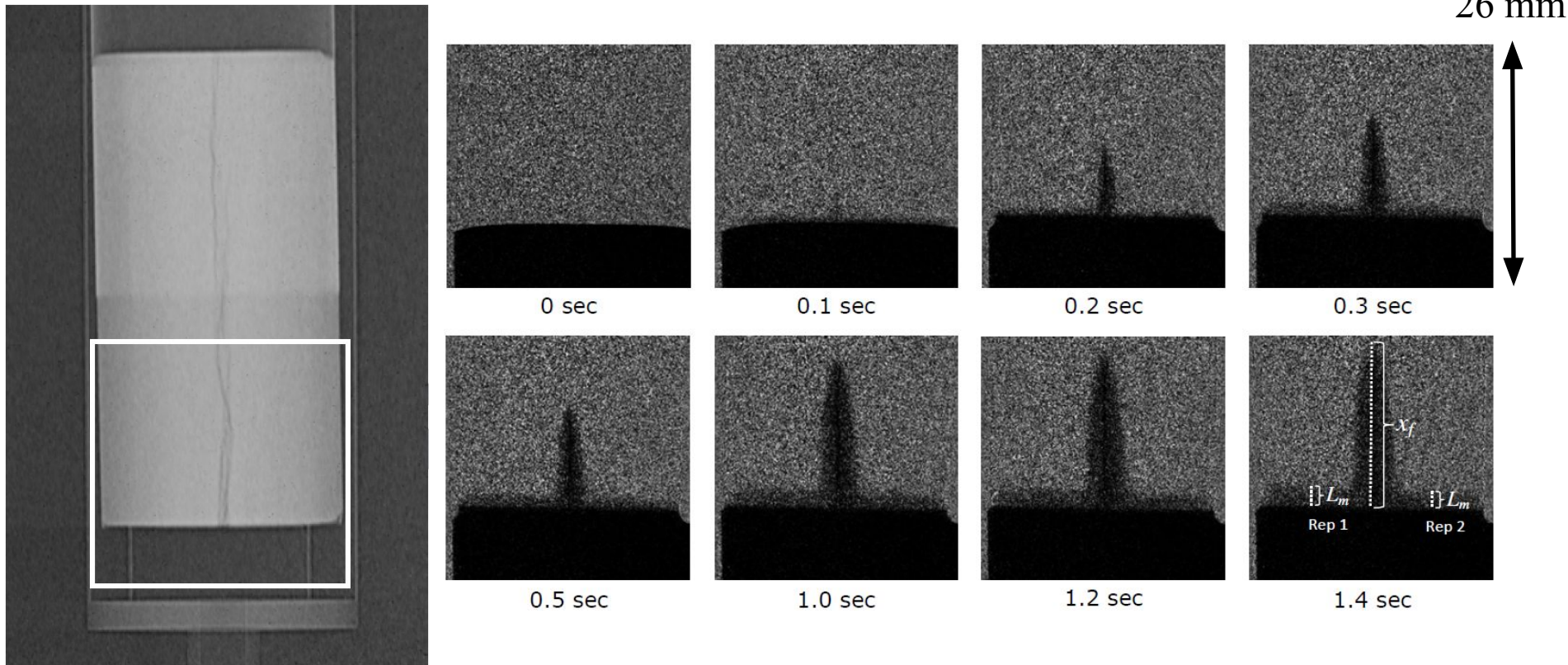


R. Keppler et al. (2021) Solid Earth, 10.5194/se-12-2303-2021

R.N. Vasin et al. (2017) Geophys. J. Int. 10.1093/gji/ggw487

Water uptake into fractured rocks

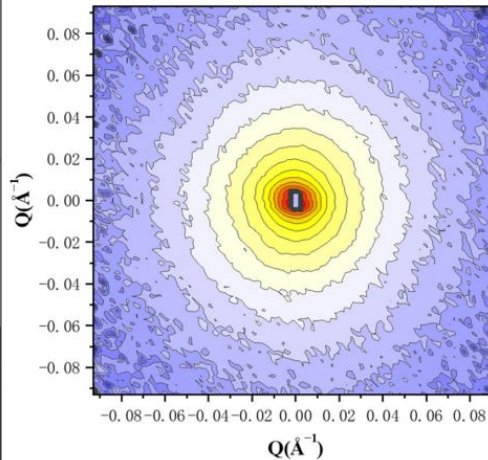
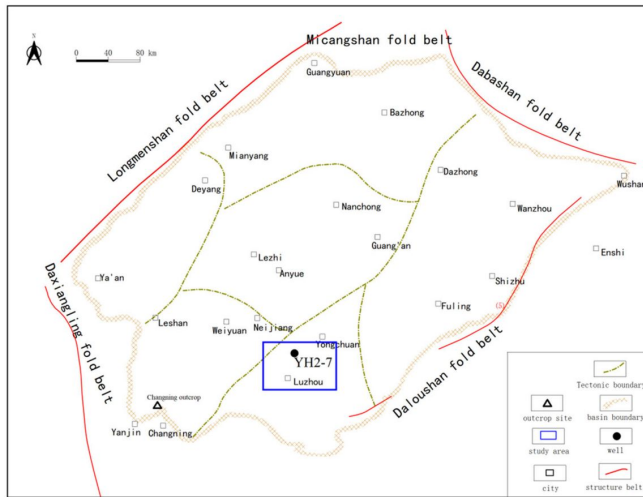
The fluid permeability of rocks is important for waste storage, oil and gas extraction, models of seismic zones.



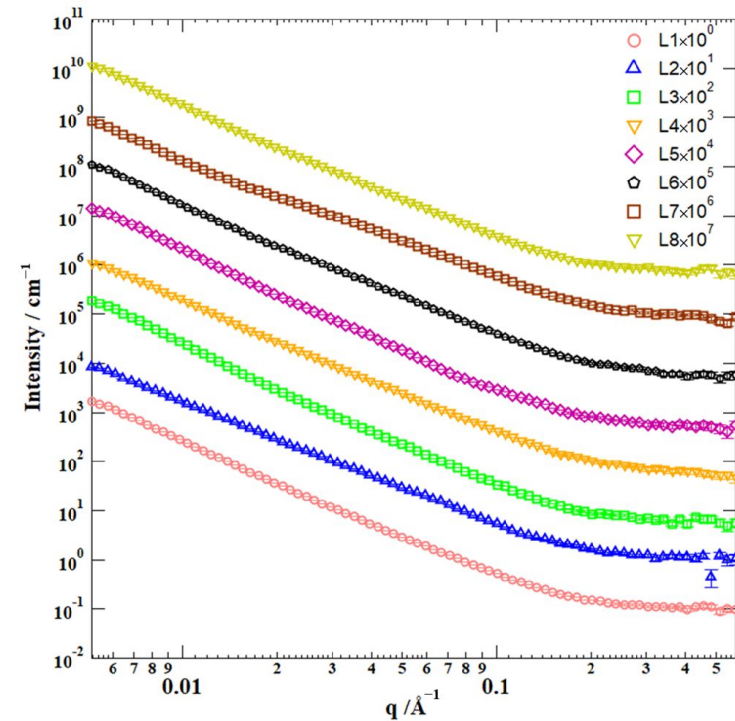
The water uptake into fracture was very fast: 2-3 cm per second. It is due to the combination of capillary rise of water within the fracture and spreading over the rough surfaces of the fracture faces (water rise through rough surface is preferred compared to the smooth surface!).

Определение пористости сланцев

Трудноизвлекаемые запасы углеводородов

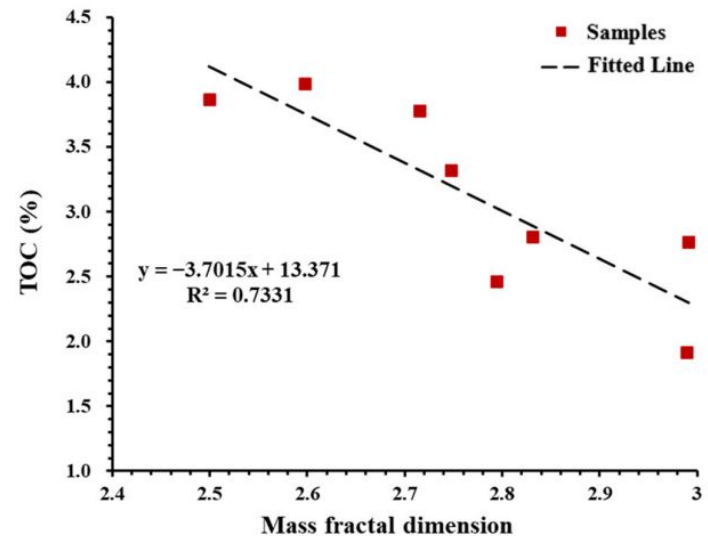


Анизотропия?

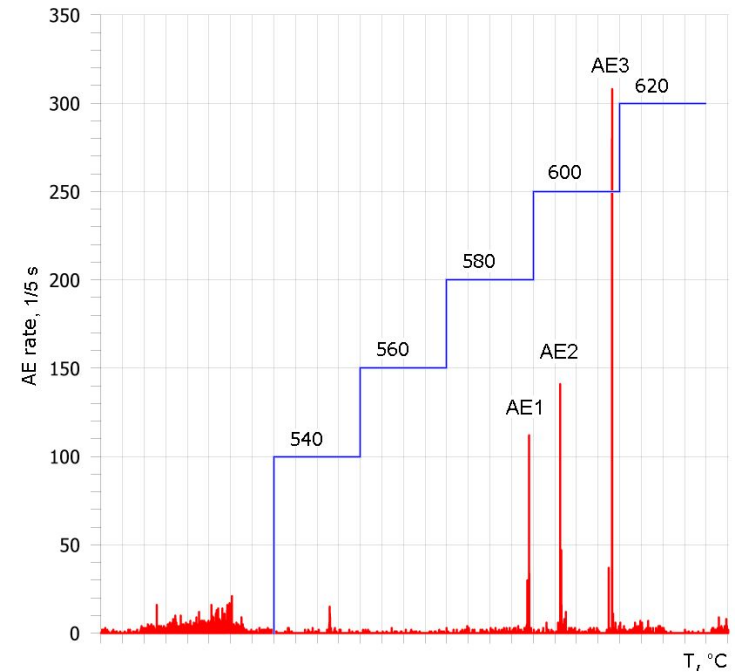
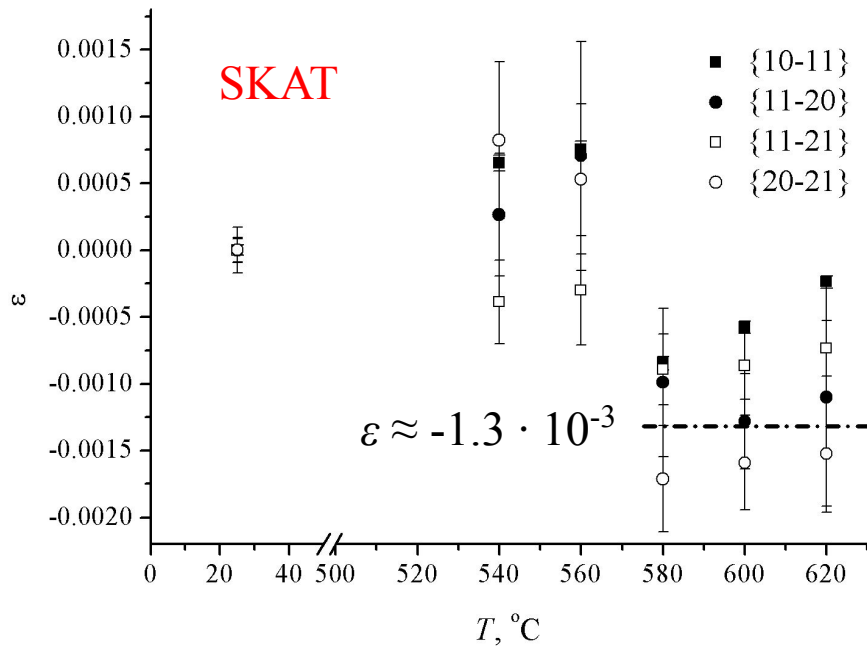
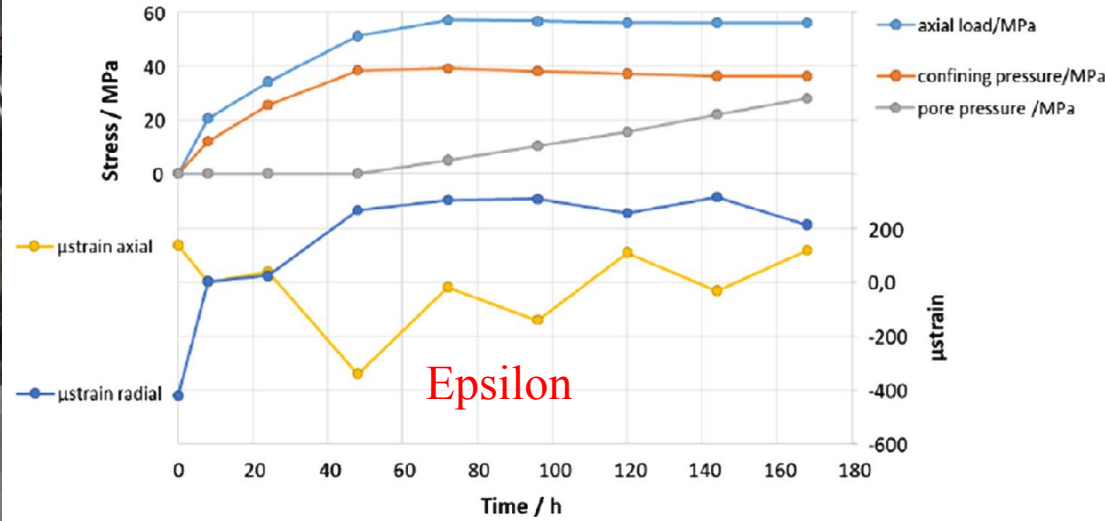
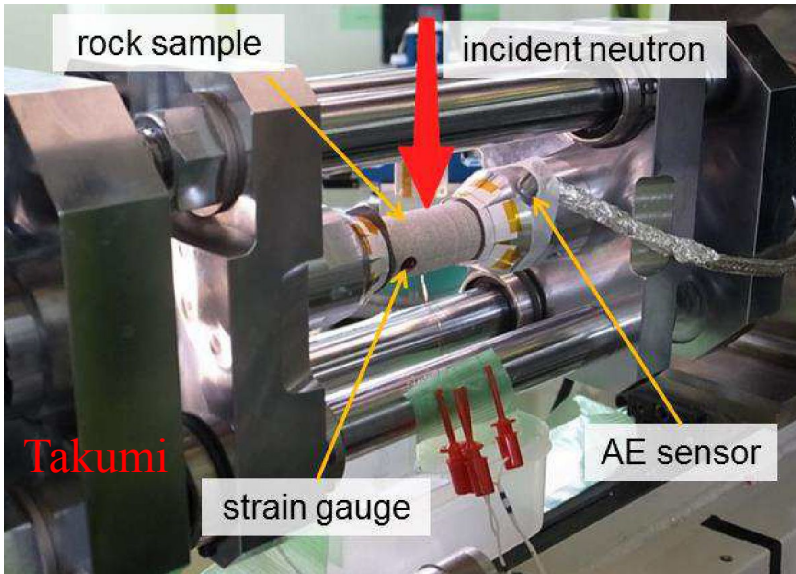


Shales from Southern Sichuan Basin (China), 4 km burial depth

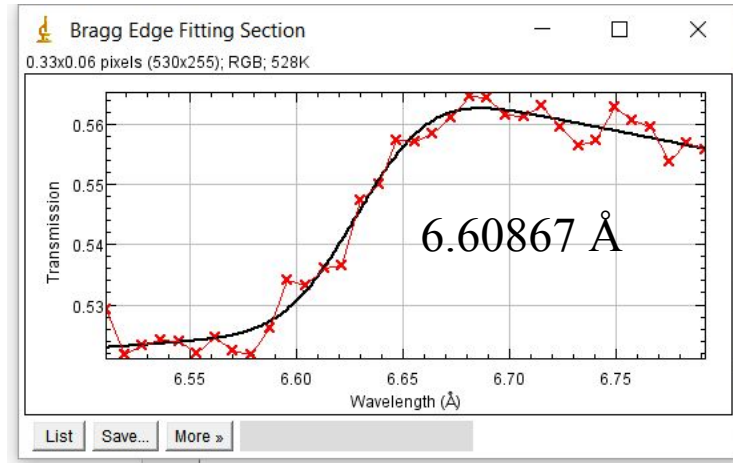
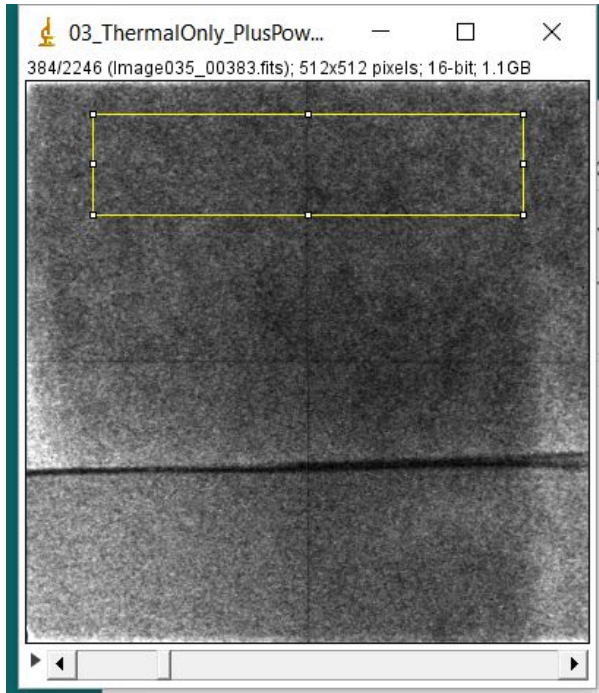
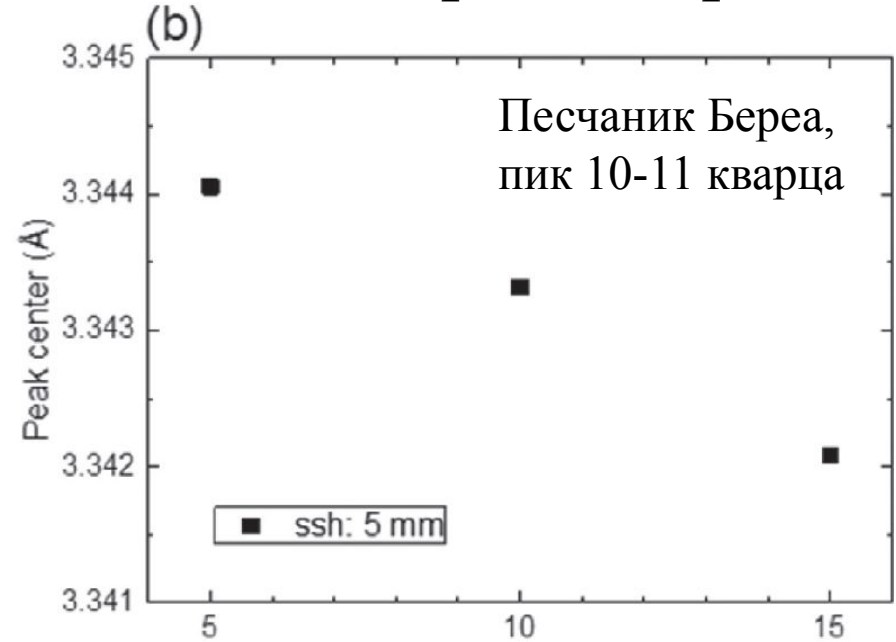
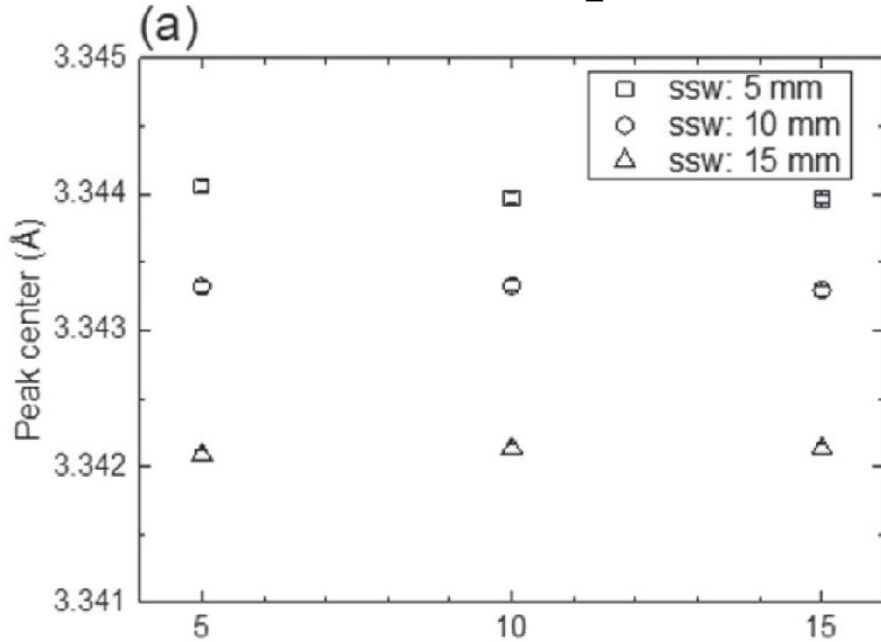
| Sample | Mass Fractal Dimension | R ² | Porod Porosity (%) |
|--------|------------------------|----------------|--------------------|
| L1 | 2.831 | 0.9988 | 5.81 |
| L2 | 2.597 | 0.9977 | 5.69 |
| L3 | 2.991 | 0.9981 | 4.82 |
| L4 | 2.715 | 0.9982 | 4.83 |
| L5 | 2.989 | 0.9977 | 4.25 |
| L6 | 2.747 | 0.9976 | 4.25 |
| L7 | 2.499 | 0.9968 | 5.70 |
| L8 | 2.794 | 0.9985 | 4.39 |



Сейсмичность и трещинообразование в горных породах



Сейсмичность и трещинообразование в горных породах



ssw (mm)

Гранит из Твейн Харт.
Данные А. Тремсина
(Университет
Калифорнии в Беркли),
J-PARC

A.N. Nikitin et al. (2006) PEPAN Letters, 10.1134/S1547477106010067

J. Abe et al. (2014) Mater Sci. Forum, 10.4028/www.scientific.net/MSF.777.219

J. Abe et al. (2018) Physica B, 10.1016/j.physb.2018.01.062

G. Gudehus et al. (2022) Acta Geotechnica, 10.1007/s11440-022-01513-9

Осталось за кадром

- ✓ Водородная энергетика
- ✓ Экология
- ✓ Материалы для катализа
- ✓ Фармацевтика
- ✓ *In situ* синтез, кристаллизация/рекристаллизация
- ✓ Аэрогели
- ✓ Композиты (например, металлы, армированные стекловолокном)
- ✓ металлоорганические каркасы
- ✓ Металлические стёкла
- ✓ Бетоны/цементы
- ✓ Эмфанизис (материалы с локальным нарушением симметрии при нагреве)
- ✓ ...
- ✓ Data-driven analysis

Резюме

- Практически все методики рассеяния нейтронов используются для исследований функциональных, «умных», конструкционных, биоматериалов, ... и готовых изделий. Огромное количество задач в самых различных областях!
- Перспективы на 20 лет – аддитивные технологии, метаматериалы, высокоэнтропийные сплавы,...
- Геофизические применения – в основном дифракция (структура, текстура, механические напряжения), радиография/томография, МУРН, ...
- Измерение большого количества образцов, *in situ* измерения, уменьшение gauge volume для «локальных» измерений (pinhole diffraction, ≈ 250 мкм), исследования микроструктуры → требуется увеличение потока
- Измерение деформаций, искажений структуры → требуется улучшение разрешения
- Интересны оптимизация структуры/микроструктуры, процесса производства, эксплуатационных характеристик в разных условиях. Новые материалы, процессы, свойства? Требуются «сложные» системы окружения образца (магнитное поле + нагрев + нагрузка + ... + оптимизация для многодетекторной конфигурации спектрометра), чтобы быть готовыми к их изучению!

Резюме

- Временной фактор для некоторых экспериментов фиксирован (in situ нагрев/охлаждение, заряд/разряд, циклирование нагрузки с постоянной скоростью), поэтому желательно некоторое «дублирование» функций инструментов.
- Комбинирование методов (дифракция + МУРН, дифракция + томография/радиография, дифракция + неупругое рассеяние) встречается относительно редко, хотя выглядит перспективно! По-видимому, связано с инструментами и привычками исследователей...
- Эксперименты по полному рассеянию и глубоко неупругому рассеянию требуют горячего источника (~ 2500 К)
- Больше объём информации – усовершенствование методов обработки данных и моделирования
- Нужны люди!

Спасибо за внимание!