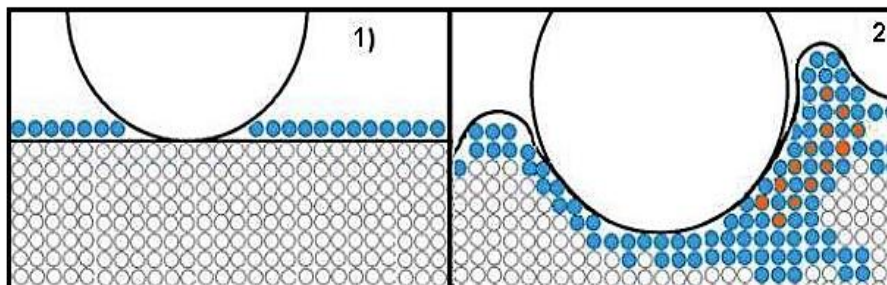
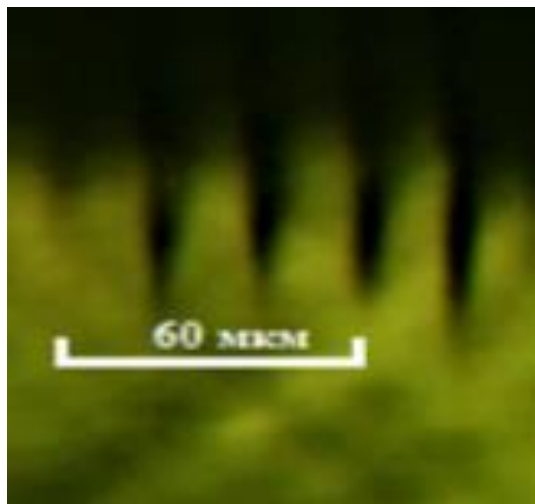


ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА РАН
Черноголовка, Россия

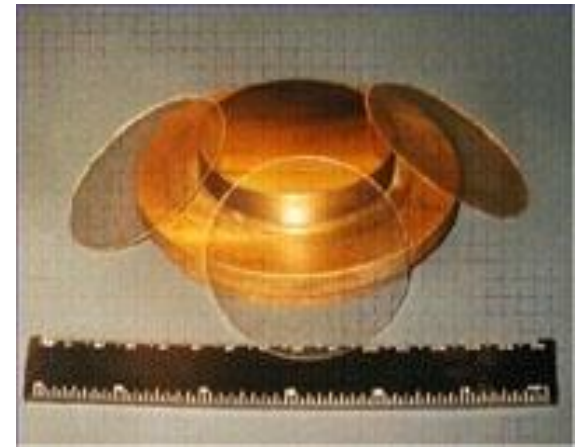
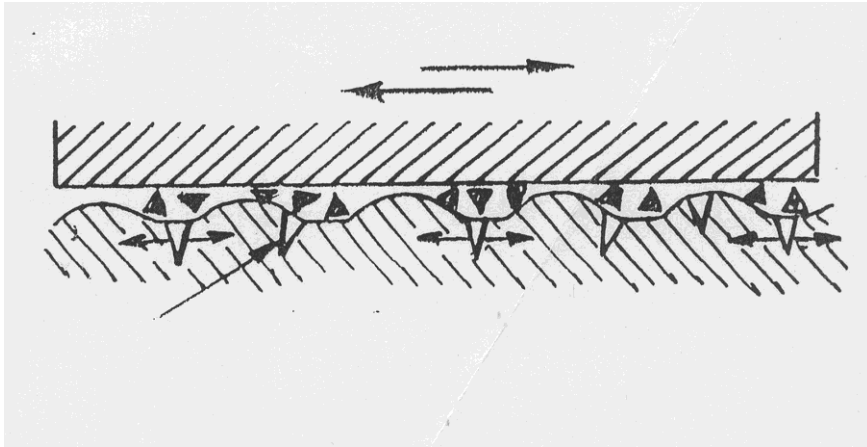


Классен Н.В., Цебрук И.С.

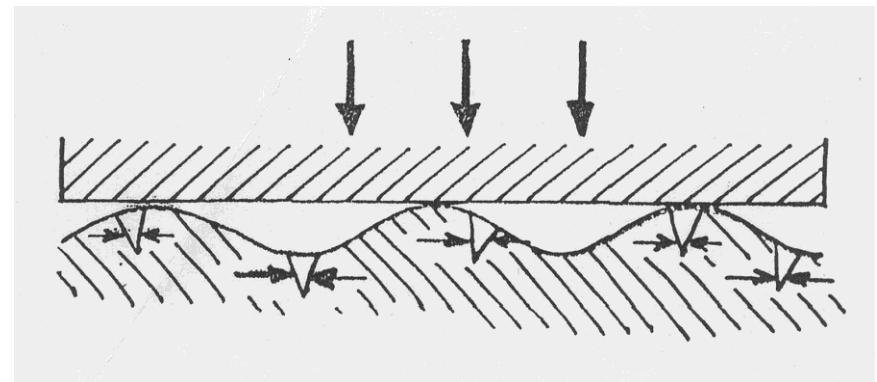
Наноскопика и перспективы деформационного легирования материалов



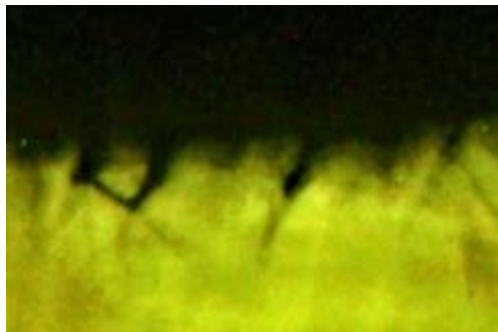
К идее деформационного легирования мы пришли «от противного». Для оптики сверхмощных лазеров было необходимо исключить образование шаржированного слоя, возникающего при полировке поверхности из частиц абразива (они сильно нагревались лазером и разрушали оптику). Пришлось придумать деформационную полировку – когда поверхность доводится до оптической гладкости не микроцарапанием абразивными порошинками, а разглаживанием твердым гладким пуансоном, играющим роль утюга. В итоге СССР лазерными пушками выдал из космоса американские шаттлы.



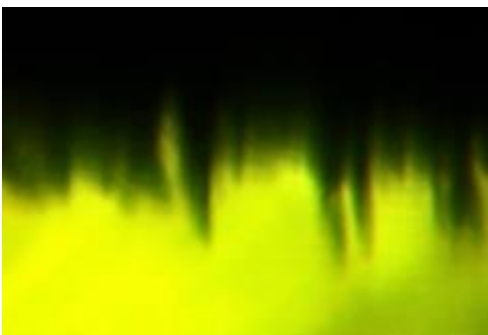
Но потом возник естественный вопрос: Если при фрикционной обработке в твердые пуансоны легко вводятся абразивные частицы, нельзя ли подобный процесс распространить на другие материалы, создав методику деформационного легирования ? .



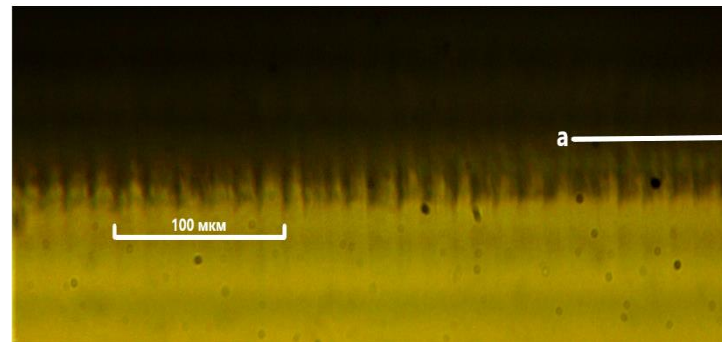
Быстро провели простые эксперименты по «вдавливанию» инородных материалов в твердые тела и статическими, и динамическими деформационными нагрузками. Выяснилось, что наиболее эффективно деформационное внедрение производится при шариковой обкатке, когда шарик из твердой стали возвратно – поступательно катается по обрабатываемой поверхности с нанесенным на нее внедряемым веществом



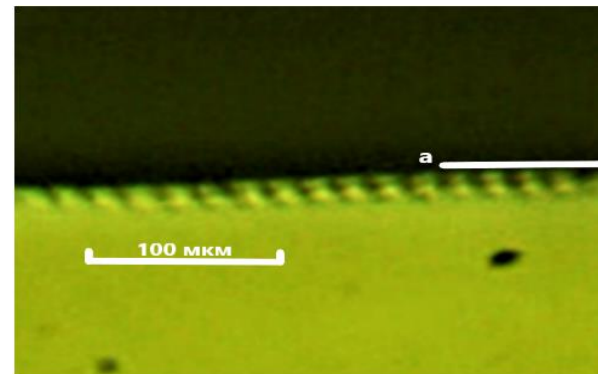
Внедрение без магнитного поля



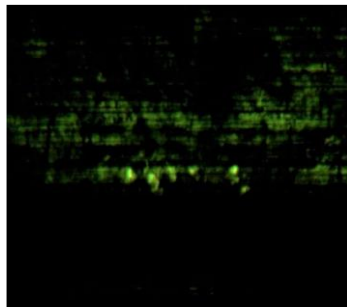
Внедрение с магнитного полем



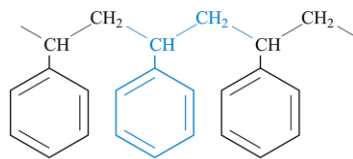
Внедрение углеродной нанопены



Внедрение микрочастиц углерода



Внедрение полистирола в приповерхностный слой кристалла CsI.



Рекордные характеристики легирования твердых тел шариковой обкаткой

Преимущества перед обычным термодиффузионным легированием:

Рекордные скорость и глубина (на сотню микрон меньше чем за час).

И это все – при комнатной температуре (а не при 1000° С)

Не требуется вакуум или какая-либо специальная атмосфера

Простота и доступность технологического оборудования

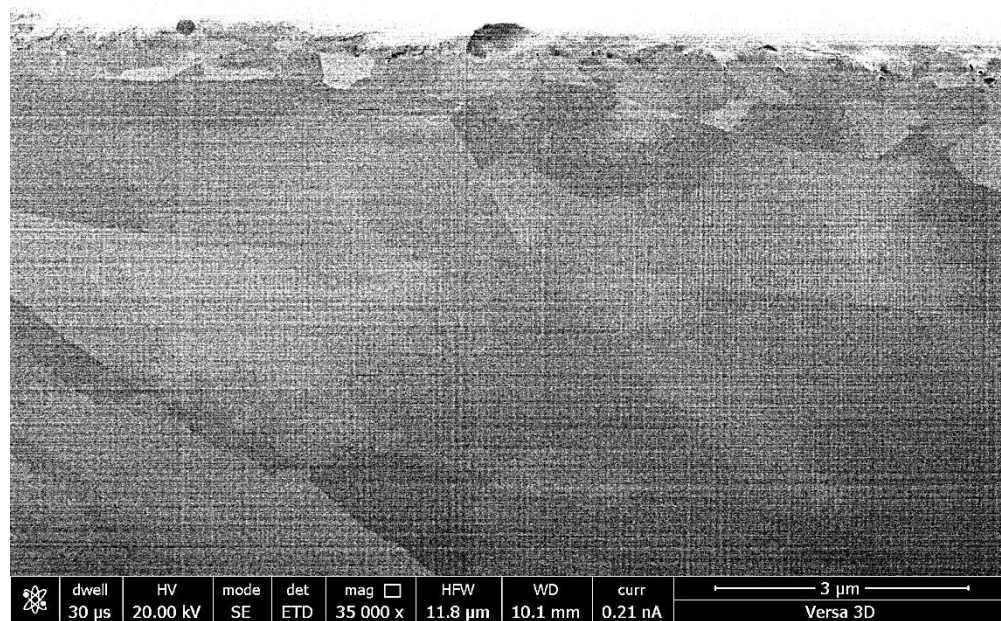
Возможность легирования металлических и других конструкций непосредственно на месте их применения (в том числе – и под водой)

Возможность глубокого внедрения в металлические материалы органических веществ (в том числе и полимеров)

Создание сверхструктур требуемых состава и морфологии на заданной глубине

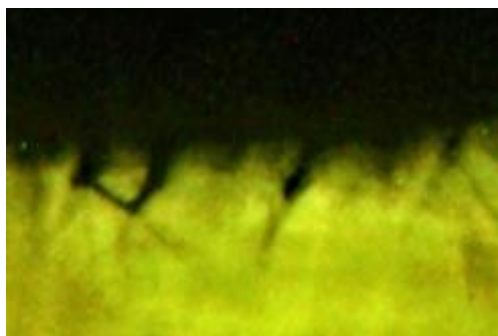
Интенсивные перемещения нанозерен при шариковой обкатке способствуют аномально быстрому массопереносу с поверхности в глубину обкатываемого металла

Это зарегистрировано и для неорганических, и органических веществ - на примерах внедрения молекул тефлона в сталь, серебра в медь и меди в сталь

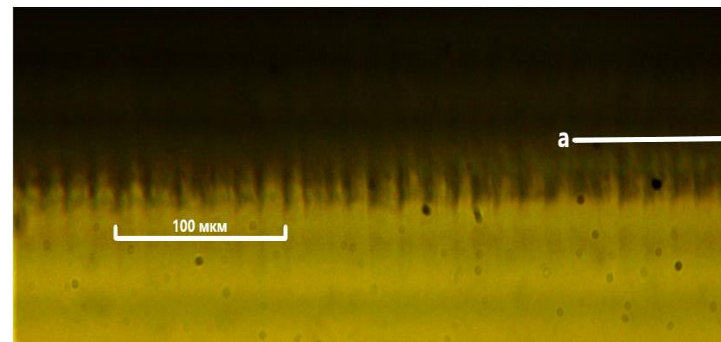
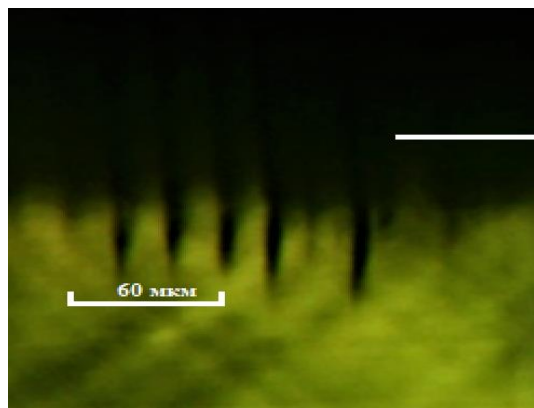


Многообразие микроморфологий внедрения шариковой обкаткой

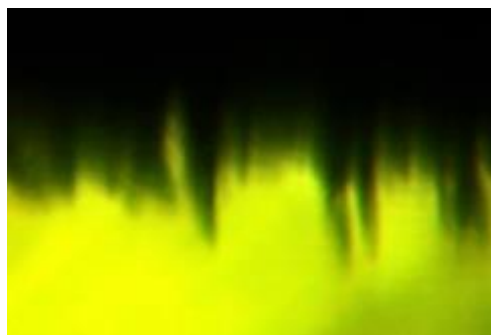
Внедрение наночастиц никеля в кристалл иодистого цезия



Внедрение без магнитного поля

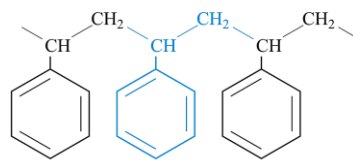
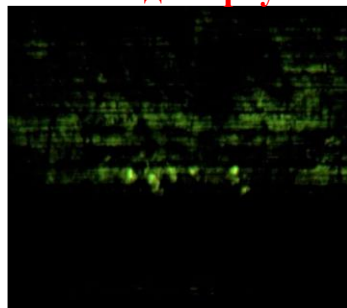


Внедрение углеродной нанопены

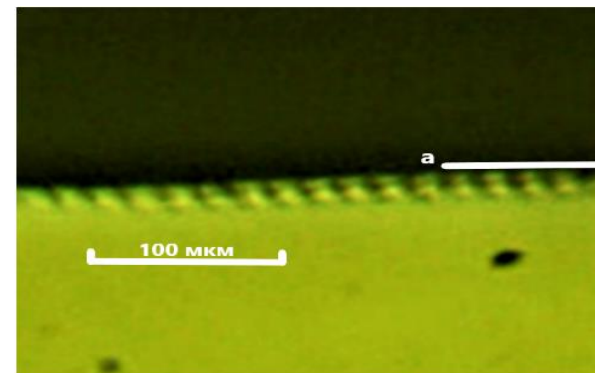


Внедрение с магнитным полем

Вид сверху

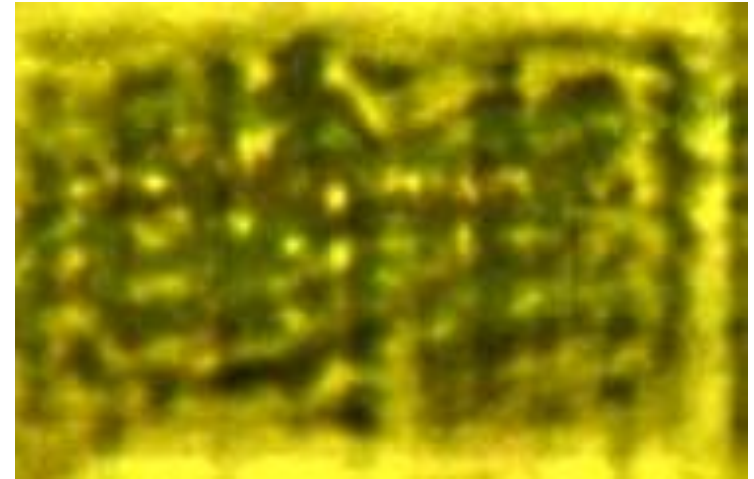
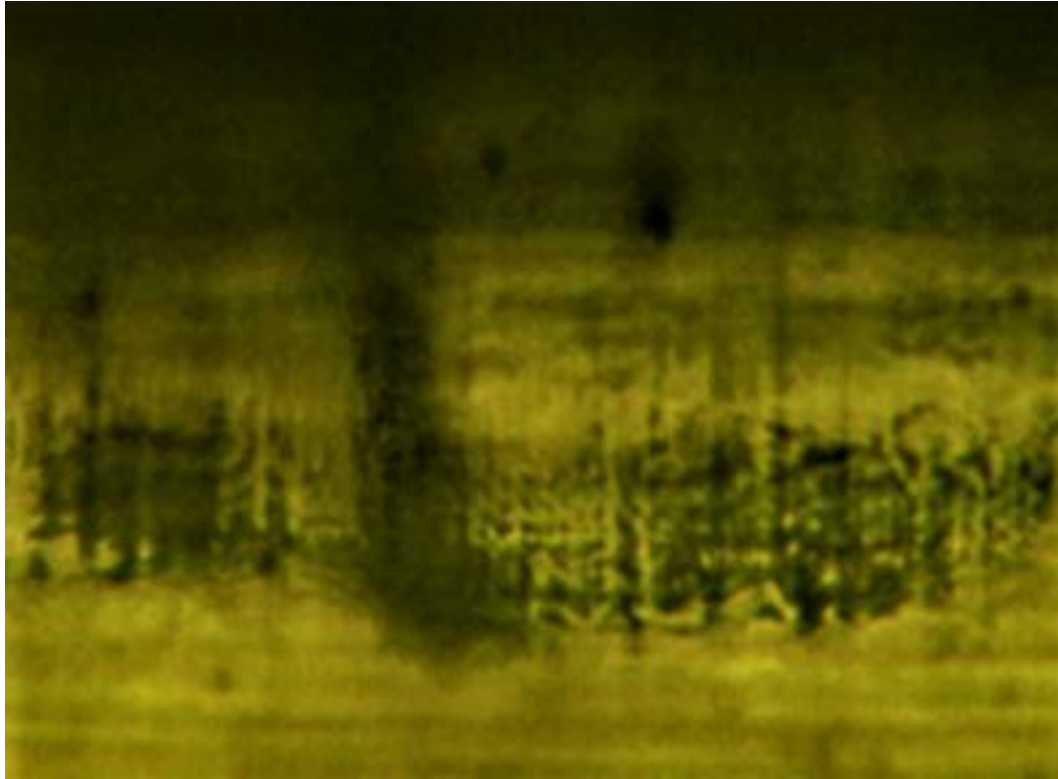


Внедрение полистирола в приповерхностный слой кристалла CsI.



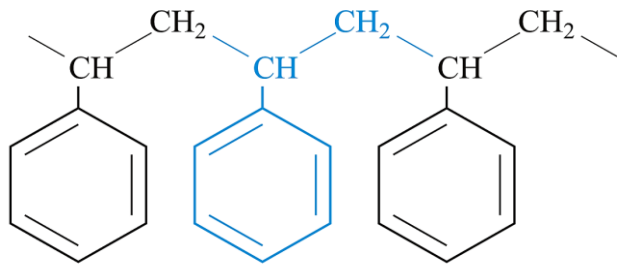
Внедрение микрочастиц углерода

Формирование периодических сверхструктур из легирующих компонентов на заданной глубине кристалла



Создание модулированных немонотонных распределений гетерогенных включений (углерод в иодиде цезия)

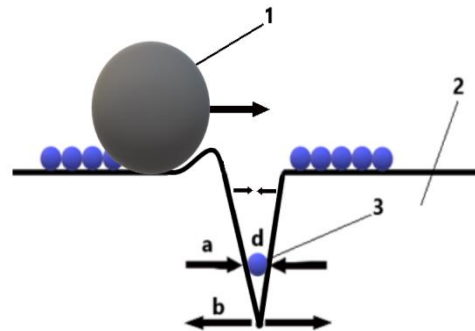
Полистирол



Легирование твердых тел полимерами – широкие возможности улучшения механических, антикоррозионных, антифрикционных, противоударных, оптических и прочих параметров



Версии для моделирования: эстафетная Генерация нанотрещин знакопеременной нагрузкой с захватом легирующего компонента с обкатываемой поверхности

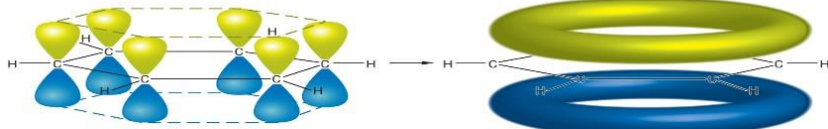
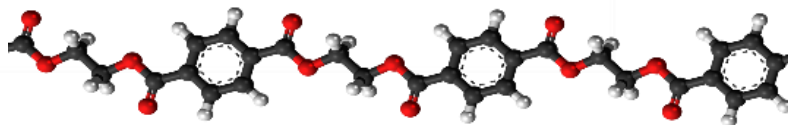
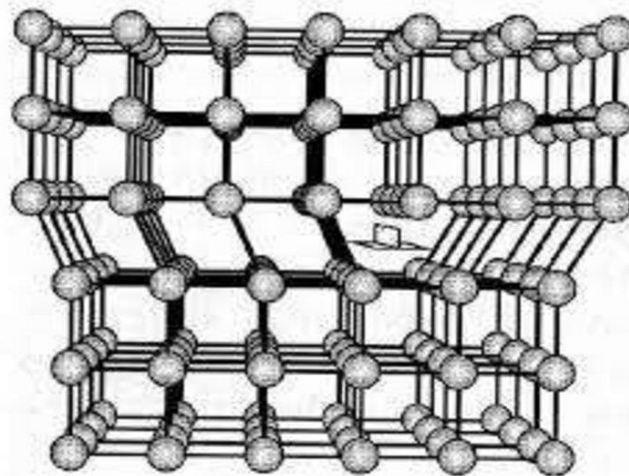


Захват лигандов вводимыми с поверхности внутрь кристалла дислокациями

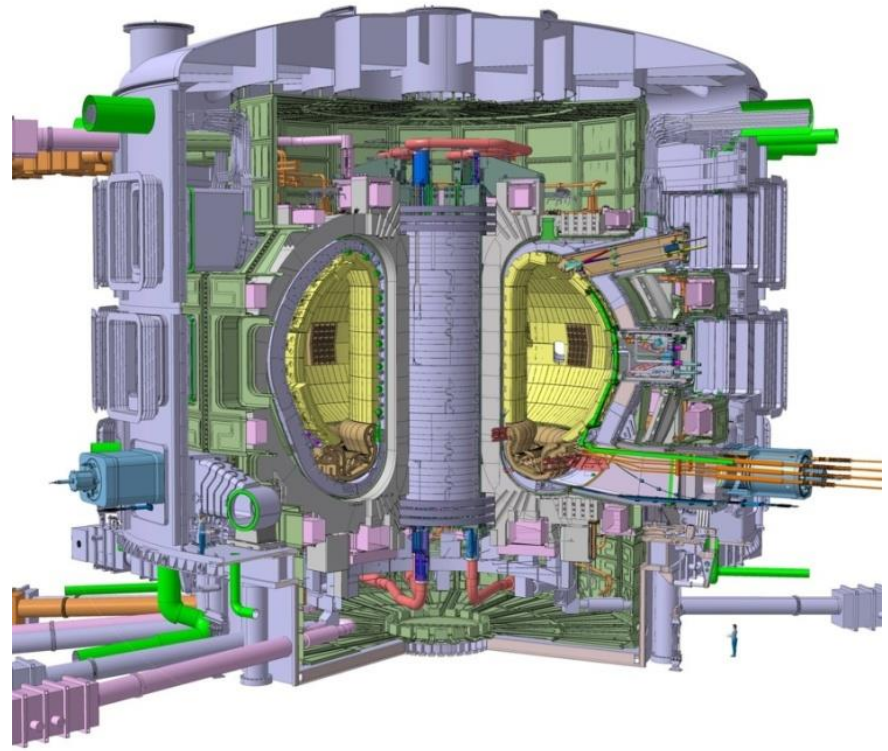
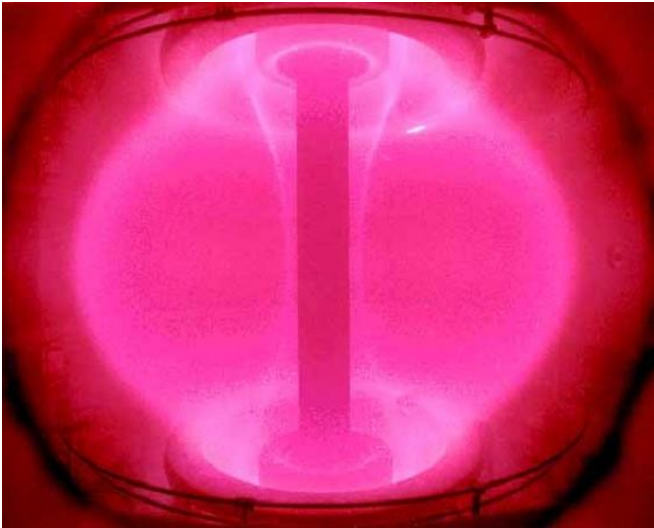
Вторая версия: комплементарность дислокаций и полимеров с захватом ионов ароматическими кольцами



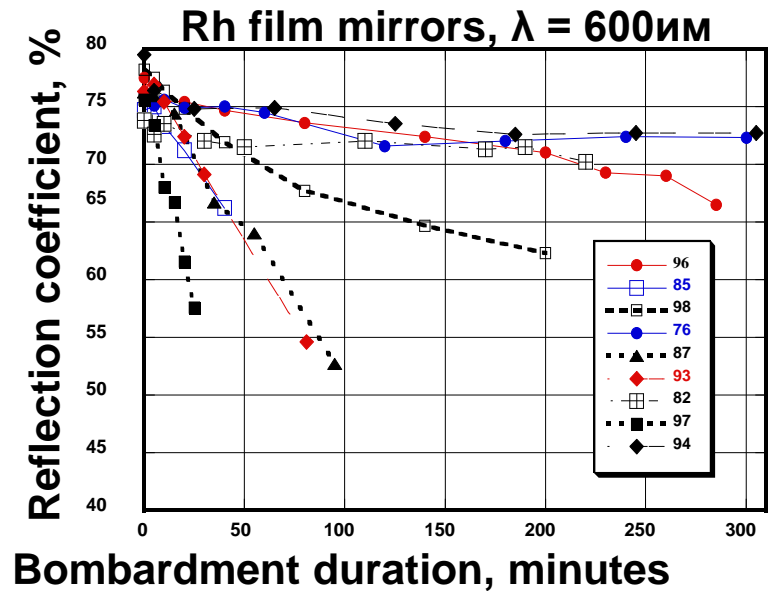
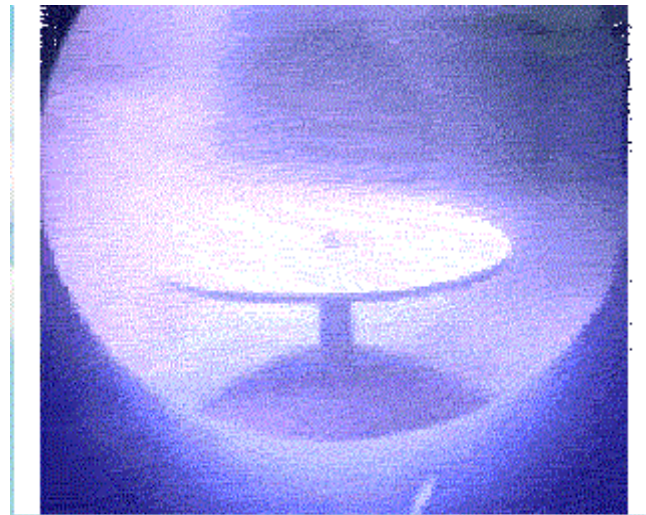
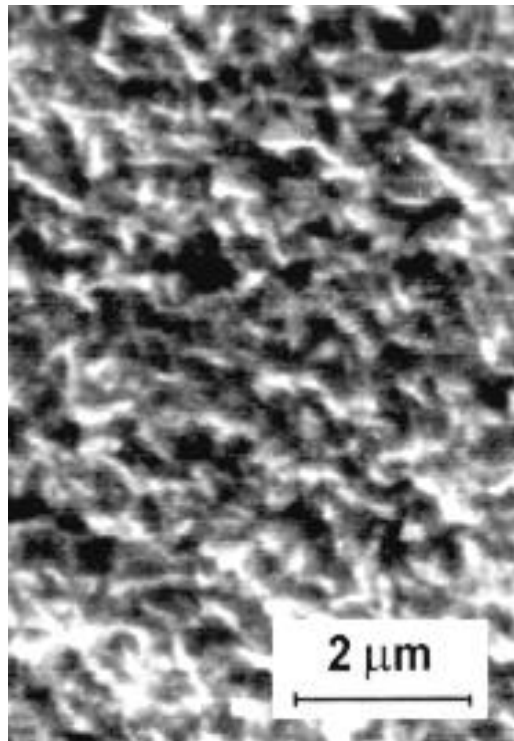
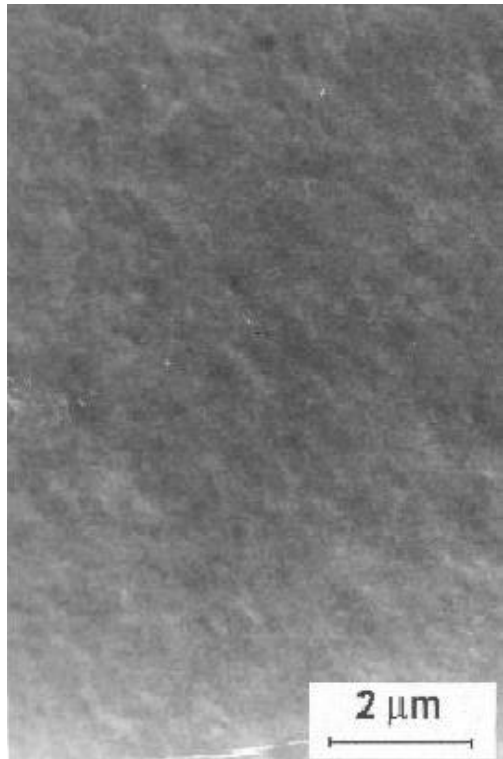
Краевая дислокация



Пониманию механизмов деформационного легирования сильно помогла проблема радиационно – прочных зеркал для Международного Экспериментального Термоядерного Реактора (ИТЭР). Она была решена разработкой динамической деформационной полировки зеркал, регистрирующих лазерные диагностические сигналы в непосредственной близости от шнура плазмы

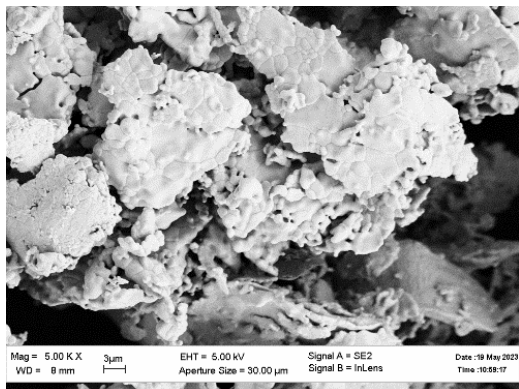


Для изготовления этих зеркал была применена модифицированная деформационная полировка. Вместо статического разглаживания использовалась шариковая обкатка. Приповерхностный слой при таком разглаживании становился нанозерненным. Зеркала с нанозерненной поверхностью показали отличную оптическую стойкость при ионном распылении десятков микрон приповерхностного слоя.

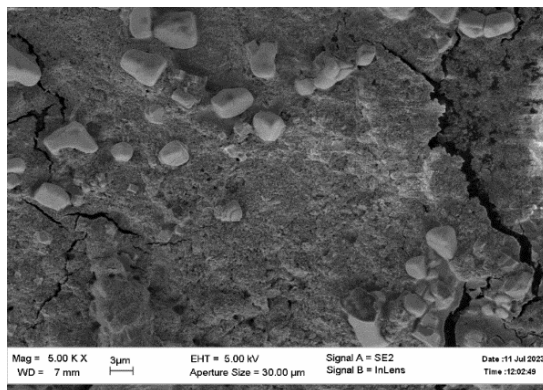


Химическая само-активация поверхности сферических наночастиц

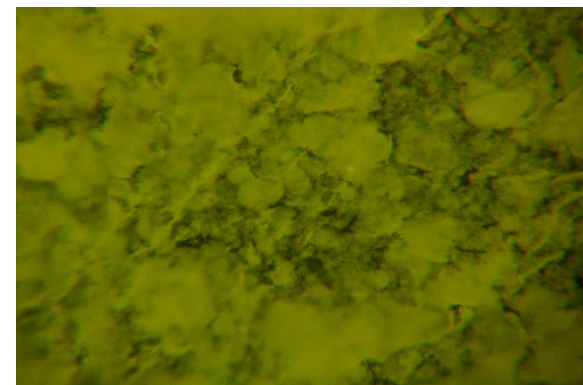
Микрочастицы



Исходный порошок CsI

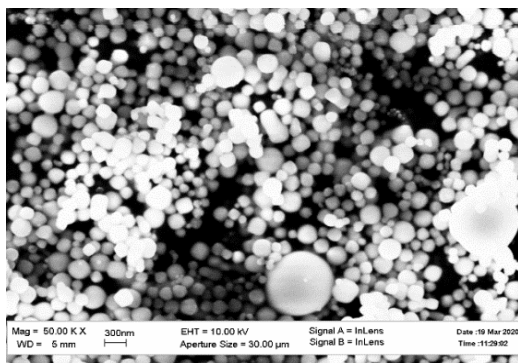


Композиция полистирола с CsI

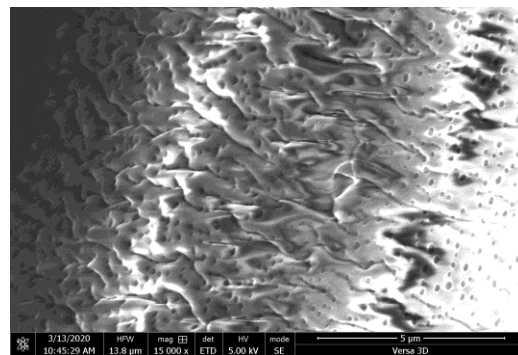


Оптическая микроскопия композиции

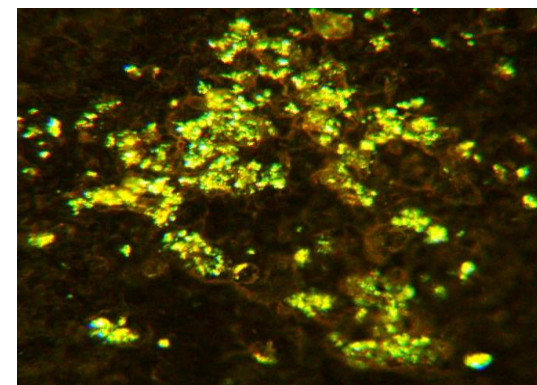
Наночастицы



Наночастицами CsI

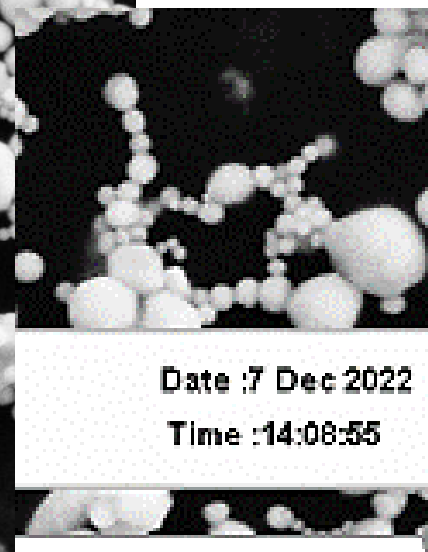
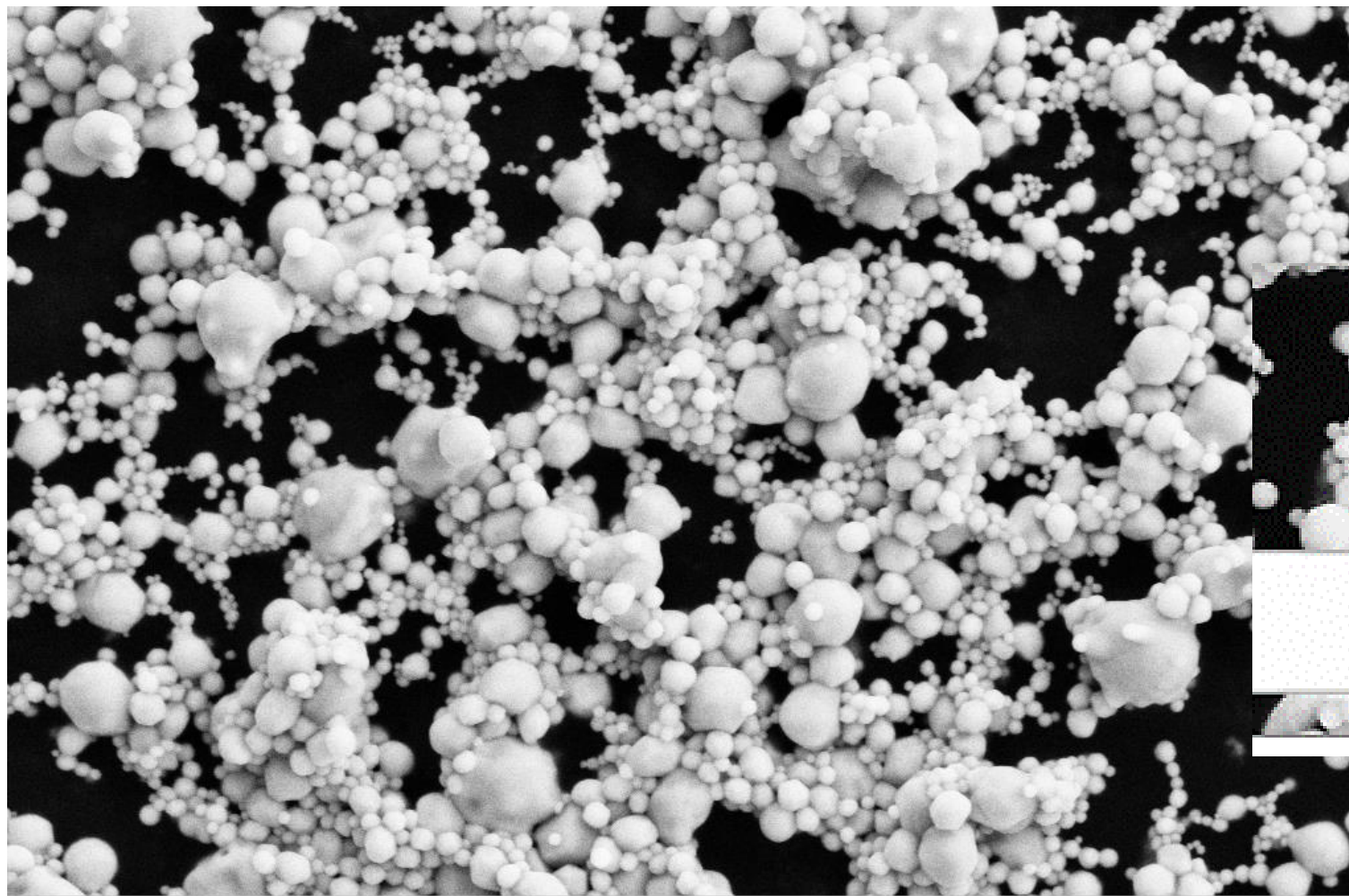


Композиция полистирола с CsI



Оптическая микроскопия композиции

Выстраивание наночастиц в цепочки



Date :7 Dec 2022

Time :14:08:55

Mag = 10.00 K X
WD = 8 mm

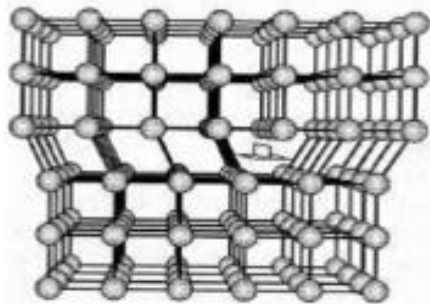
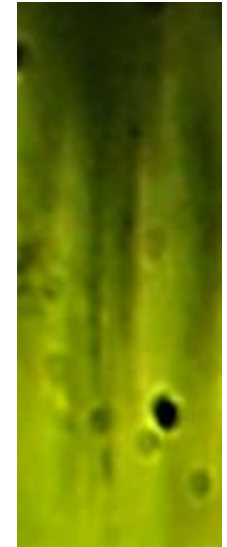
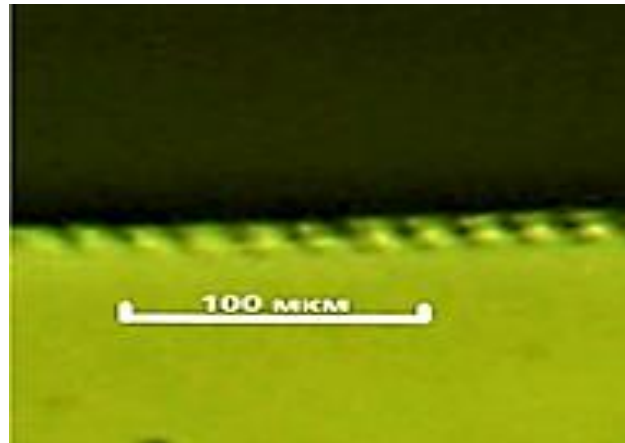
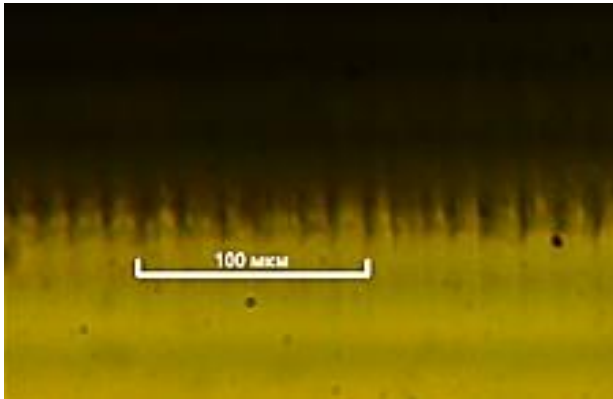
1 μ m
┌──┐

EHT = 10.00 kV
Aperture Size = 30.00 μ m

Signal A = SE2
Signal B = InLens

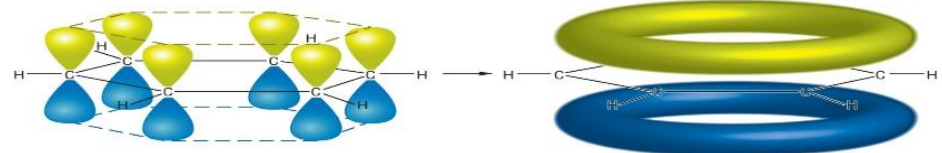
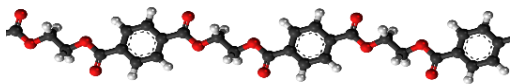
Date :7 Dec 2022
Time :14:08:55

Версия дислокационного массопереноса

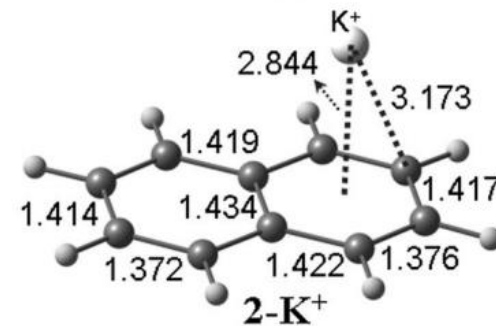
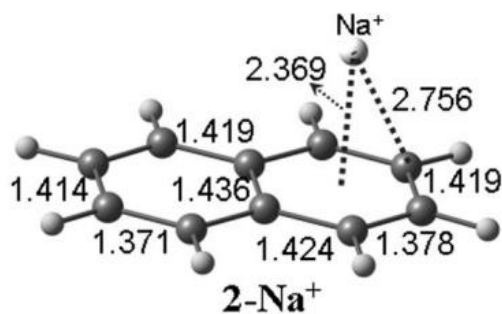
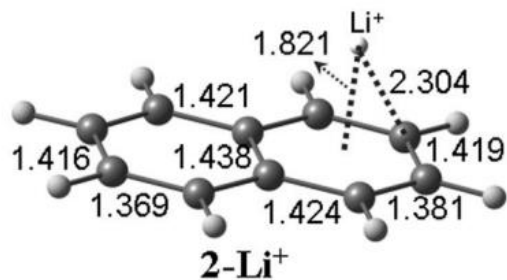
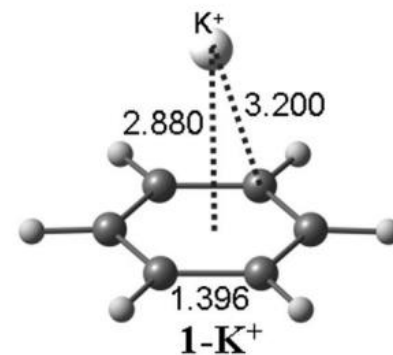
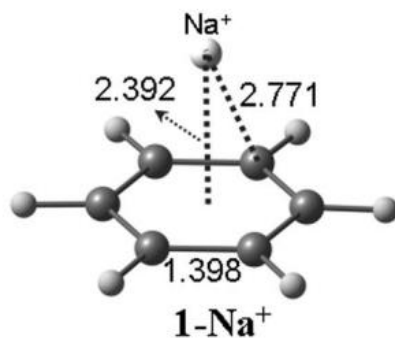
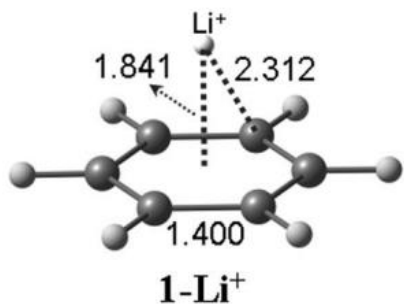


Ядра дислокаций соразмерны полимерным молекулам и способны их захватывать, понижая внутреннюю энергию.

Не могут ли дислокации с полимерами значительно легче перемещаться по кристаллической решетке за счет подвижности переключения полимерных связей (например, через протоны или пи-электроны)



Ароматика - катионы



Ароматика с лигандами

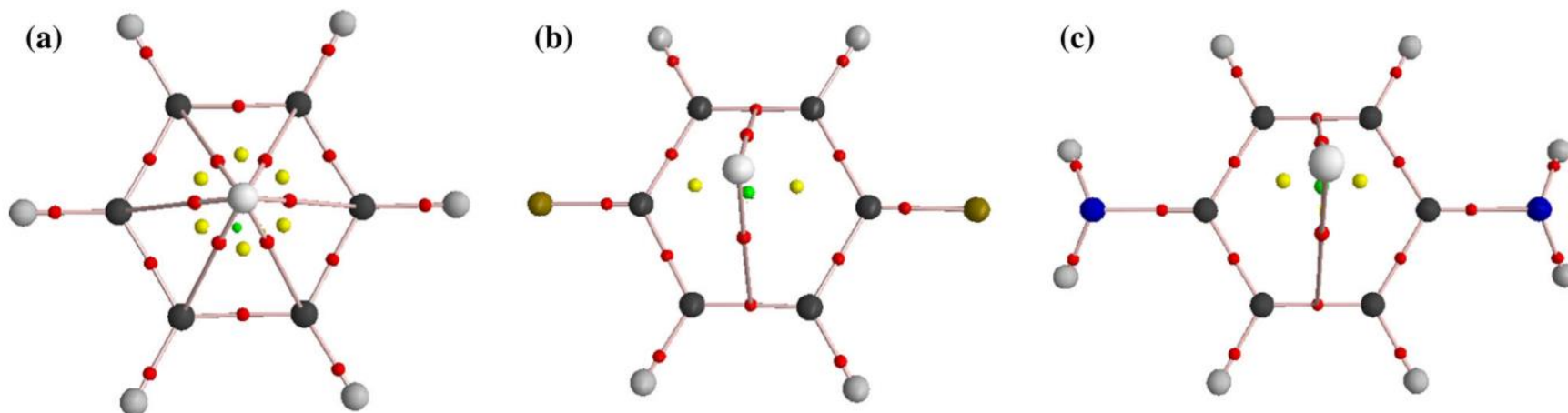
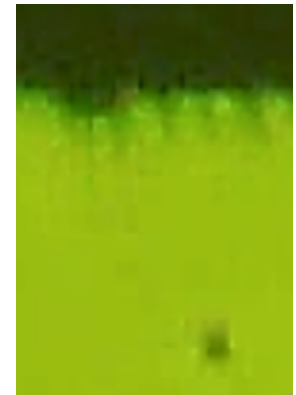
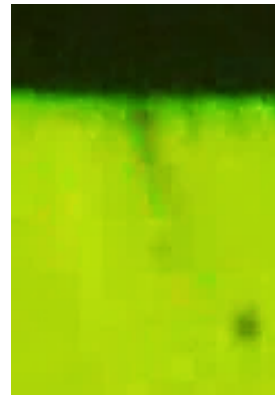
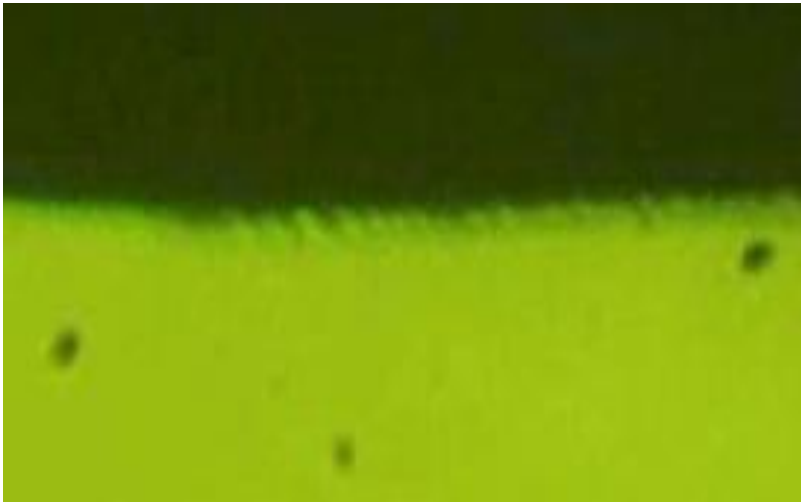
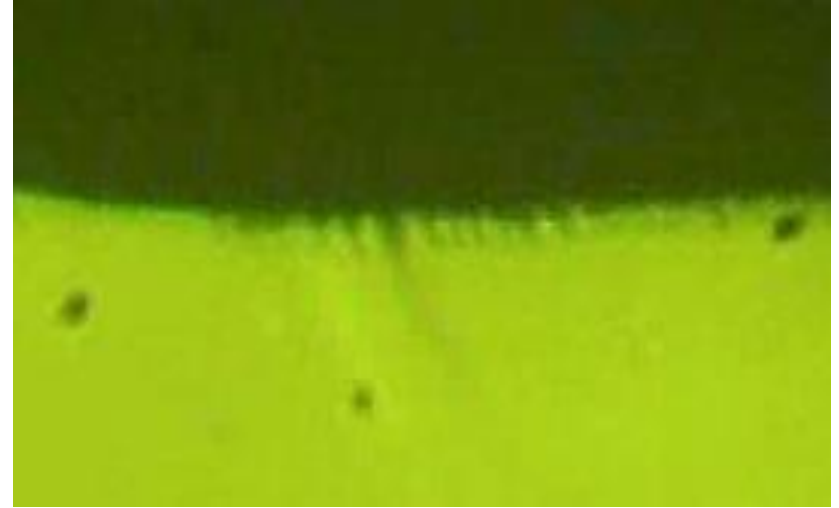
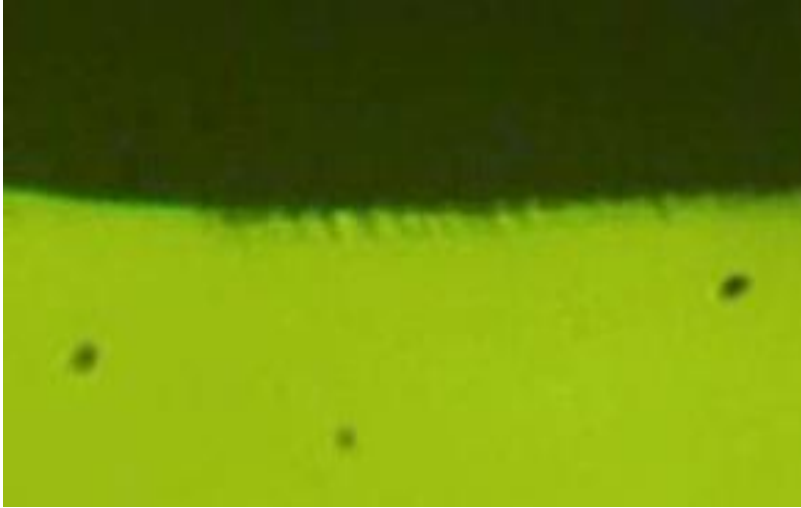


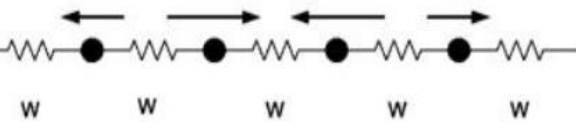
Fig. 2 Schematic representation of distribution of critical points in **a** A-Be²⁺, **b** B-Be²⁺, and **c** G-Be²⁺ complexes. Small *red spheres*, small *yellow spheres*, small *green sphere* and *lines* represent bond

critical points (BCPs), ring critical points (RCPs), cage critical point (CCP), and bond paths, respectively (Color figure online)

Возвратно – поступательный массоперенос при шариковой обкатке (дискретный бризер ?)



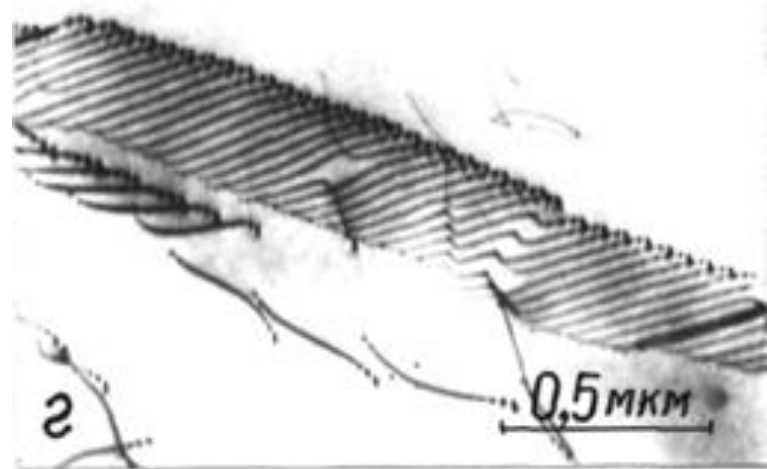
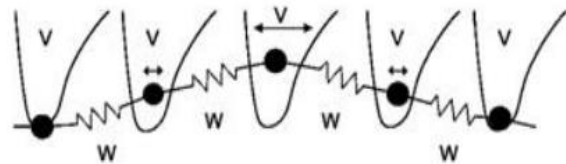
Предположение к модели дискретных бризеров – дислокационный бризер



В)



С)



Выигрышные характеристики легирования твердых тел шариковой обкаткой

Преимущества перед обычным термодиффузионным легированием:

Рекордные скорость и глубина (на сотню микрон меньше чем за час).

И это все – при комнатной температуре (а не при 1000° С)

Не требуется вакуум или какая-либо специальная атмосфера

Простота и доступность технологического оборудования

Возможность легирования металлических и других конструкций непосредственно на месте их применения (в том числе – и под водой)

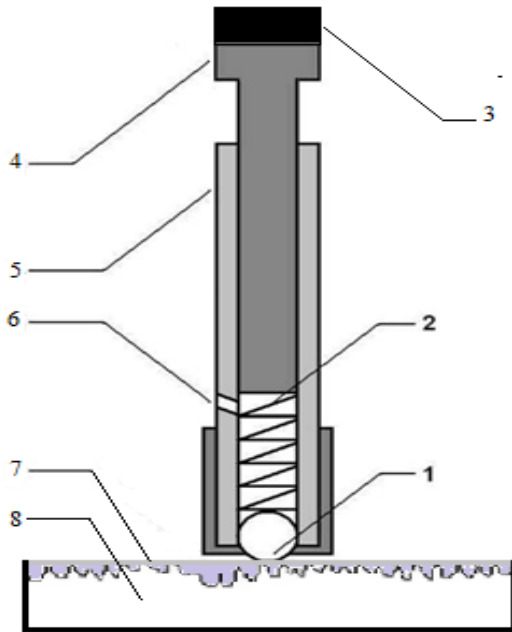
Возможность глубокого внедрения в металлические материалы органических веществ (в том числе и полимеров)

Создание сверхструктур требуемых состава и морфологии на заданной глубине

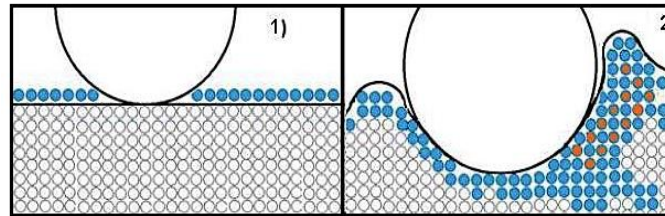
Области применения химической пассивации поверхностей деформационной полировкой: необмерзающие провода, нержавеющие и необмерзающие корабли, нержавеющие мосты, опоры и даже непригорающие сковородки и др.



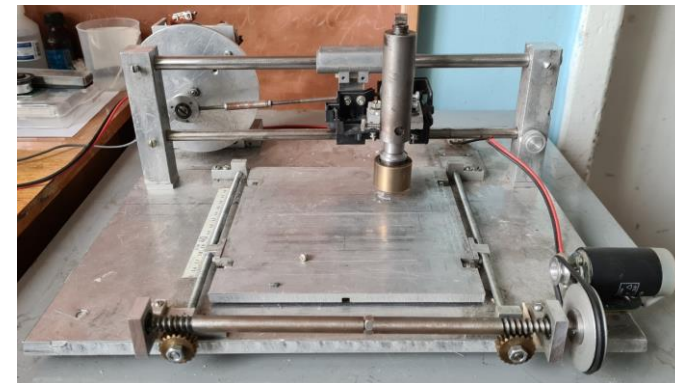
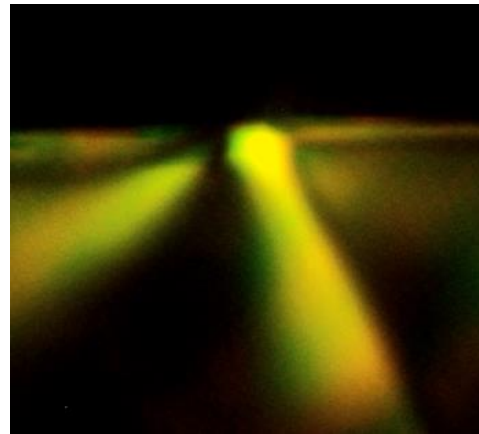
Схема процесса шариковой обкатки



1-стальной шарик, 2- пружина, 3- грузик, 4-стержень, 5- каркас, 6- отверстие для легирующей жидкости, 7- внедрённое инородное вещество, 8- образец.

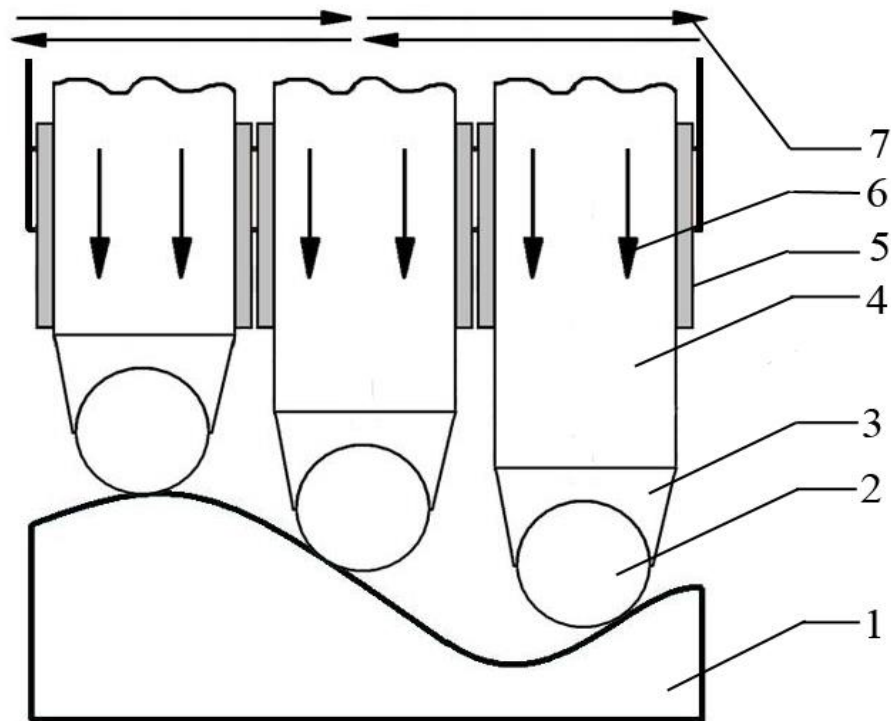
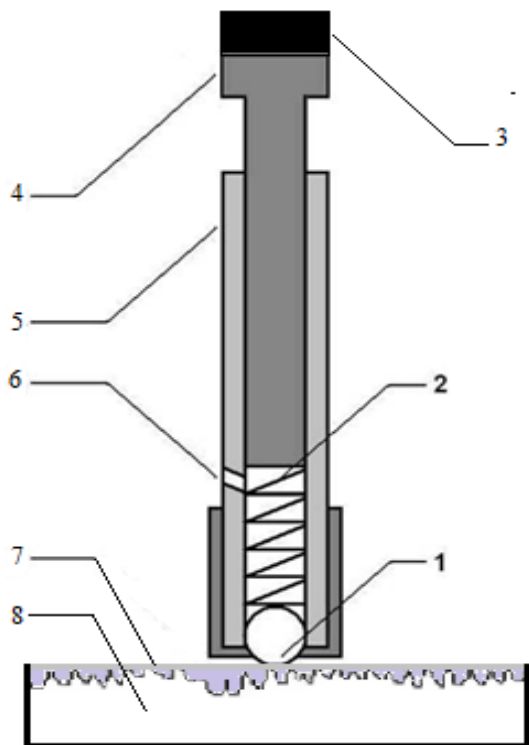


Обкатывающий шарик одновременно с локальным пластическим деформированием приповерхностного слоя материала внедряет туда наночастицы, предварительно нанесенные на поверхность образца

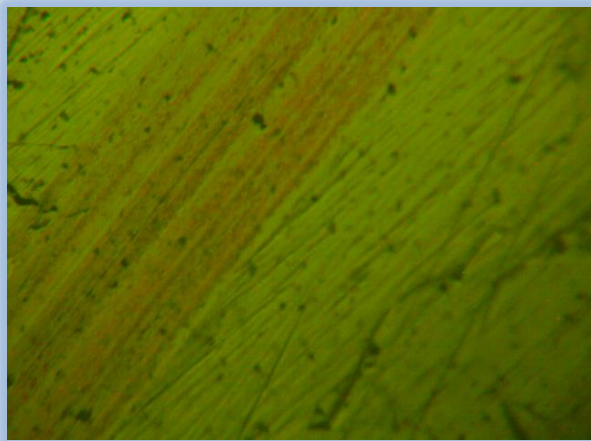
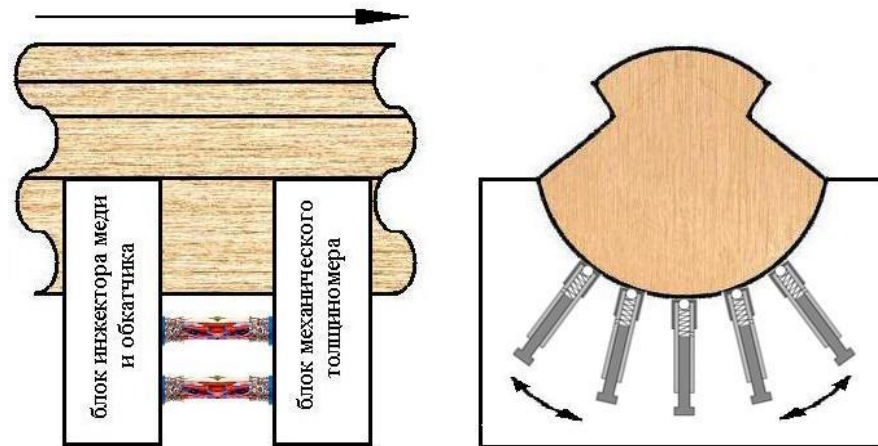


Установка для локального пластического деформирования приповерхностного слоя

Деформационное легирование обкаткой больших площадей сложных форм (в том числе и под водой)

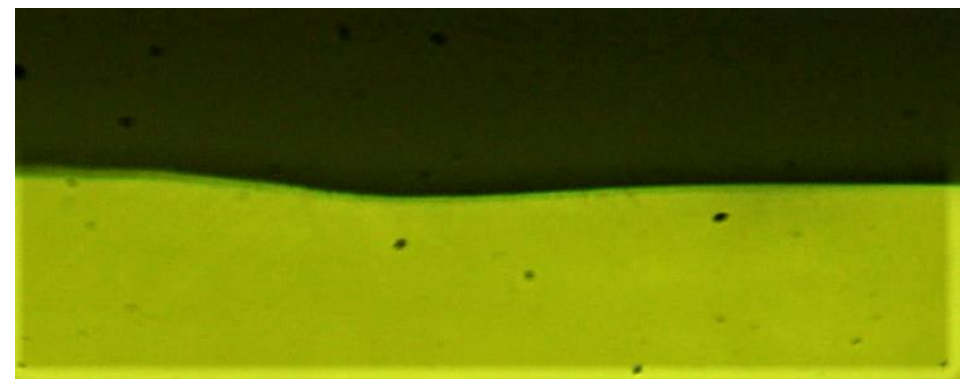


10-классница Даша Бурова: Восстановление изношенных участков контактных проводов наращиванием меди обкаткой прямо на месте

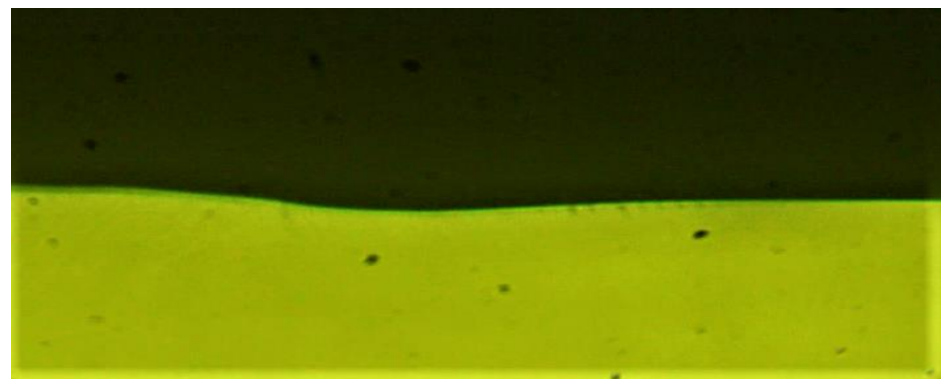


Заключение

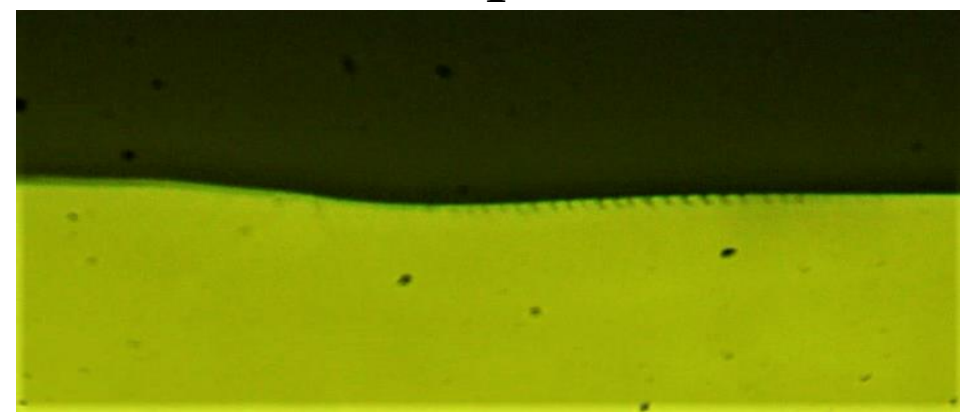
- Обнаружено несколько новых фактов, представляющих интерес как для теоретического моделирования, так и для разработки широкого круга практических применений:
- Сверхбыстрый и сверхглубокий массоперенос легирующих компонентов.
- Внедрение полимерных материалов в кристаллические материалы в твердом состоянии
- Формирование регулярной сверхструктуры из легирующих компонентов на заданной глубине кристалла
- Ультрабыстрый возвратно-поступательный массоперенос в приповерхностные слои кристаллов
-



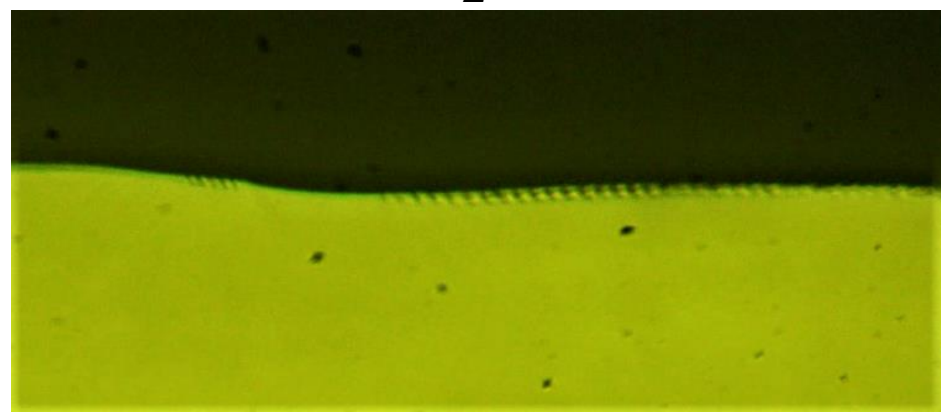
1



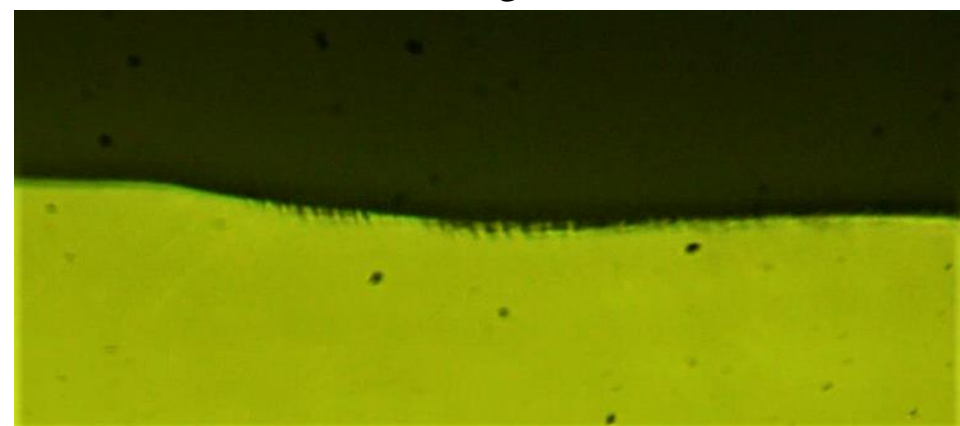
2



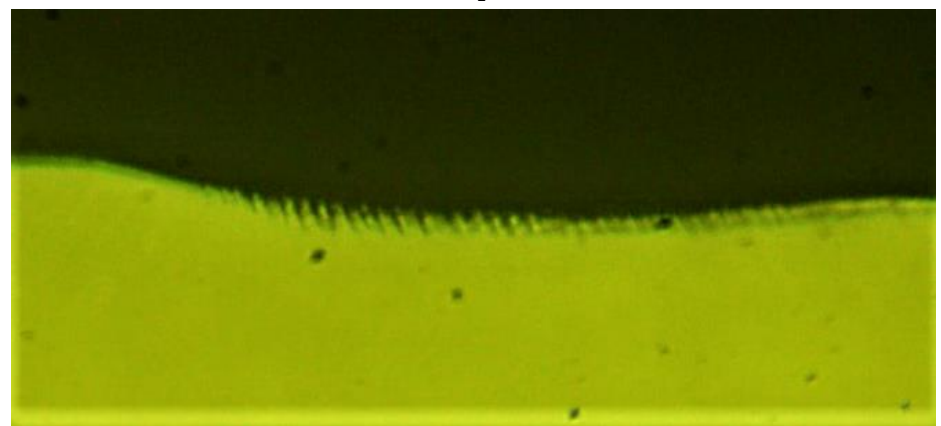
3



4

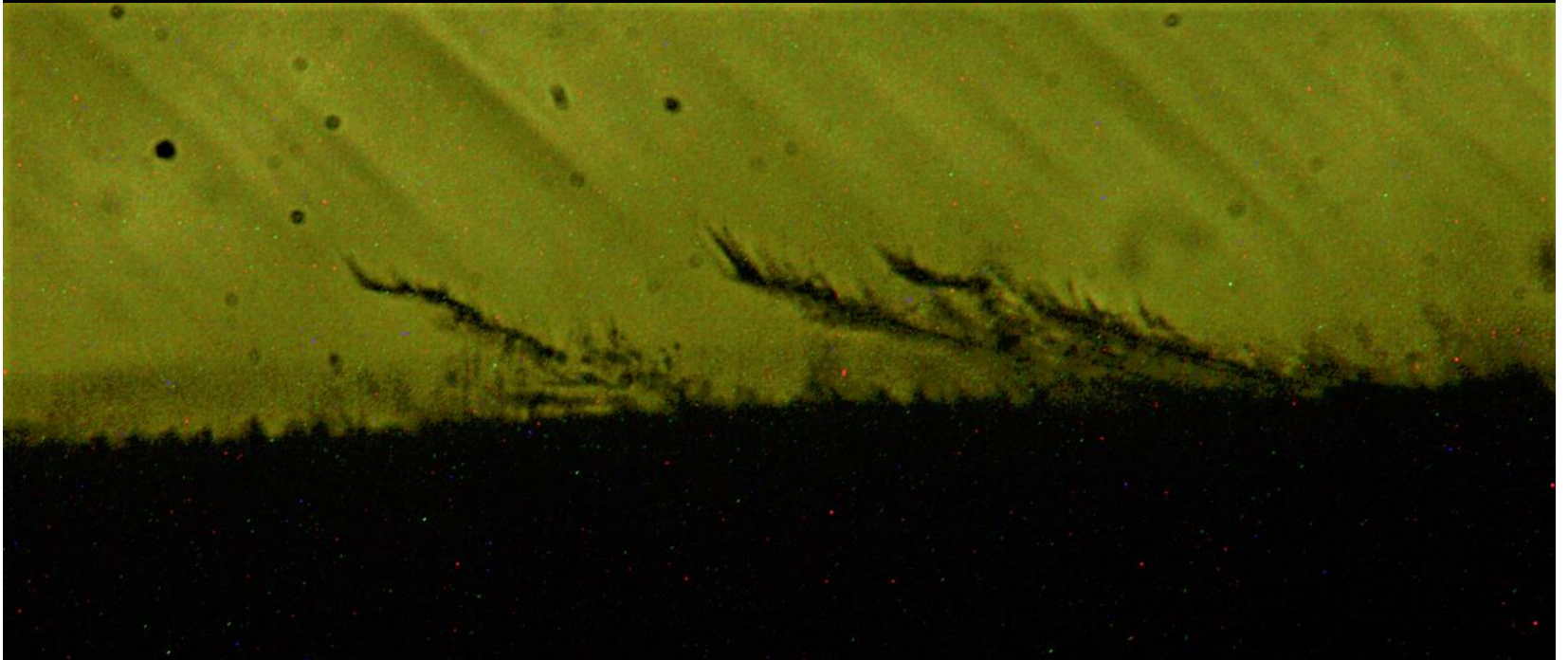
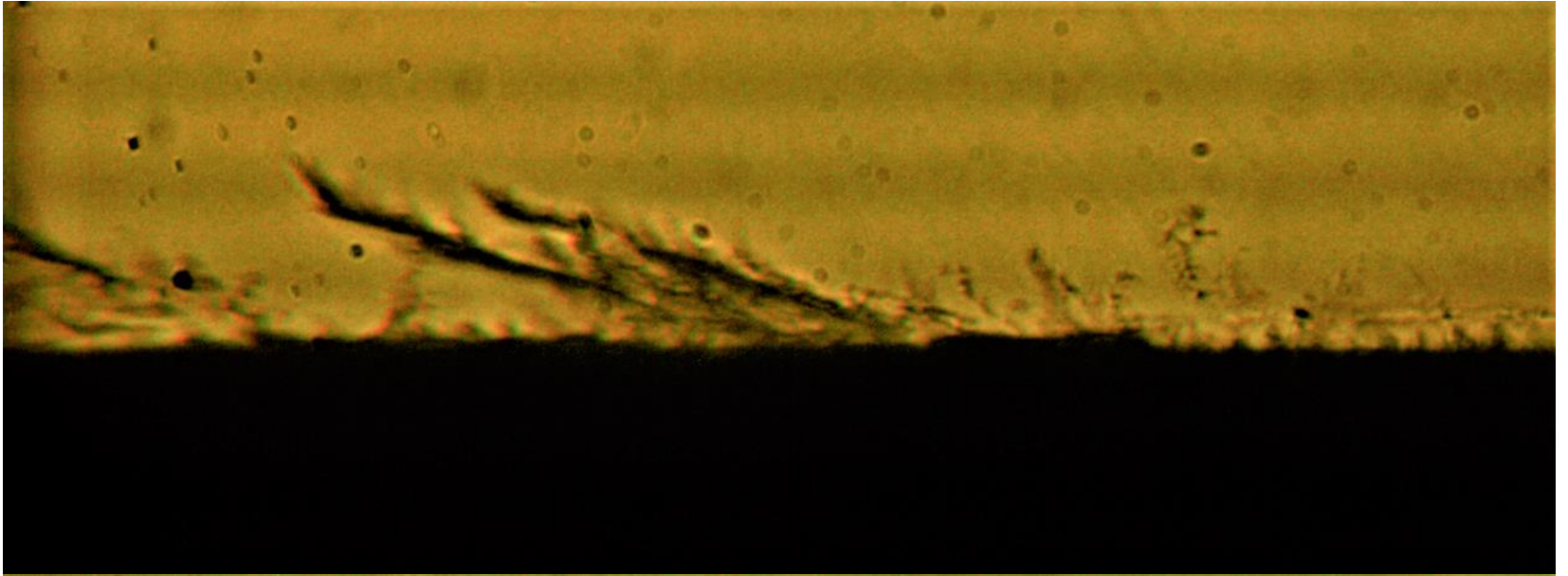


5

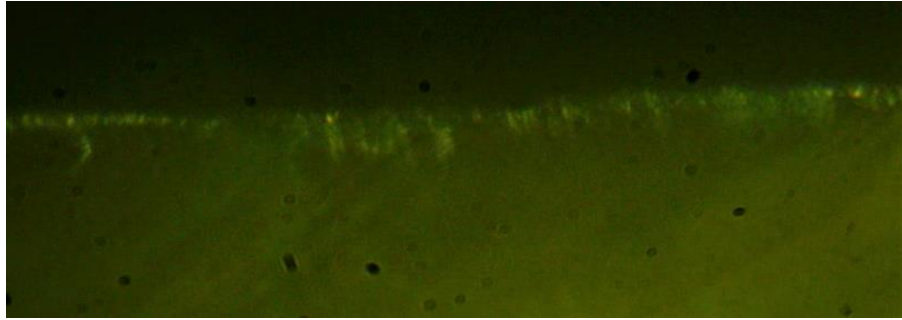


6

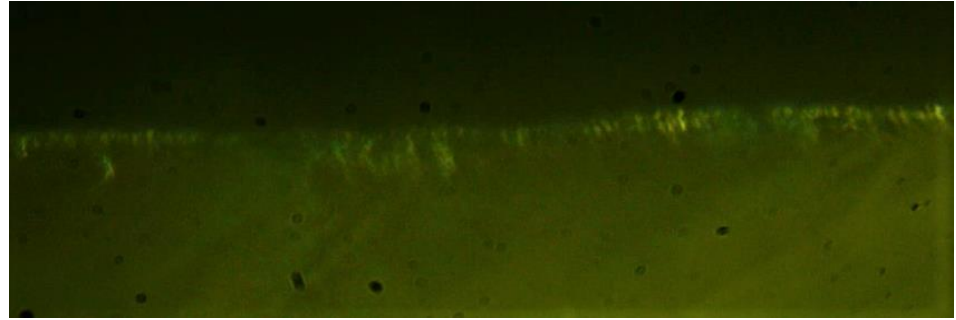
?????



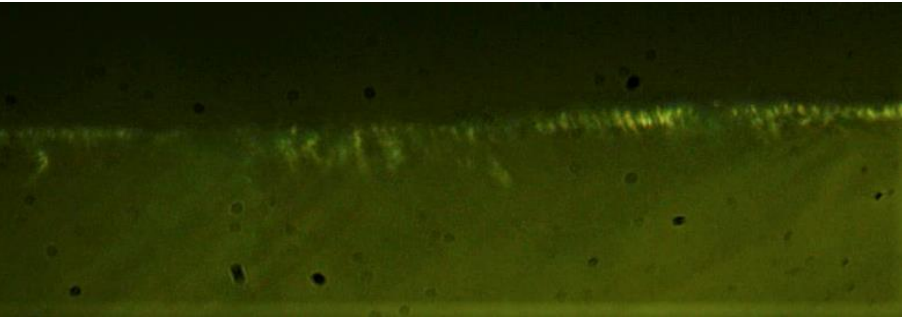
Распространение трещины



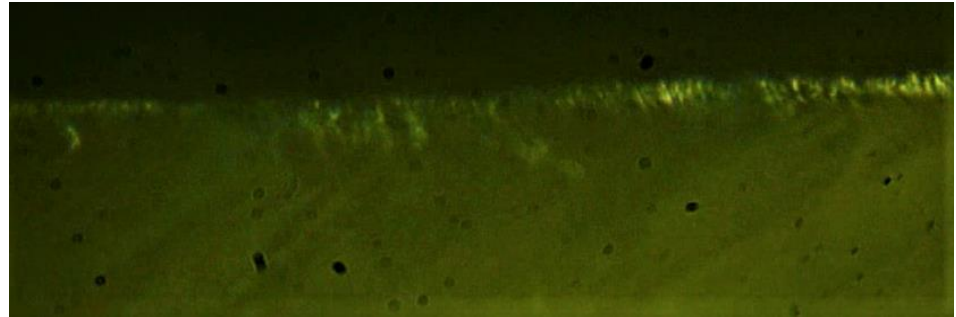
1



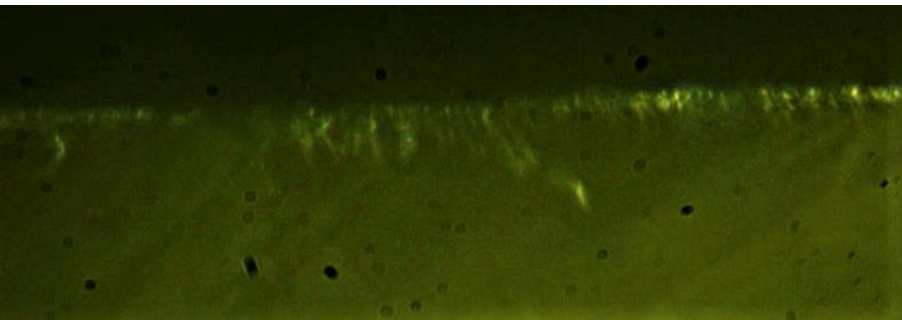
2



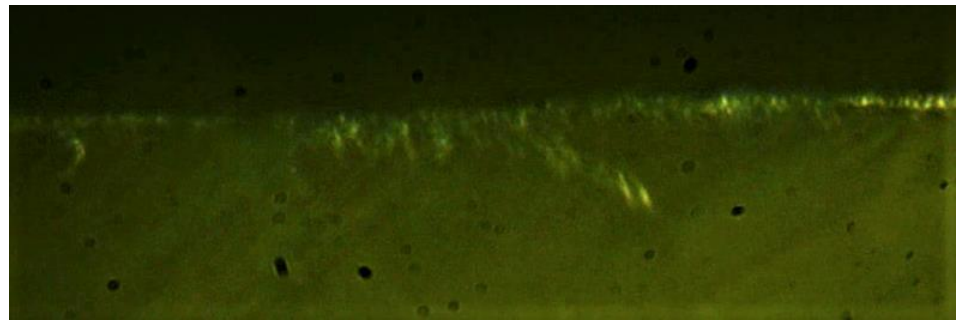
3



4

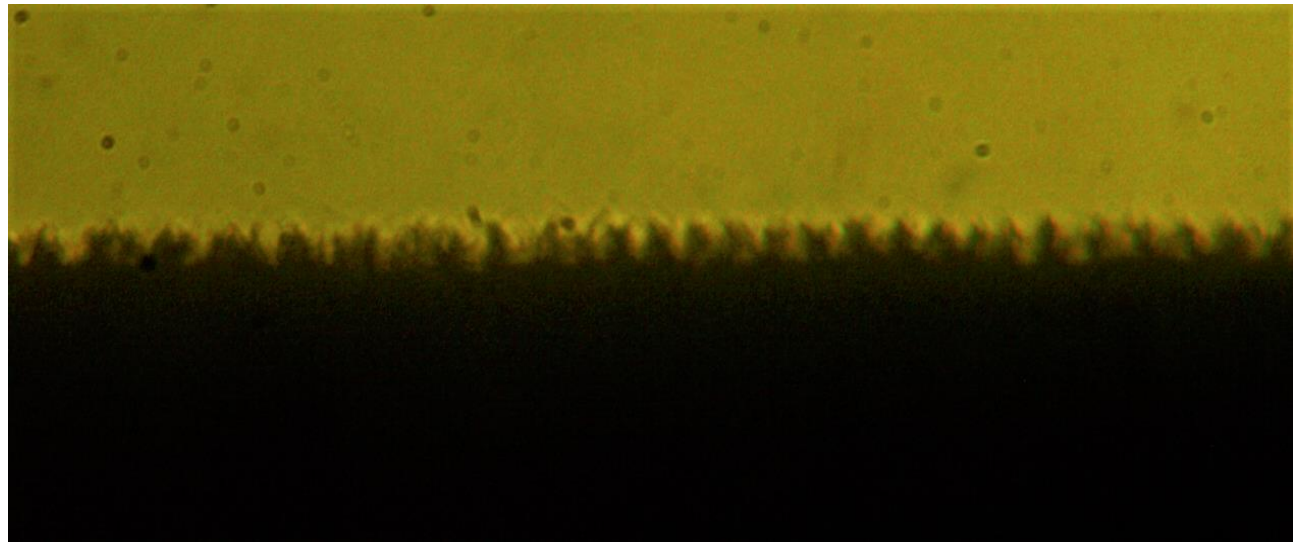
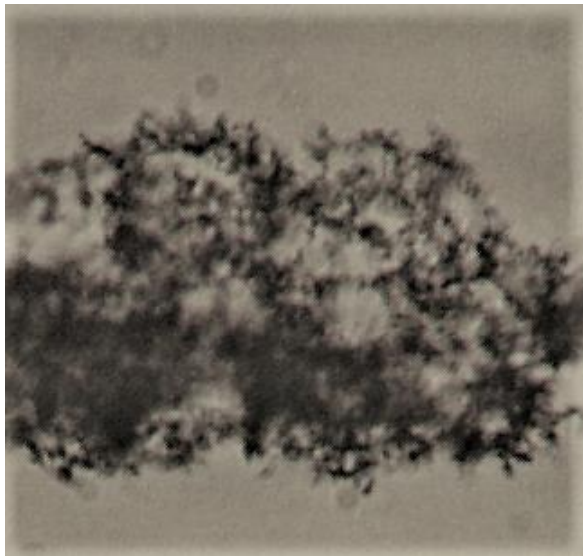
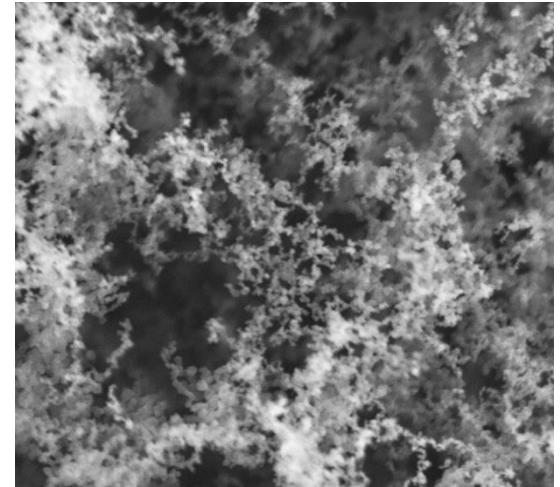
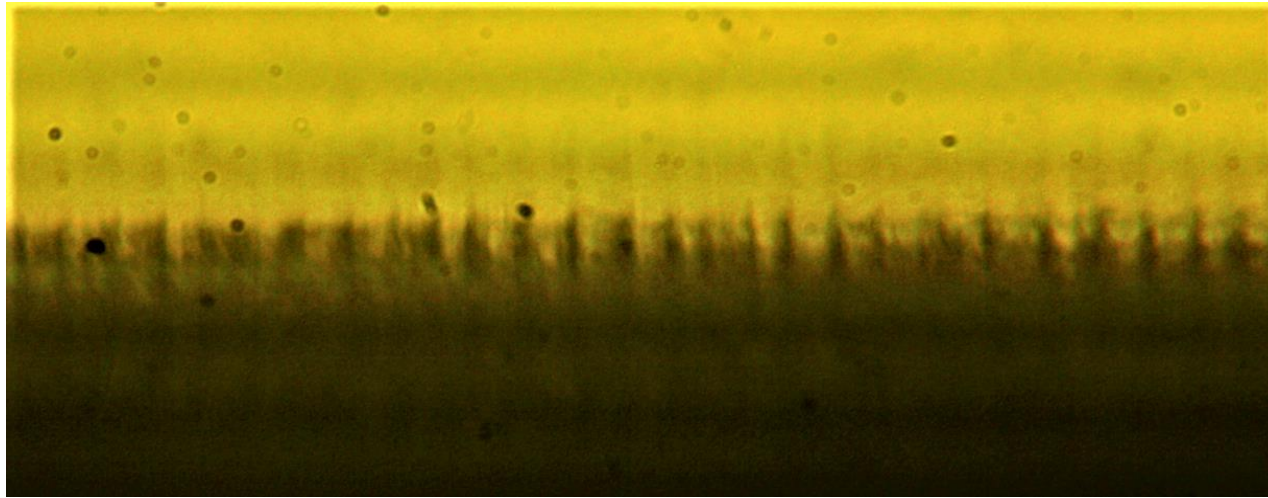


5



6

Внедрение углеродной нанопены



Винтовая закрутка

