



**Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»**

Функциональные наноструктурные материалы

**Кафедра
«Физические проблемы материаловедения»**

(Department of Materials Science)

Севрюков Олег Николаевич, к.т.н., доцент

2017 год

Наноматериалы и нанотехнологии

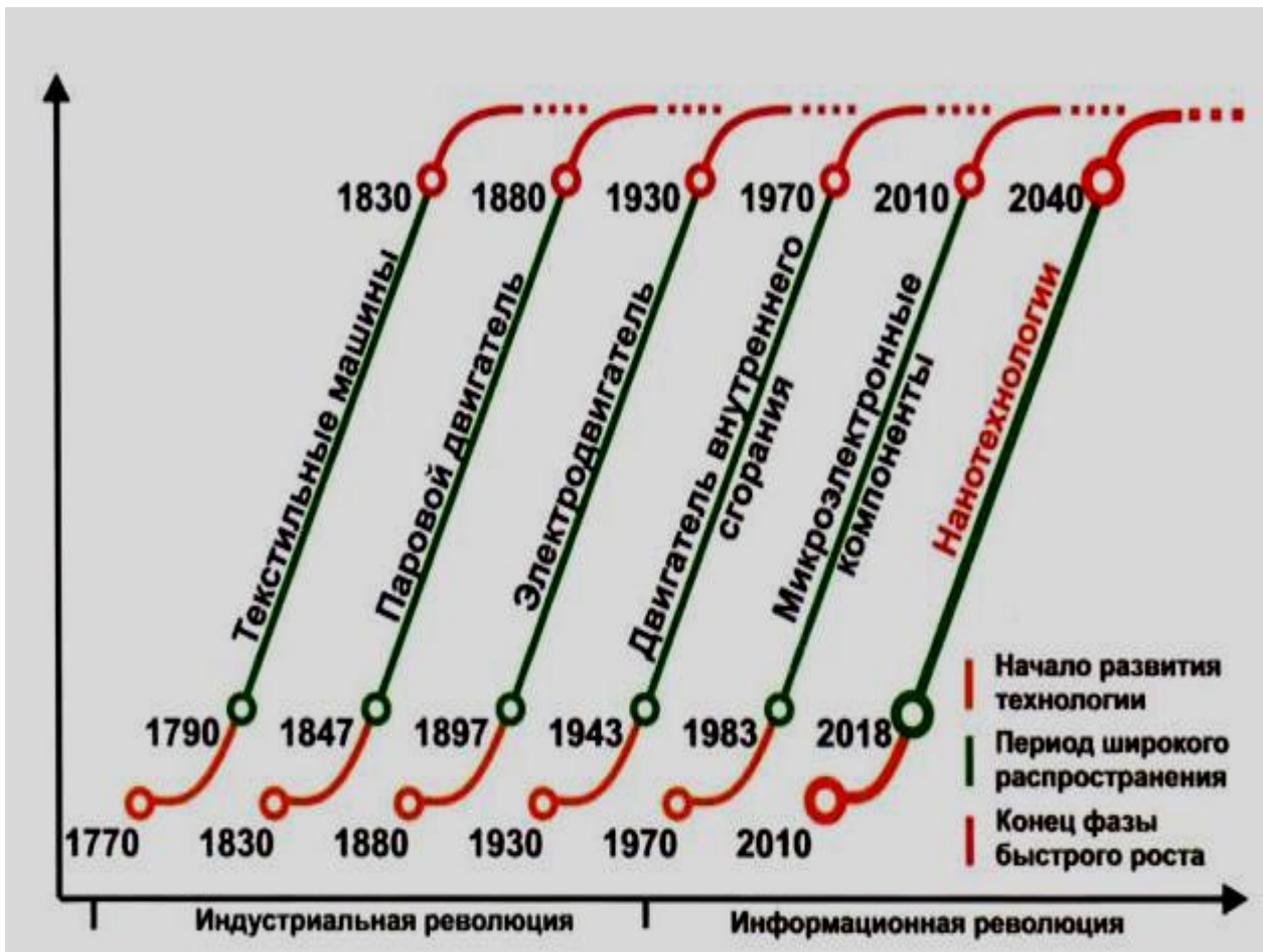
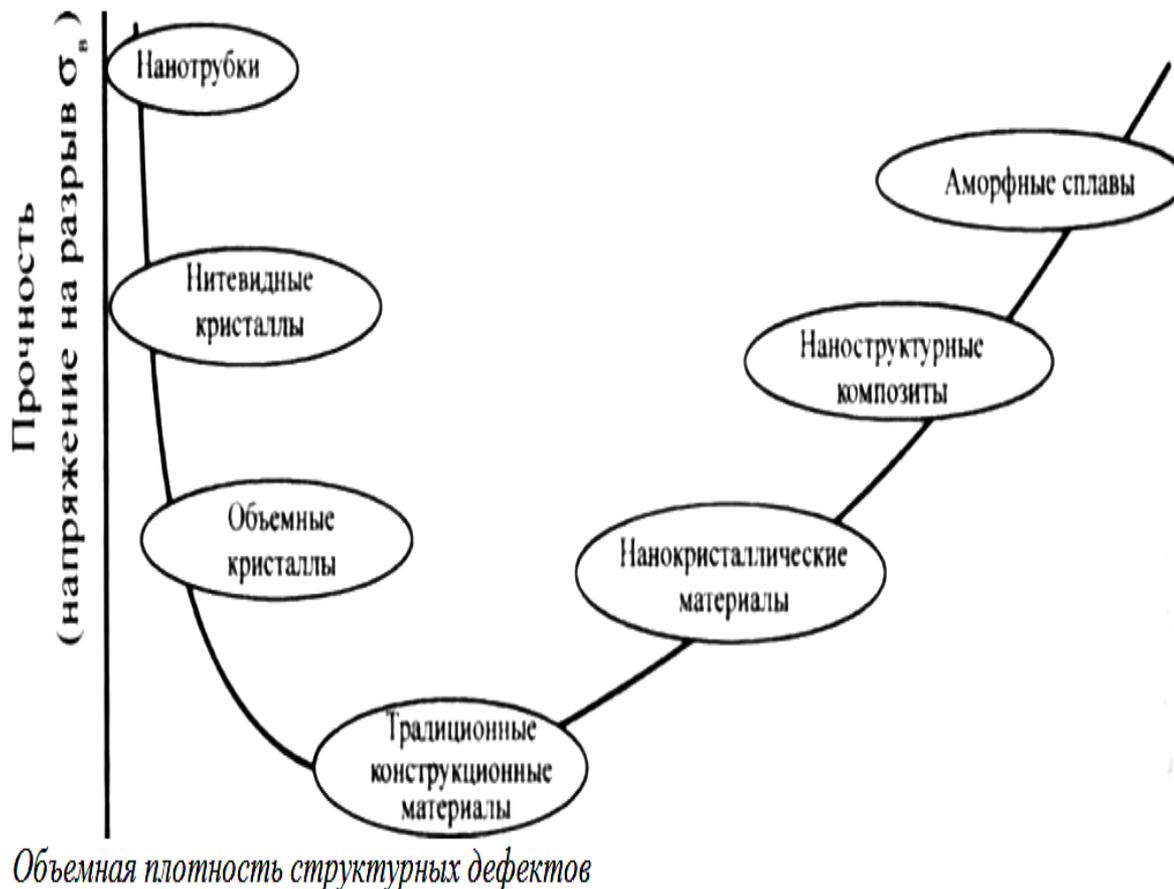


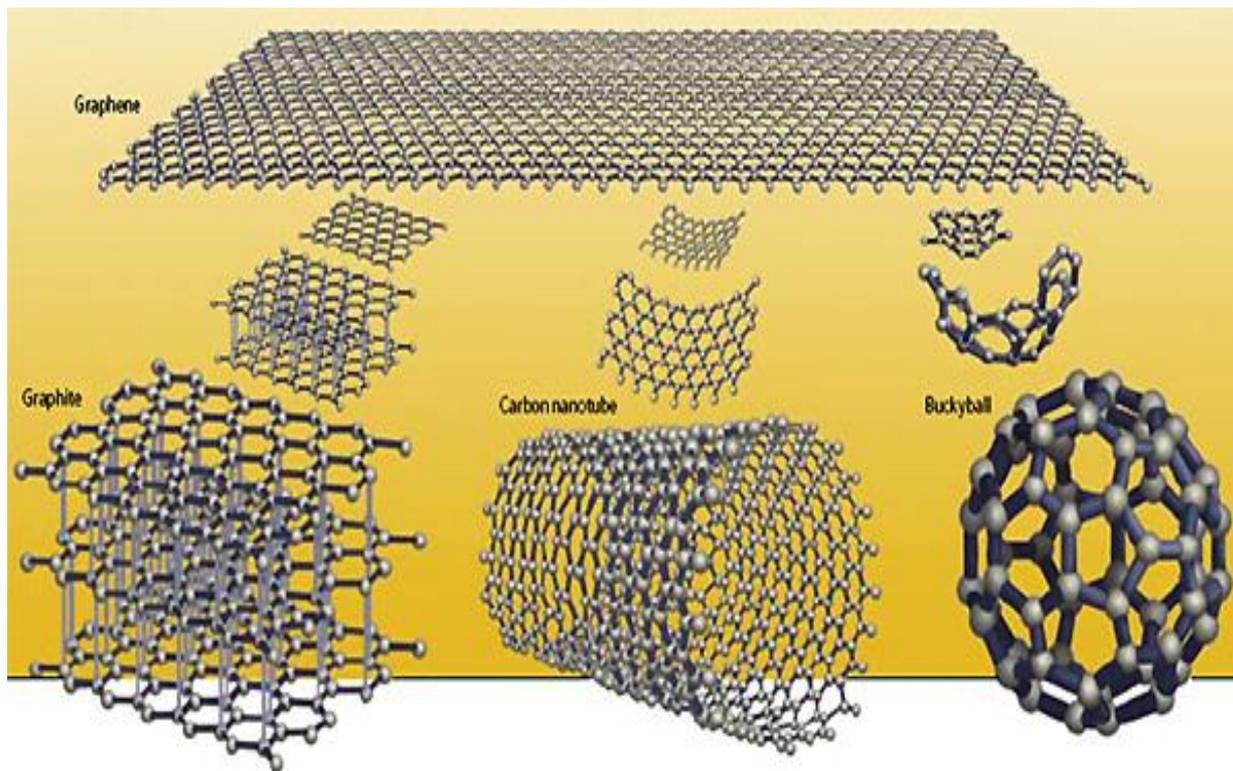
Схема жизненных циклов технологических укладов и смены доминирующих технологий в экономике

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ. АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ



Предел текучести сплавов системы Fe-Cr-Mo-W достигает 3,5... 4,5 ГПа, что превышает лучшие показатели легированных (~ 3 ГПа) и тем более нелегированных (~ 1,5 ГПа) сталей. При этом в не столь прочных сплавах Fe-P-C удастся сохранить высокие значения K_{Jc} : 100 МПа • м^{1/2} против ~ 60 у лучших конструкционных сталей и ~ 90 у мартенситно-старееющих.

Наноматериалы и нанотехнологии. Углеродные наноматериалы

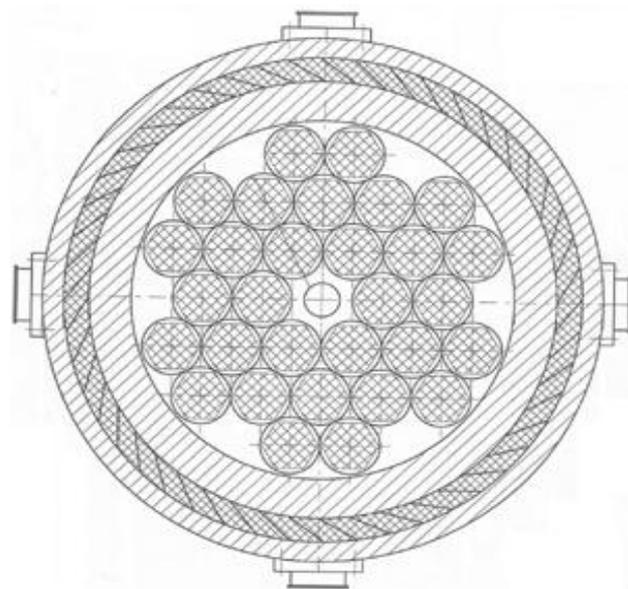


Графен ([англ. graphene](#)) — слой [атомов углерода](#) толщиной в один атом, соединённых посредством sp^2 связей в [гексагональную](#) двумерную [кристаллическую решётку](#). Его можно представить как одну [плоскость графита](#), отделённую от объёмного [кристалла](#). По оценкам, графен обладает большой [механической жёсткостью](#) и хорошей [теплопроводностью](#) (~ 1 [Тпа](#) и $\sim 5 \times 10^3$ [Вт·м⁻¹·К⁻¹](#) соответственно). Высокая [подвижность](#) носителей тока при комнатной температуре делает его перспективным материалом для использования в самых различных приложениях, в частности, как будущую основу [наноэлектроники](#) и возможную замену кремния в интегральных микросхемах.

Наполнители из УДП разных металлов или их соединений, вводимые (МИФИ, НИКИМТ, Электрохимприбор) в твердые, эластичные или жидкие матрицы обеспечивают:

- Повышение коэффициента ослабления рентгеновского излучения с энергией 60 и 660 кэВ на 40÷60%.
- Уменьшение в 1,5-2 раза толщины или массы применяемых материалов, снижение себестоимости изделий.
- Повышение эффективности защиты персонала медицинских, ядерно-энергетических, рентгеновских и других установок.

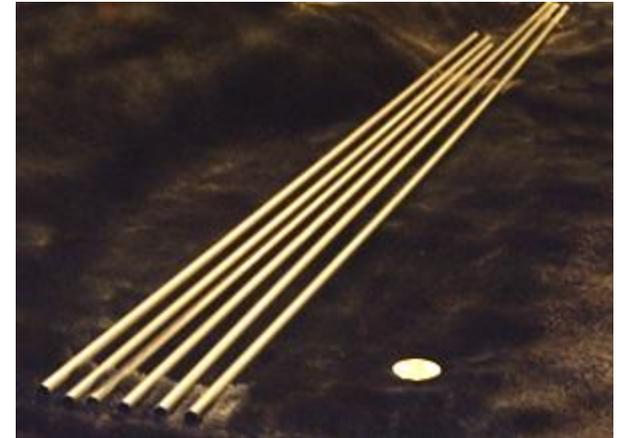
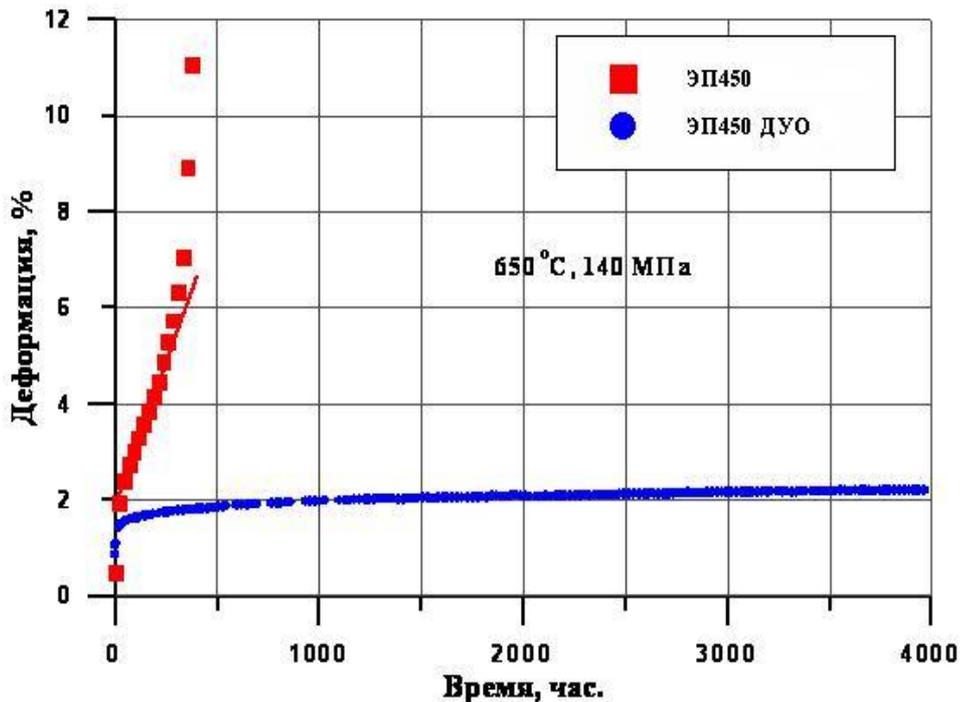
Боро-содержащий нано-композит для Транспортно-Упаковочных Контейнеров (ТУК)



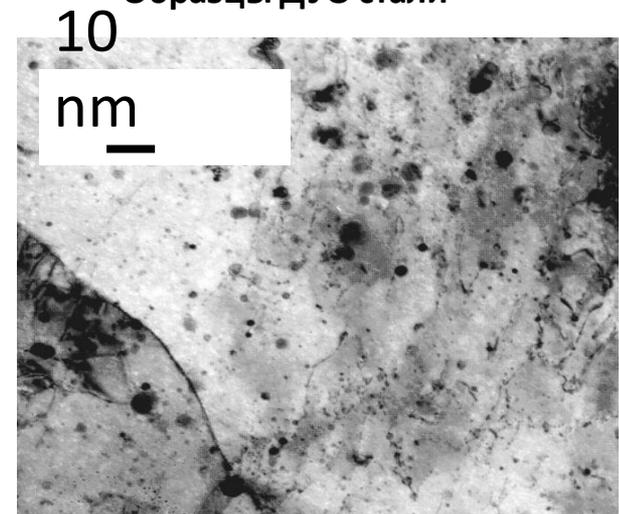
Разработан (НИКИМТ, МИФИ и РФЯЦ ВНИИТФ) новый композит *Al-нанобор*, позволяющий корпус пенала сделать нейтронопоглощающим и увеличить загрузку каждого ТУКа на 10-30%, в зависимости от их типа.

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ ДУО-СТАЛИ

Кривые термической ползучести в образцах матричной стали и ДУО стали



Образцы ДУО стали



Микроструктура ДУО стали

Выпущены опытные партии труб из ДУО стали

Начало промышленного производства – 2011 год – 1500 м/год

НАНО-ФИЛЬТР для очистки жидких радиоактивных отходов (ГНЦ ФЭИ)

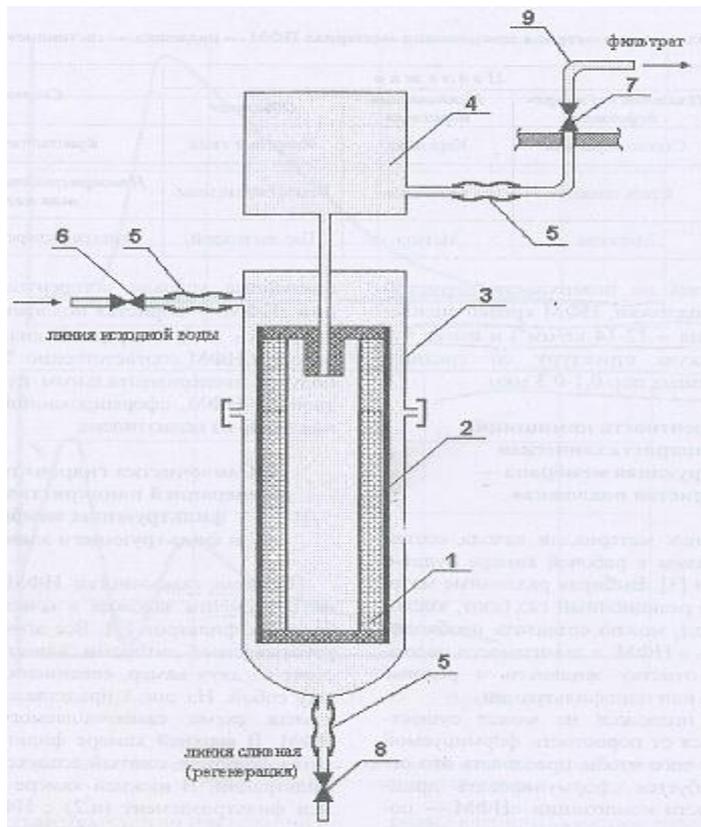


Схема самоочищающегося фильтра с нано-мембраной:
 1- подложка из пористого полиэтилена; 2- фильтрующего покрытие с нанокристаллической структурой; 3- корпус фильтра;
 4- аккумулятор воды; 5- гибкий шланг; 6,7, и 8- вентили; 9- патрубок

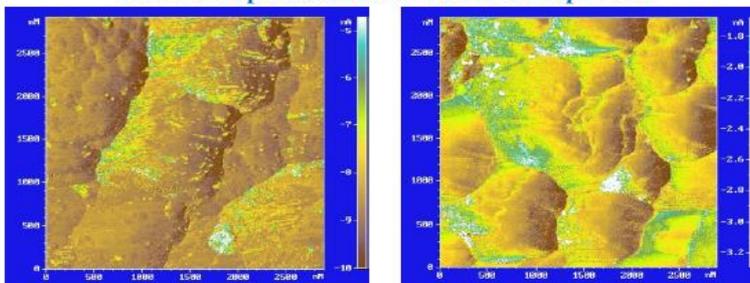
Материалом НФМ могут быть различные керамики (оксиды, нитриды, карбиды), чистые металлы (*Ti, Zr, Cr, Al*), сплавы и др., а также Si,C.

На поверхности пористой органической подложки, НФМ крепко сцеплена с ней (адгезия $\sim 12-14$ кг/мм²) и имеет нанокристаллическую структуру со средним диаметром сквозных пор 0,1-0,3 мкм

Скорость фильтрации семикаптриджного мембранного фильтра не меньше 0,7 м³/ч ЖРО с общей активностью радионуклидов по ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr до 10⁹ Бк/л

ЗАЩИТНЫЕ ПЛАСТИНЫ ИЗ НАНОКЕРАМИКИ С ВЫСОКОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ ДЛЯ ЦЕНТРИФУГ

АСМ изображения изломов нанокерамик

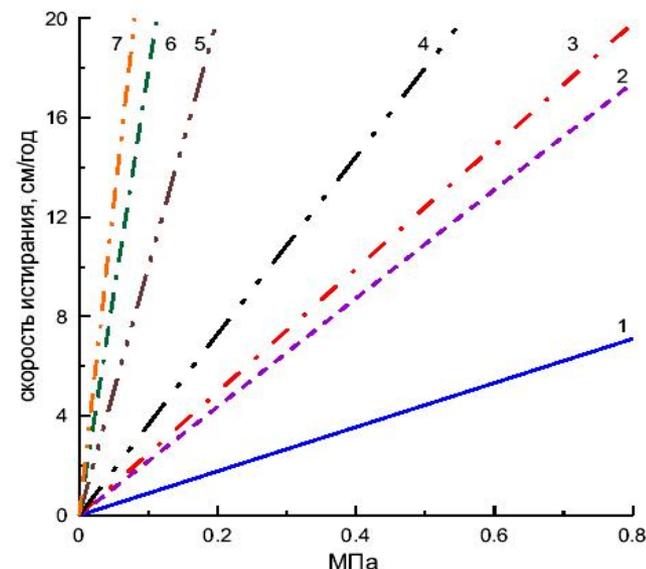


Спекание при 1450°C, 6 мин

Спекание при 1450°C, 30мин

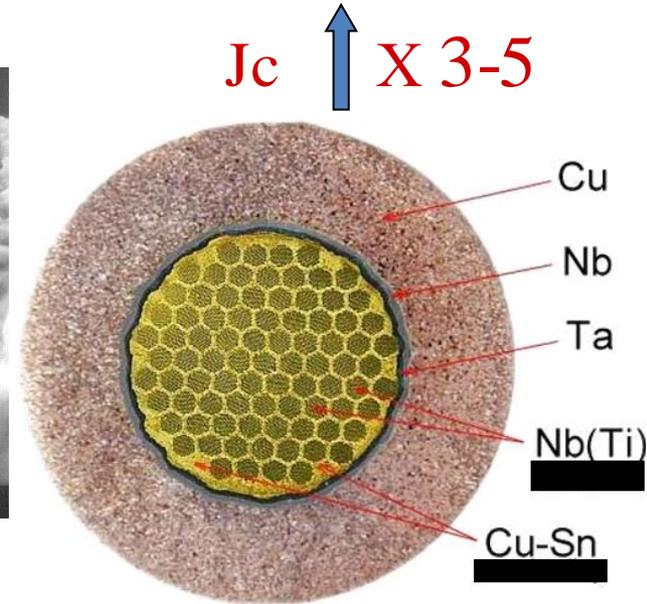
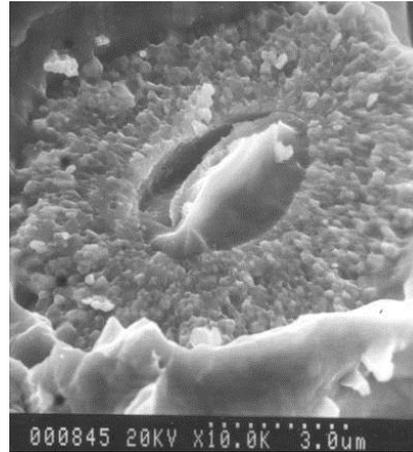
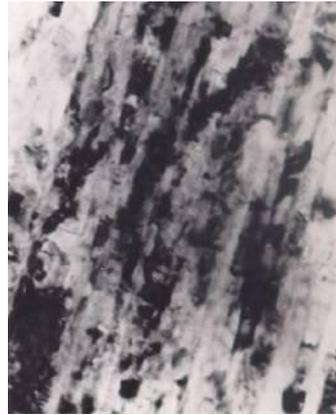
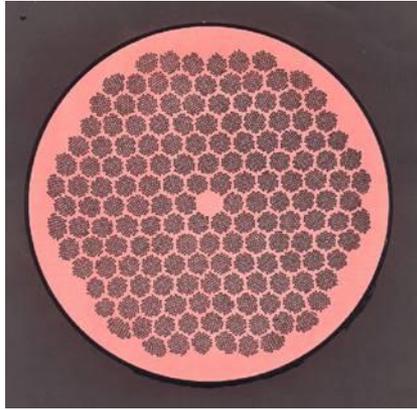


Внешний вид защитных пластин



Сравнение скоростей истирания разных материалов на центрифуге Н-250 по осадку фильтроперлита в зависимости от напряжения сдвига осадка: 1 - керамика АМ1-1 ($c_s = 6$ мин); 2 - керамика 22ХС; 3 - керамика Al_2O_3 ("ОНТП Технология", Обнинск); 4 - керамика Al_2O_3 -КВП (АО Богдановичский керамический завод); 5 - стеллит ЦН1; 6 - 12Х18Н10Т; 7 - титан ВТ-1-0.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



Nb-Ti сверхпроводник

Число волокон 5 000, Размер волокон
– 6 мкм,
размер выделений титана в
волокнах 10-50 нм.

Nb₃Sn сверхпроводник для ИТЭР

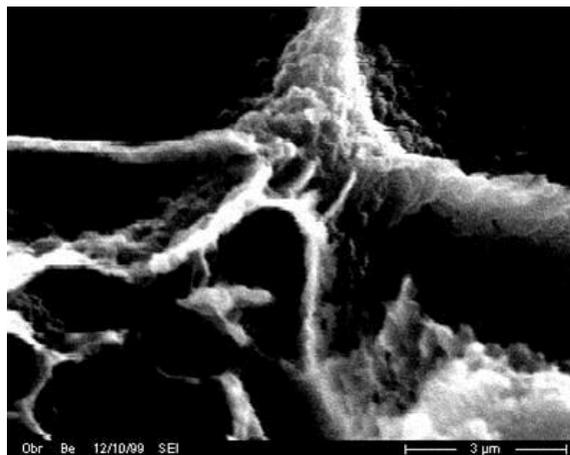
Число волокон – 10 000, размер волокон 2μm
Максимальный комплекс свойств достигается
при размере зерен 20-30 нм

Перспективны разработки НТСП проводов (для реакторов термоядерного синтеза) с повышенной механической прочностью путем наноструктурирования стабилизирующего материала, а также с оптимизированными токовыми свойствами

Начато промышленное производство – 2009 год

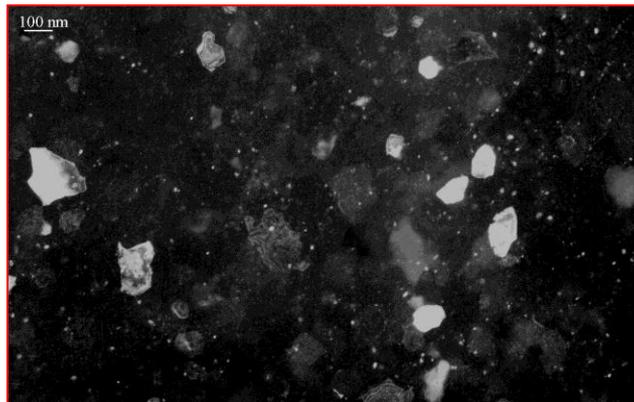
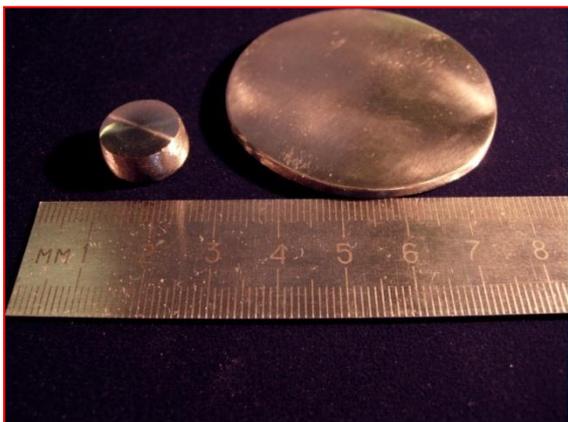
НАНОБЕРИЛЛИЙ

Нанокаркасные материалы для термоядерной энергетики



СЭМ

Вакуумплотная фольга (20 мкм) для рентгеновских окон



ТЭМ

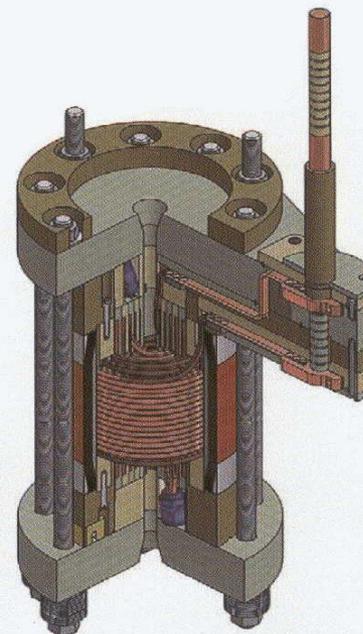
НОВЫЙ КЛАСС НАНОСТРУКТУРНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ Cu-Nb ПРОВОДОВ С АНАМАЛЬНО ВЫСОКИМИ ПРОЧНОСТЬЮ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ

Длинномерные технические высокопрочные высокоэлектропроводные Cu-Nb провода круглого и прямоугольного поперечных сечений: от 0,05 мм до (4 мм x 6 мм) с сочетанием прочностных и электропроводящих свойств:

от уровня прочности 800-900 МПа
при электропроводности на уровне 80-85% IACS

до уровня прочности стали 1100-1500 Мпа
при электропроводности на уровне 55-75% IACS

(IACS - Международный Стандарт Отожжённой Меди, где 100% IACS = 1,7241 мкОм*см)



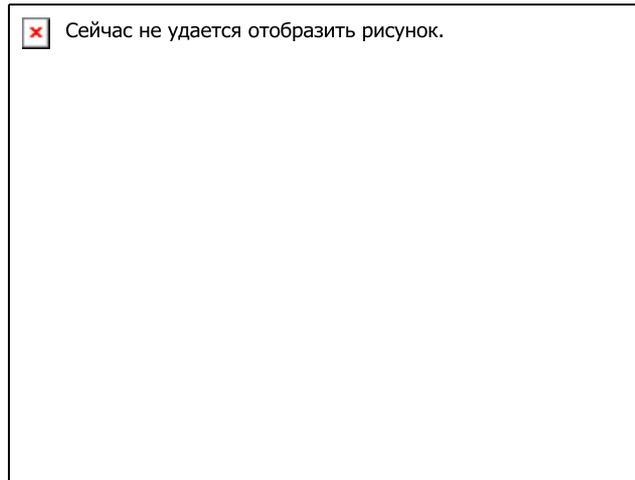
Области применения

- ~ микропровода - в устройствах резонансной передачи электроэнергии
- ~ индукторы - для магнитоимпульсных штамповки и сварки
- ~ фольга - в электронике для гибких печатных плат и проводов
- ~ крупные магнитные системы на 50 - 100 Тл

НАНОПОРИСТЫЕ ЛЕНТЫ И ПРОДУЦИЯ НА ИХ ОСНОВЕ (Уральский электрохимический комбинат)



Никелевые пористые прокатные ленты



Электромобиль «Антэл-2» с генератором «Фотон МВВ»



ЭХГ матричного типа



ЭХГ с жидким циркулирующим электролитом

НАНОПОРИСТЫЕ ФИЛЬТРЫ (Уральский электрохимический комбинат)



Предназначены для фильтрования воздуха, углекислого газа, водорода, кислорода, аргона, гелия и других газов, химически инертных к материалам фильтрующего элемента и корпуса фильтра.

Фильтры УЭК успешно применяются при подготовке технологических газов в производстве микросхем с высокой степенью интеграции и могут найти применение в других отраслях промышленности, где необходимы чистые и сверхчистые газы.

ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Комбинат «Электрохимприбор»

Конструкционные детали с хромалмазным покрытием



Инструменты с хромалмазным покрытием



ВЫСОКОЁМКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ Ta И Nb



Длинномерная деталь из пористого нанобериллия. Длина трубчатой части – 600 мм, диаметр – 40 мм, плотность – 0,27 г/см³. Диаметр фланца – 108 мм, толщина – 8 мм, плотность – 0,40 г/см³. Прочность при сжатии материала: в трубчатой части – 24 МПа, во фланцевой части – 45 МПа.

МНОГОСЛОЙНЫЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭМИ

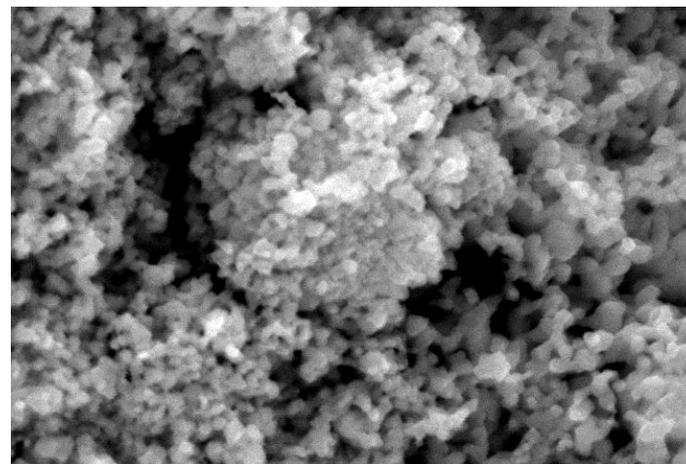
Характеристики материала

Диапазон работы, длина волны, см	0,8÷30,0
Толщина, мм	1,0÷6,0 (зависит от области радиопоглощения)
Плотность, г/см ³	0,3÷0,5 (зависит от области радиопоглощения)
Ослабление сигнала, дБ	4,0÷20,0 (зависит от ширины полосы погл.)

Оптическая микроскопия отдельного нанокompозитного слоя



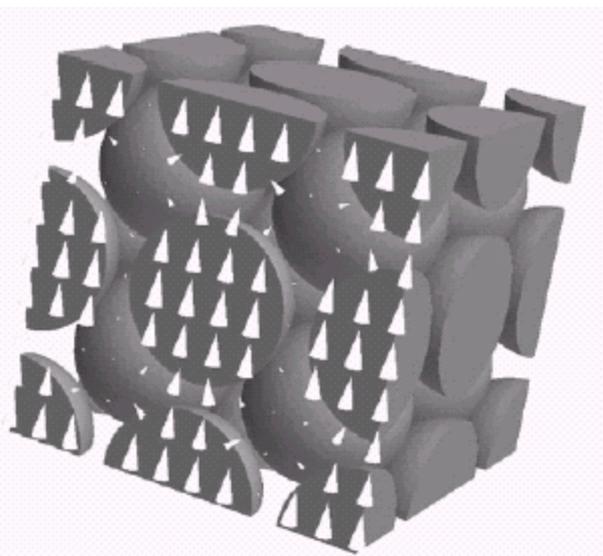
Растровая электронная микроскопия отдельного нанокompозитного слоя



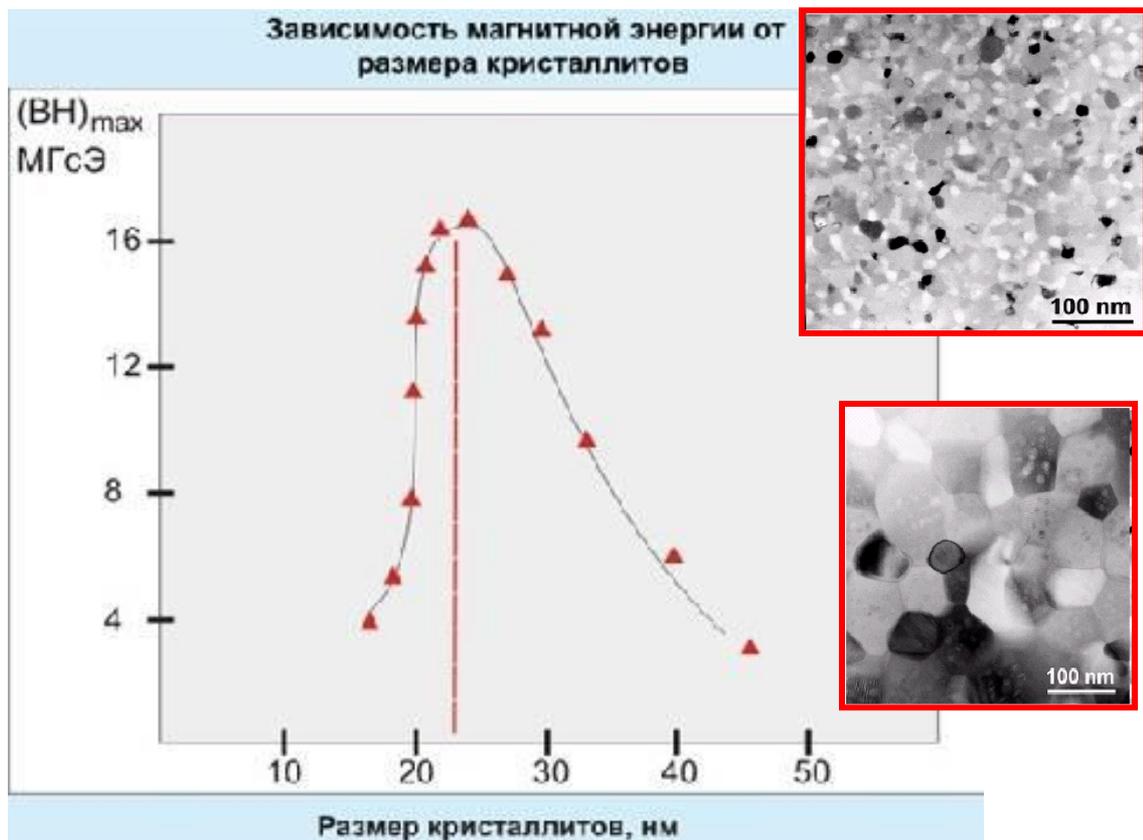
ПОСТОЯННЫЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАГНИТЫ

Аморфизация путем скоростной закалки + порошковая металлургия + регламентированная термообработка

ВН ↑ × 3-5



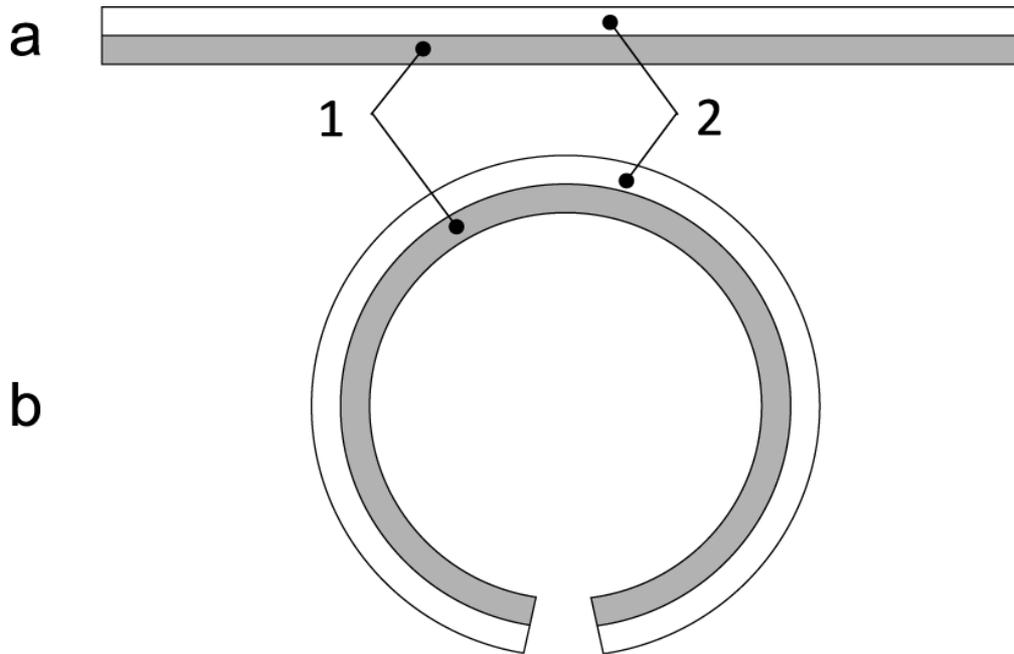
Максимальная энергия магнитов системы Nd-Fe-B достигается при размере нанокристаллитов 20-30 нм



Начало промышленного производства – 2011 год – 10 тонн в год

Выпущены опытные партии в объеме более 30 тонн

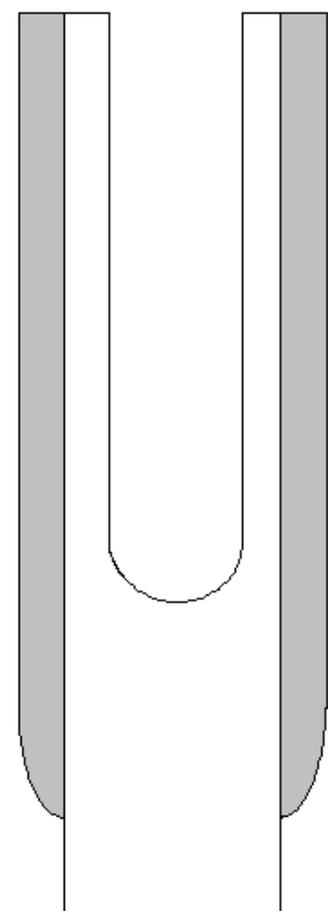
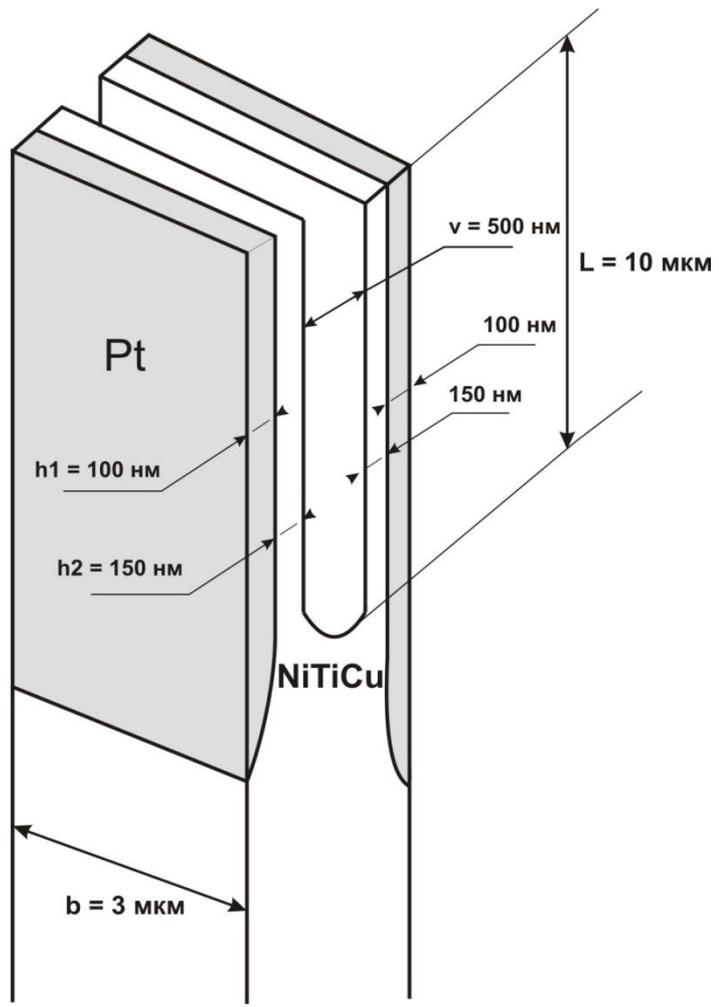
Принцип действия композитного актюатора с эффектом памяти формы (ЭПФ)



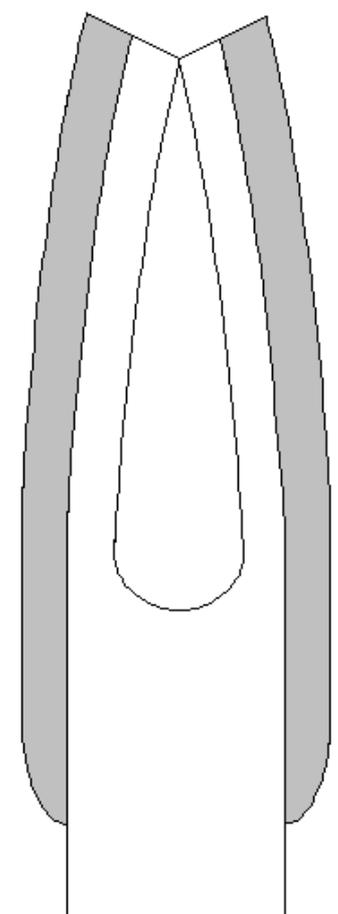
- 1 – лента с ЭПФ, 2 – упругая лента
 - (a) $T < T_m$, (b) – $T > T_m$

- Достигается изгибная деформация на 2-3 порядка больше, чем у обычной биметаллической пластинки

Нанопинцет с ЭПФ



$T < T_m$



$T > T_m$

Создание нанопинцета с помощью фокусированного ионного пучка (ФИП)

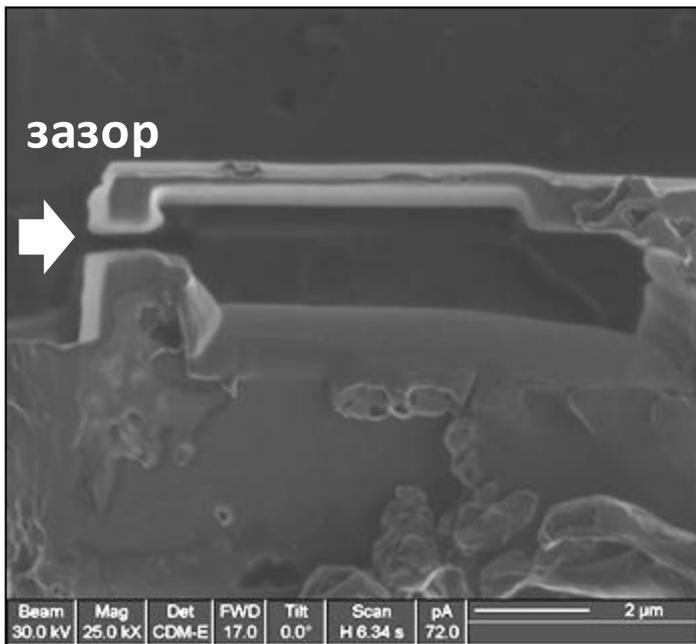


Исходный образец ленты Ti-Ni-Cu. На снимке показан край образца

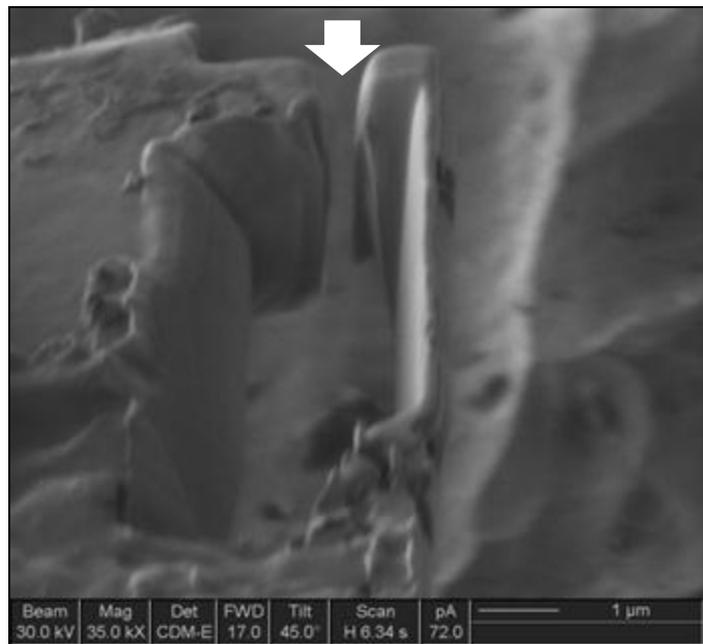


Формирование отверстия на краю образца и нанесение слоя платины

Создание нанопинцета с помощью фокусированного ионного пучка (ФИП)

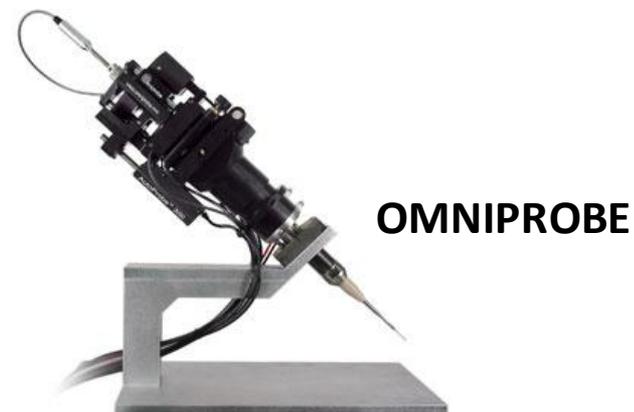
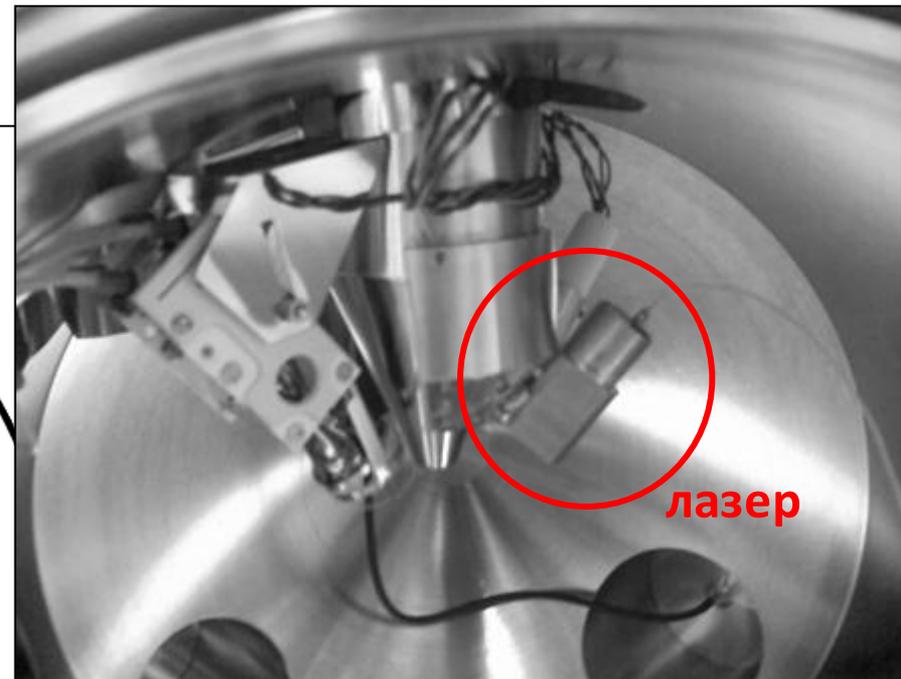
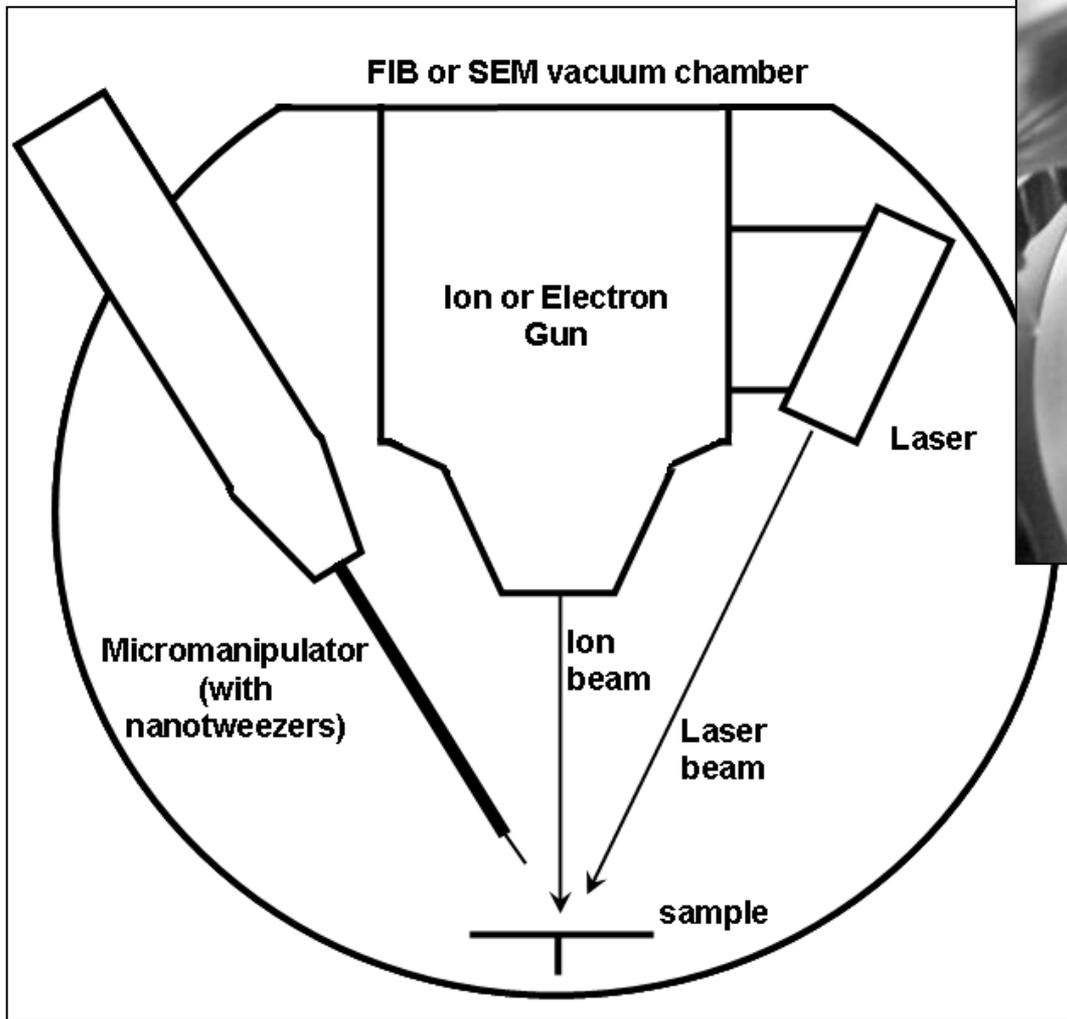


Формирование зазора



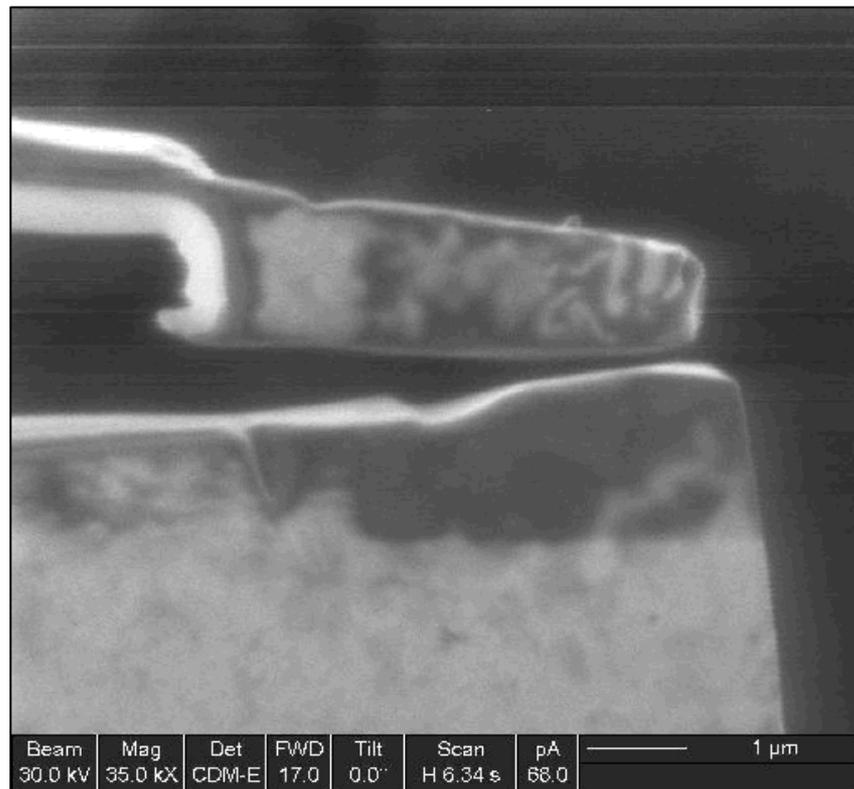
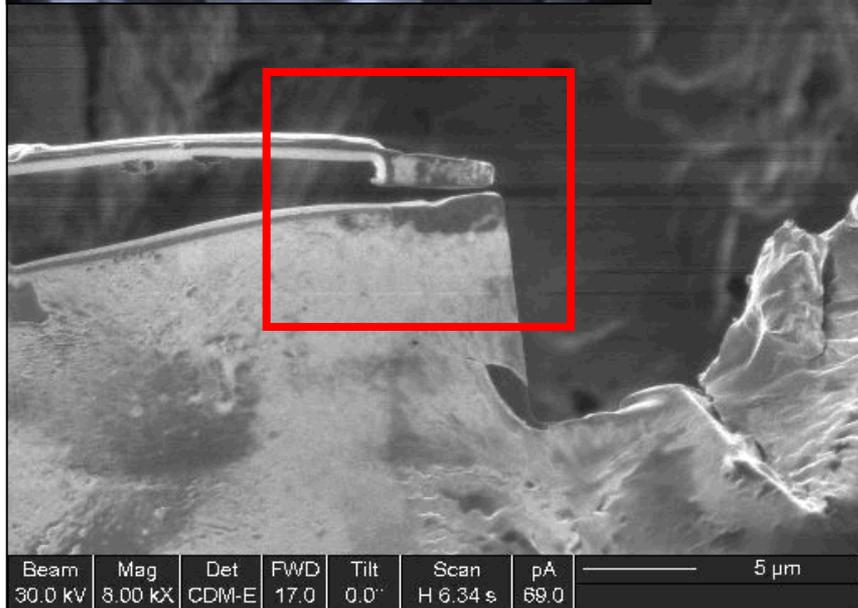
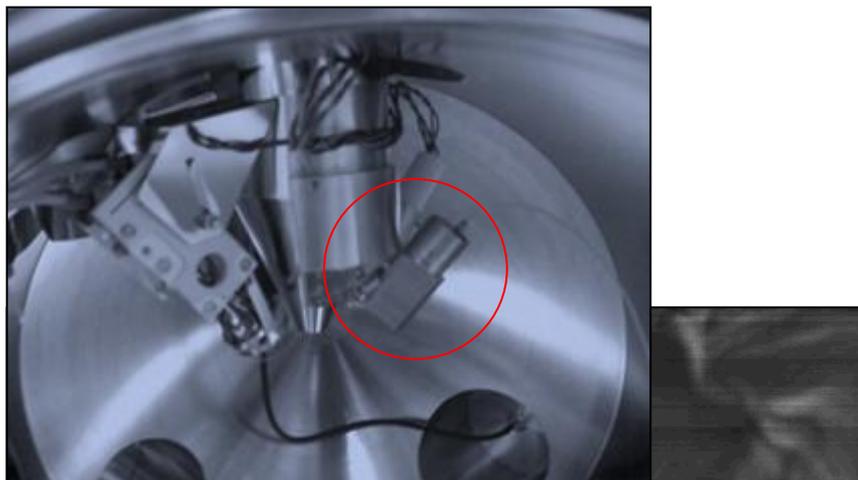
Макет нанопинцета готов!

Управление нанопинцетом в вакуумной камере ФИП с помощью нагрева лазером



Прототип нанопинцета

Система контроля в вакуумной камере ФИП

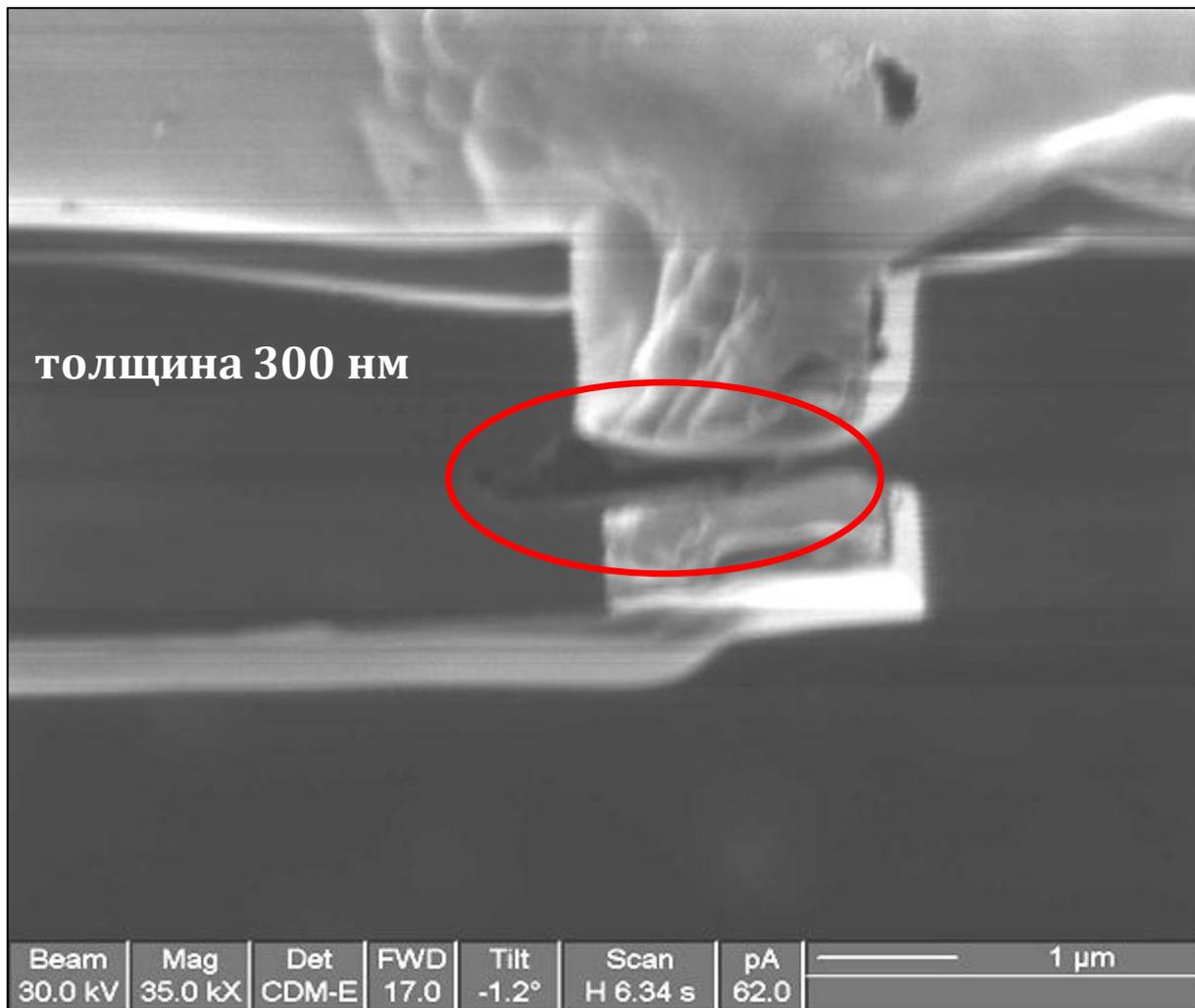


размер 12x3x1 мкм

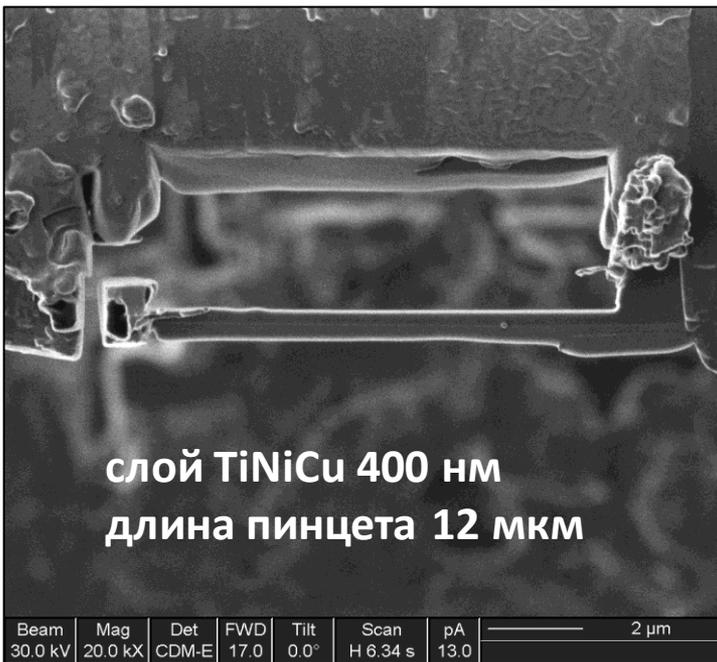
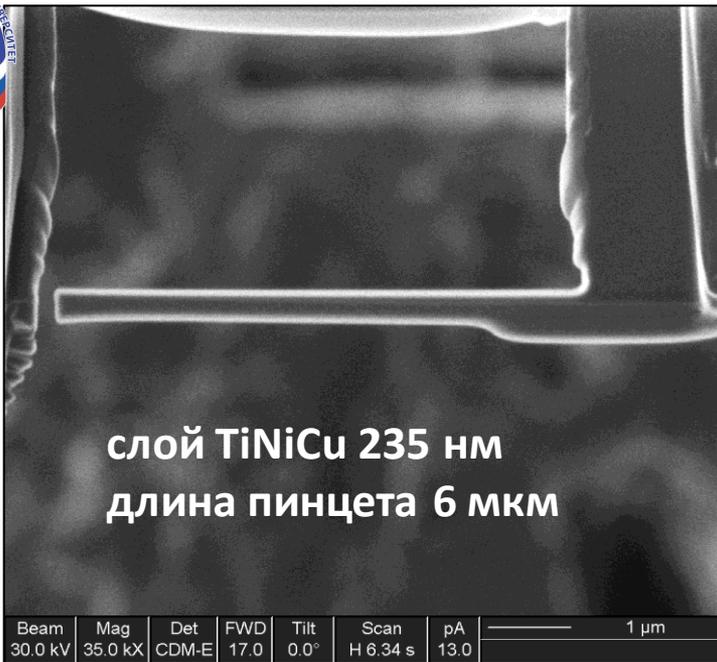
захватываемые объекты < 1400 нм

www.smwsm.org//ll/micropincer.html

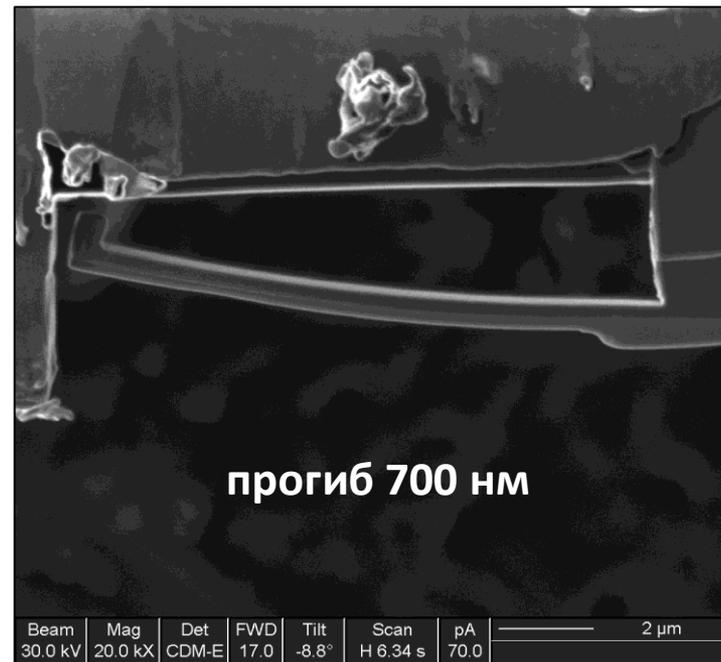
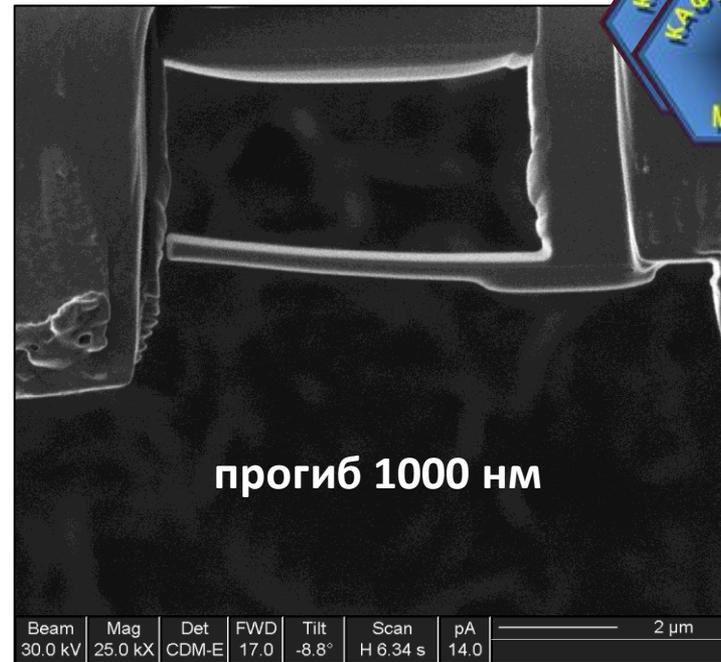
Захват наночастицы



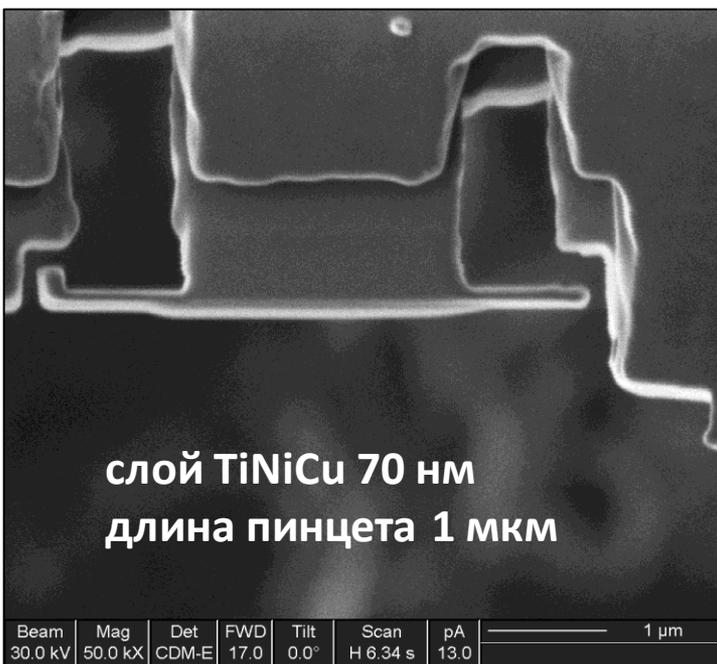
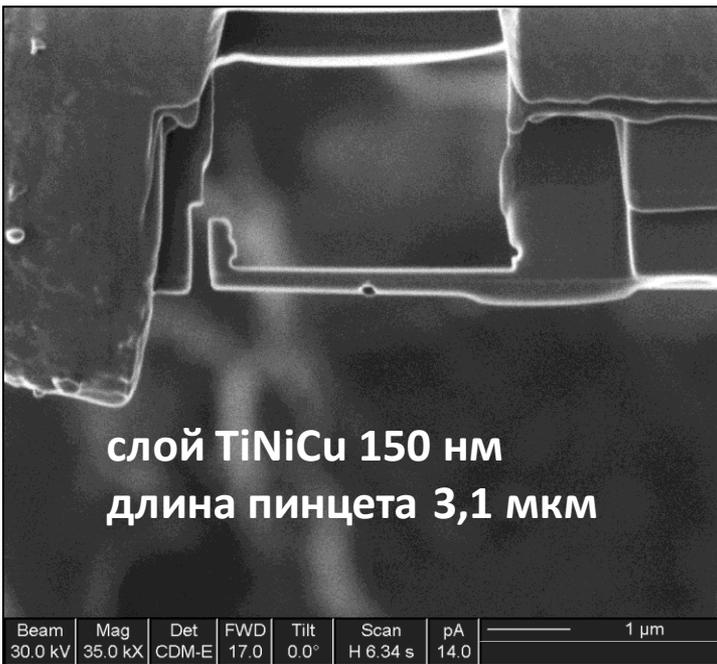
без нагрева



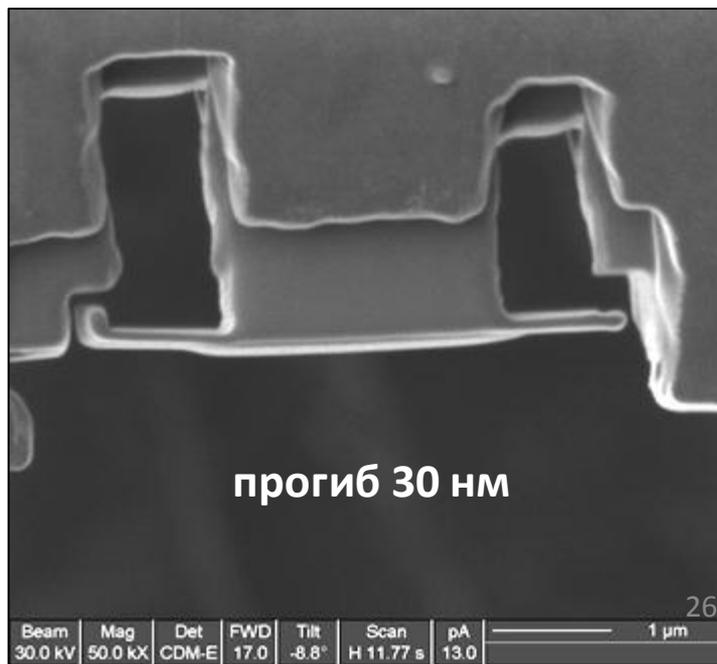
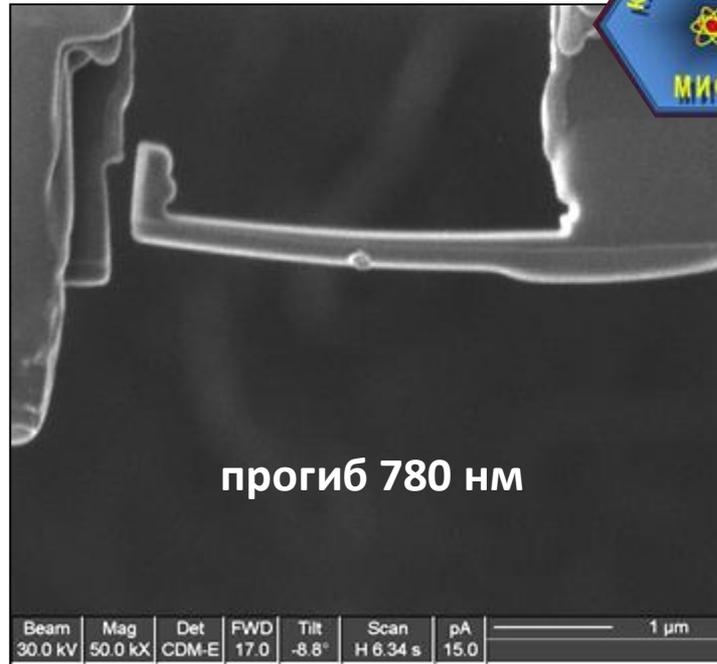
во время нагрева



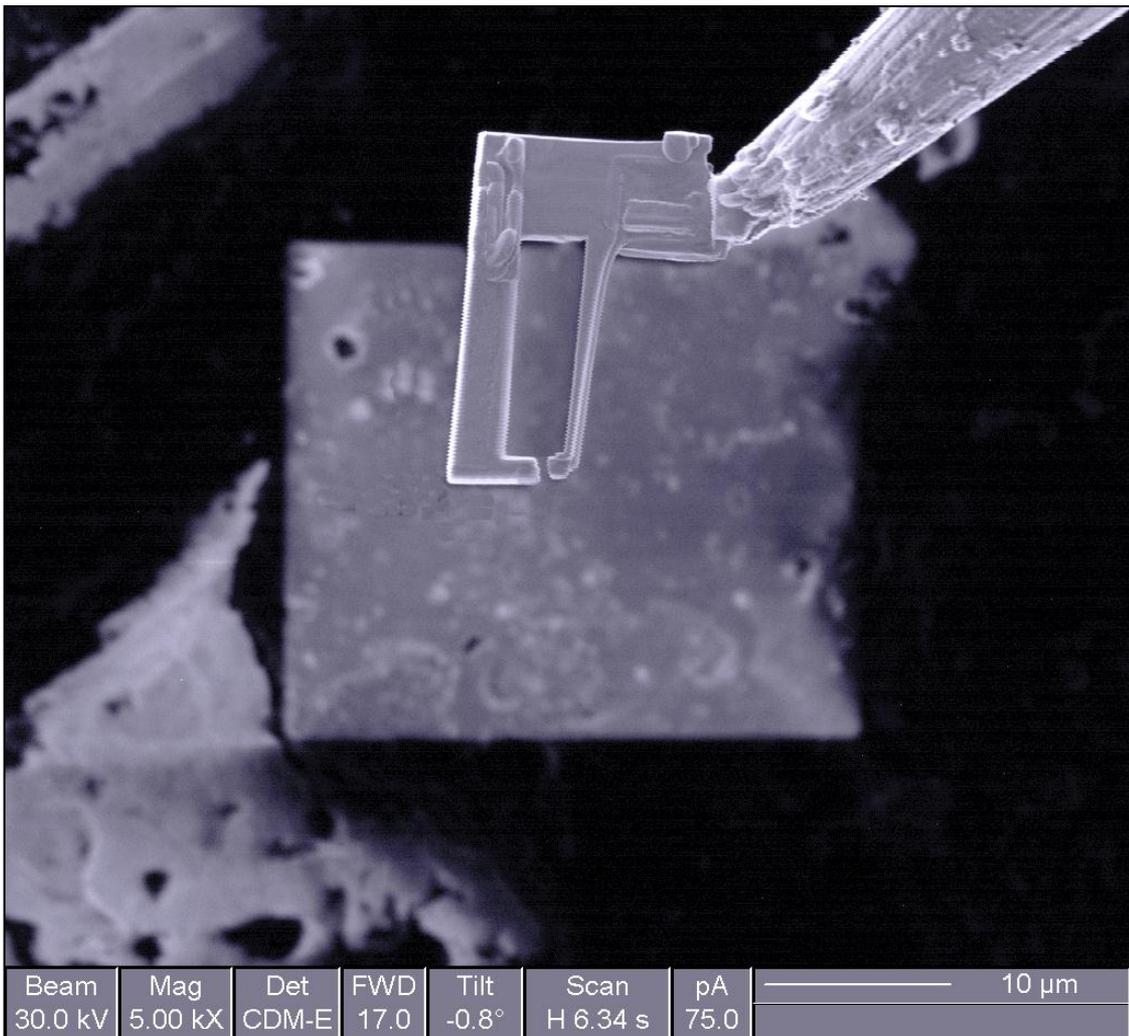
без нагрева



во время нагрева



Прототип нанопинцета на кончике наноманипулятора Omniprobe®

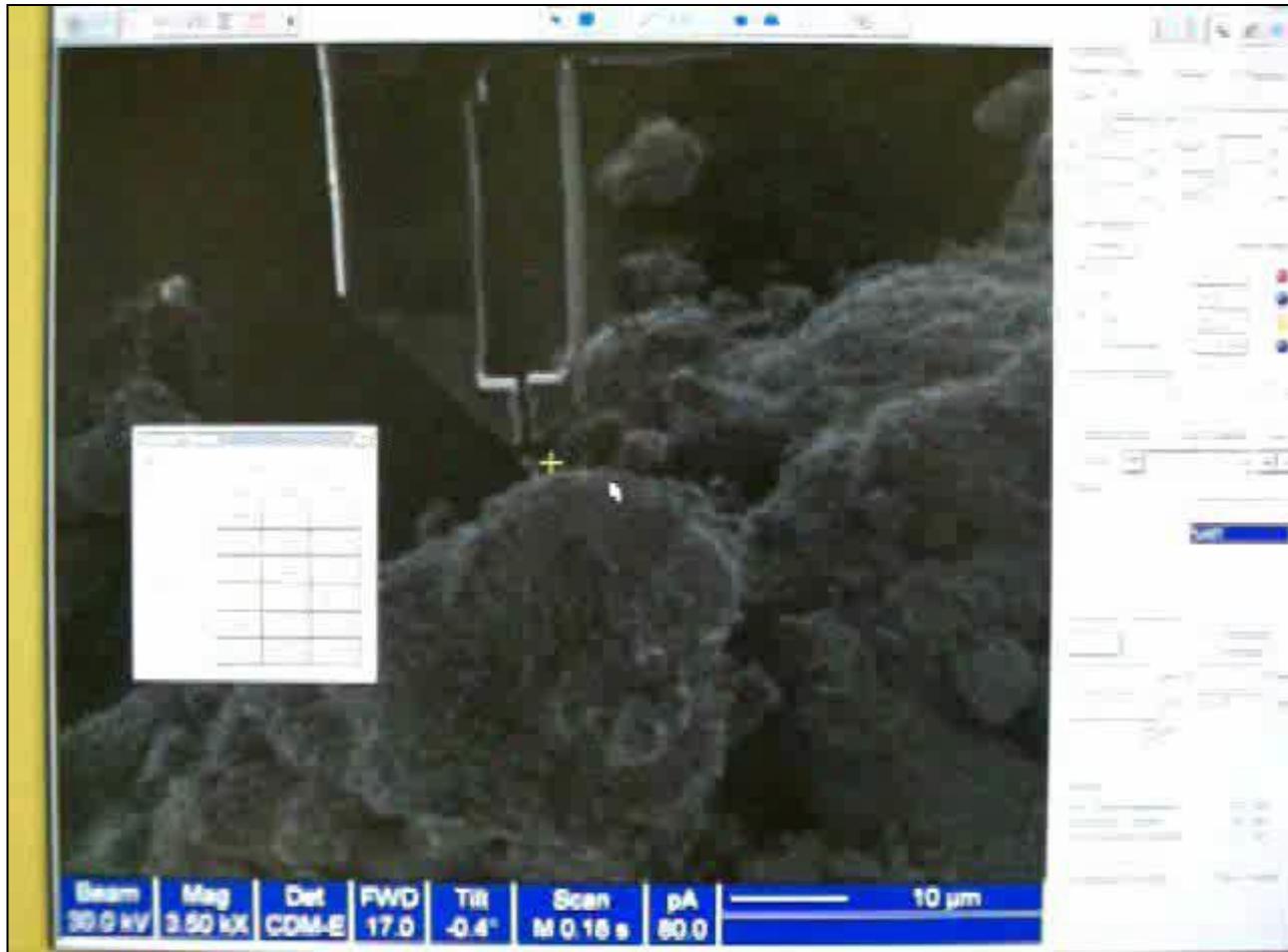


Прототип нанопинцета на кончике наноманипулятора Omniprobe®

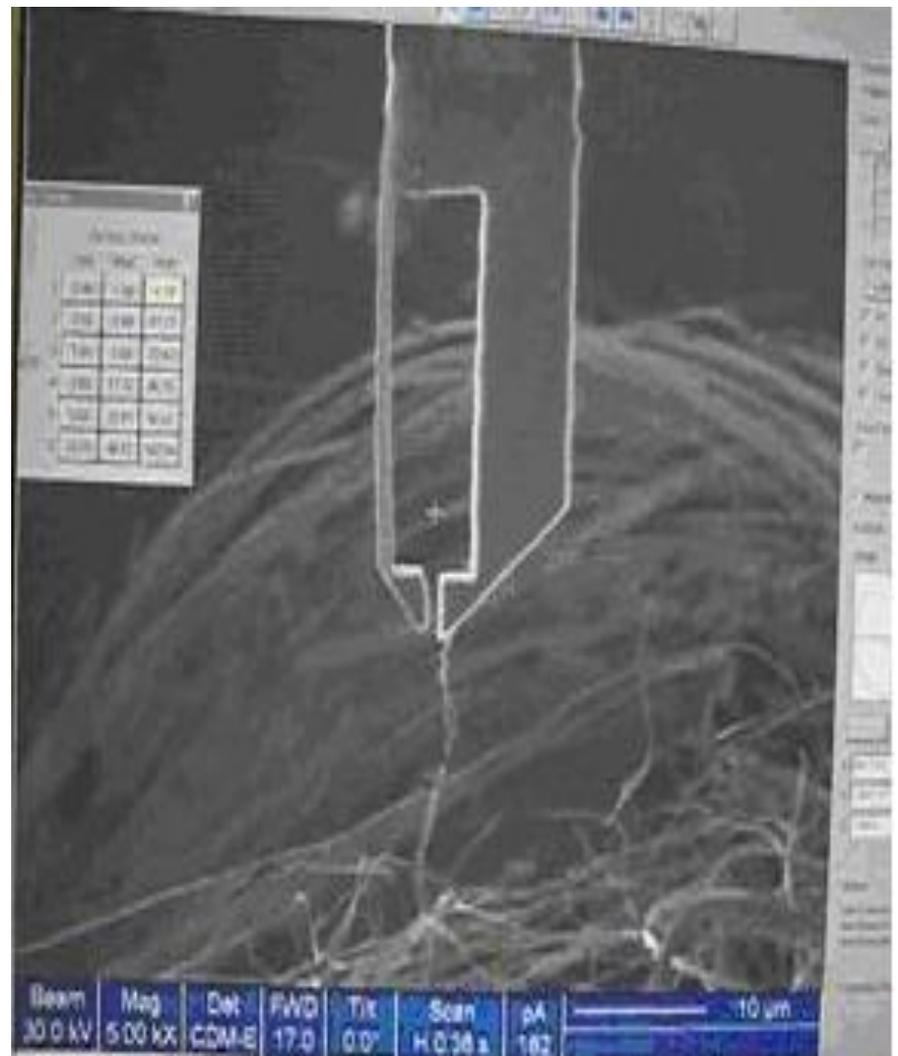
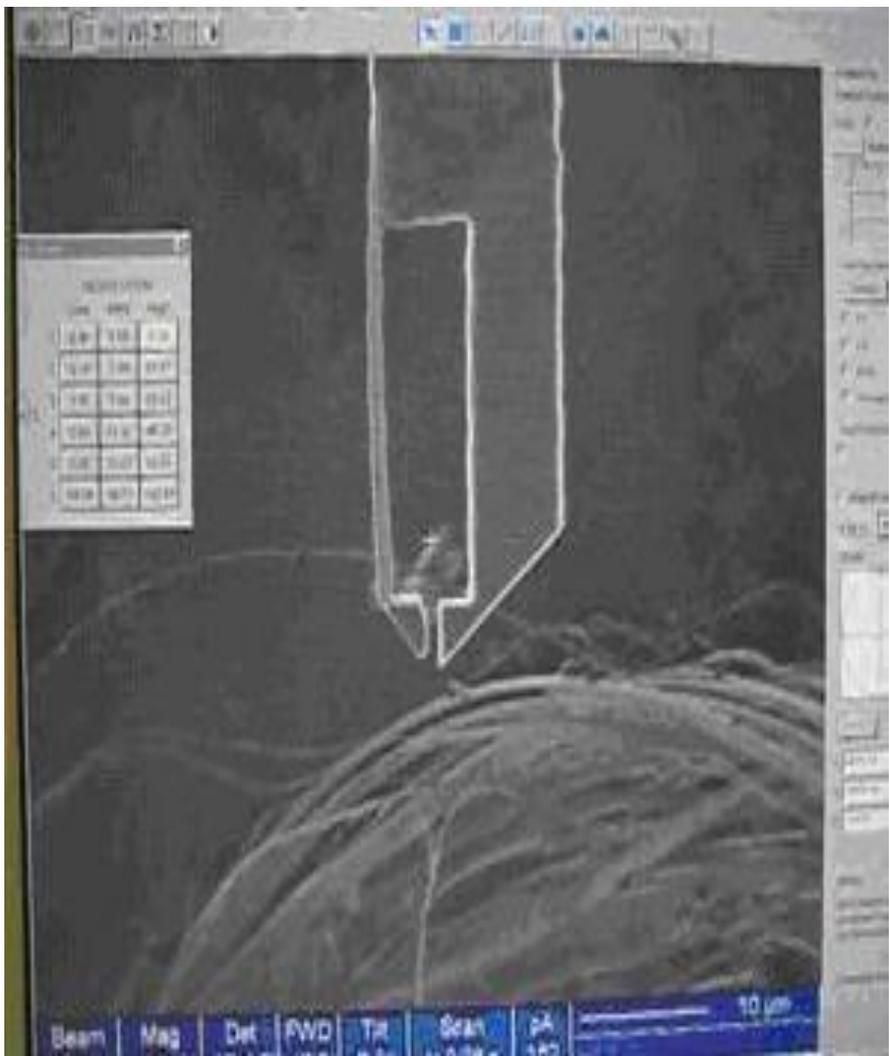


Время срабатывания нанопинцета ~ 200 мс

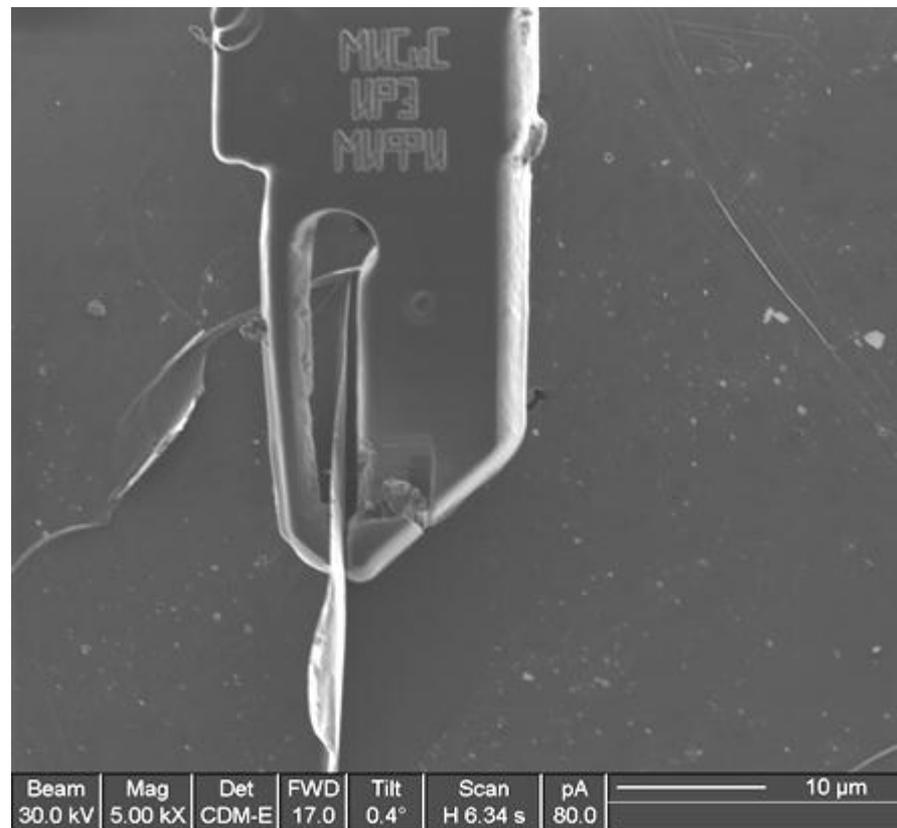
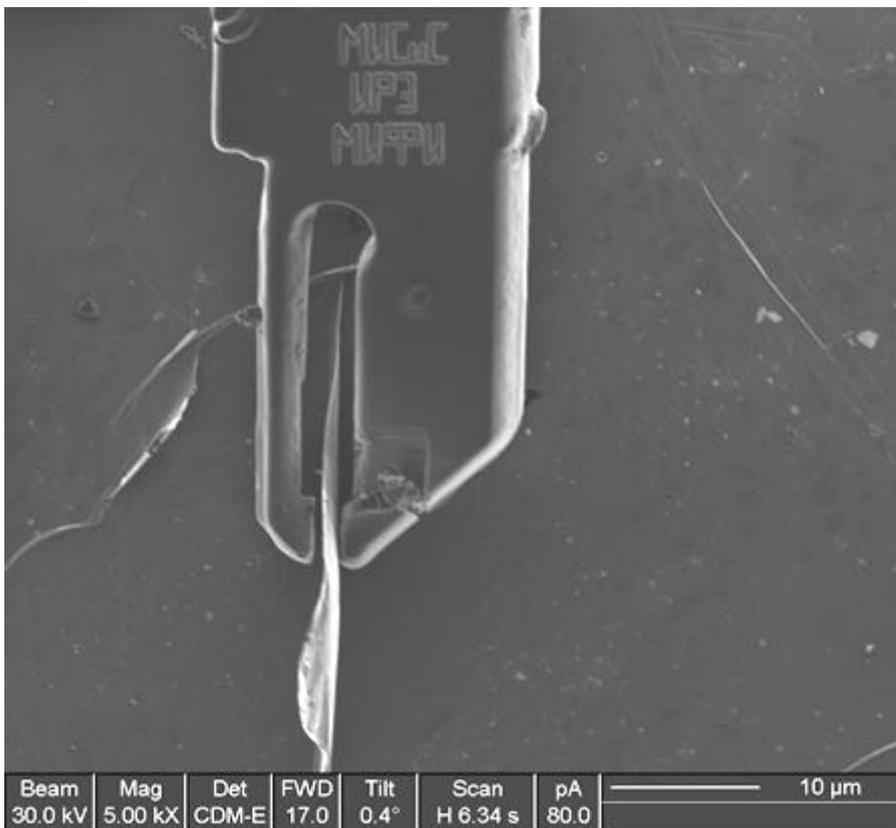
Манипулирование пучком углеродных нанотрубок



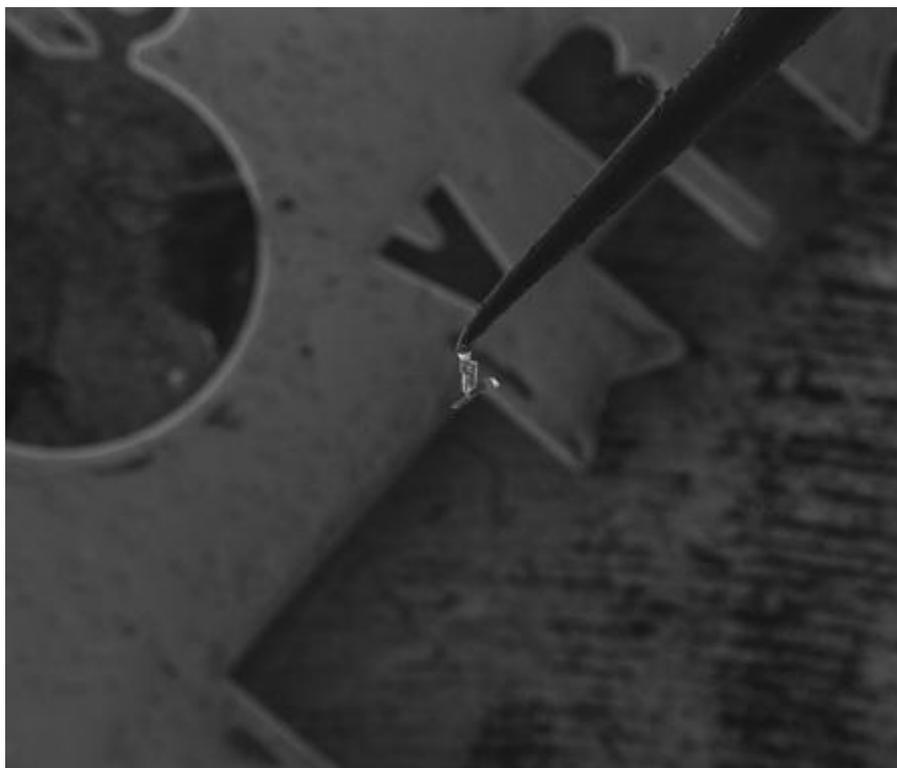
Манипулирование вискерами Ta₃S



Манипулирование стопками графеновых слоев



Манипулирование стопками графеновых слоев

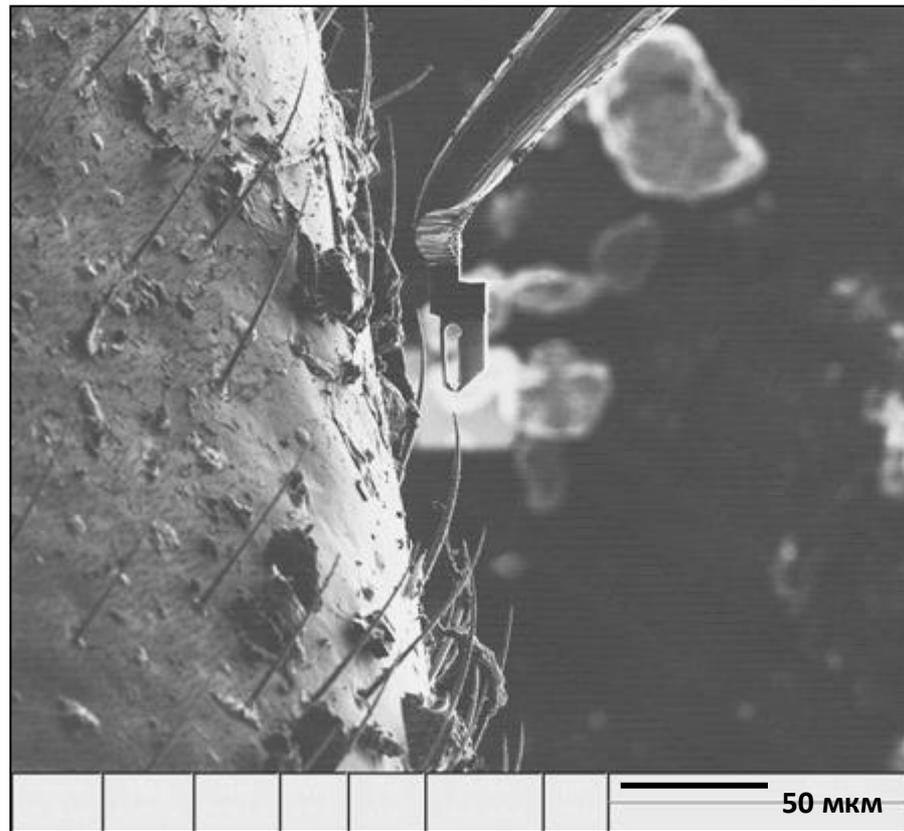
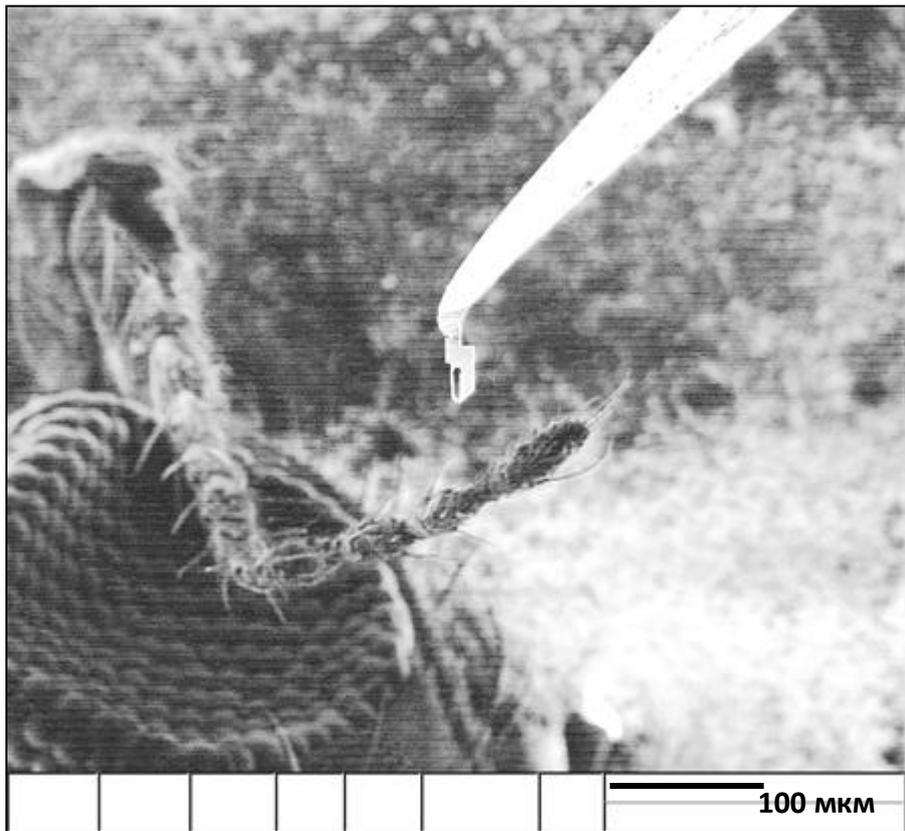


Beam	Mag	Det	FWD	Tilt	Scan	pA	200 μm
30.0 kV	250 X	CDM-E	17.0	0.4°	H 6.34 s	80.0	

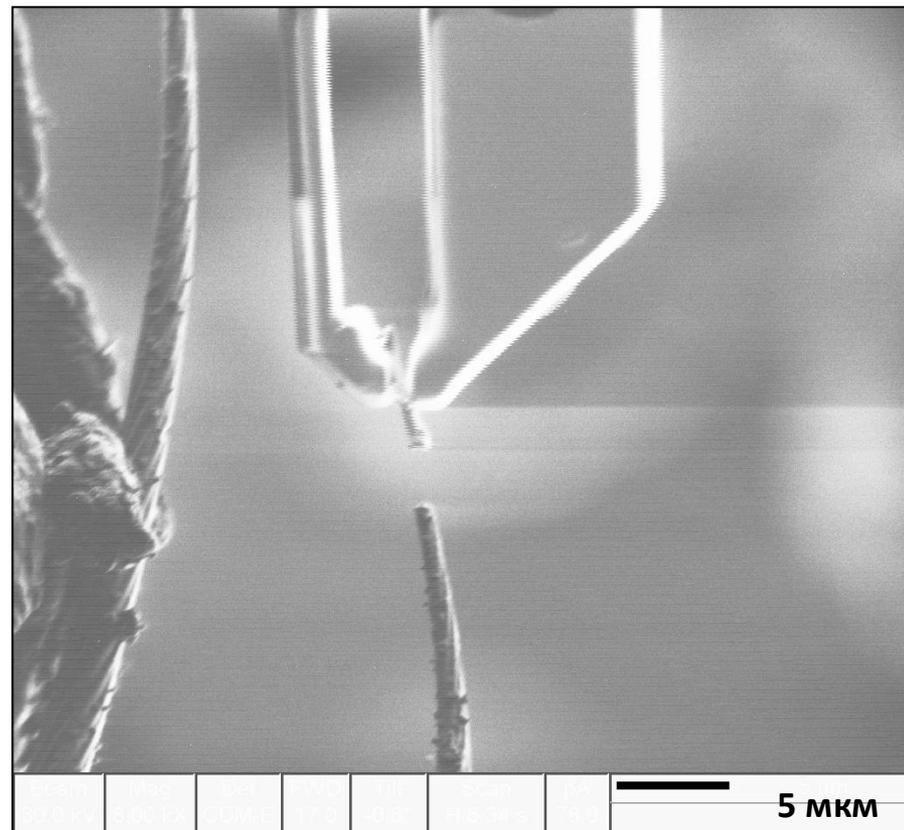
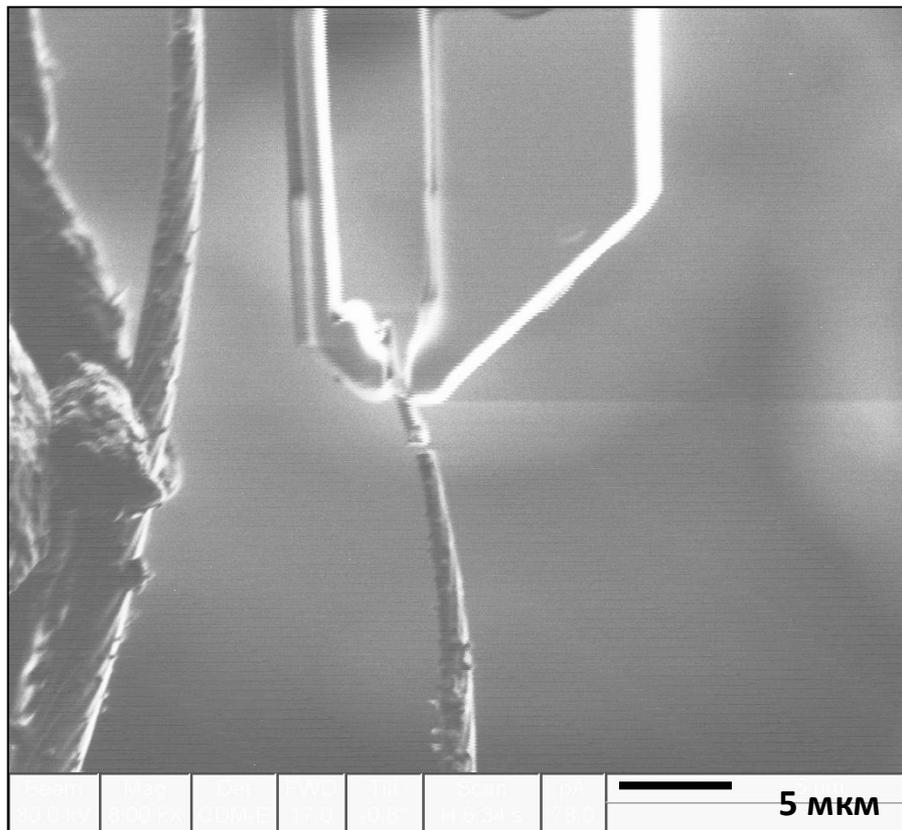


Beam	Mag	Det	FWD	Tilt	Scan	pA	20 μm
30.0 kV	2.00 kX	CDM-E	17.0	0.4°	H 6.34 s	81.0	

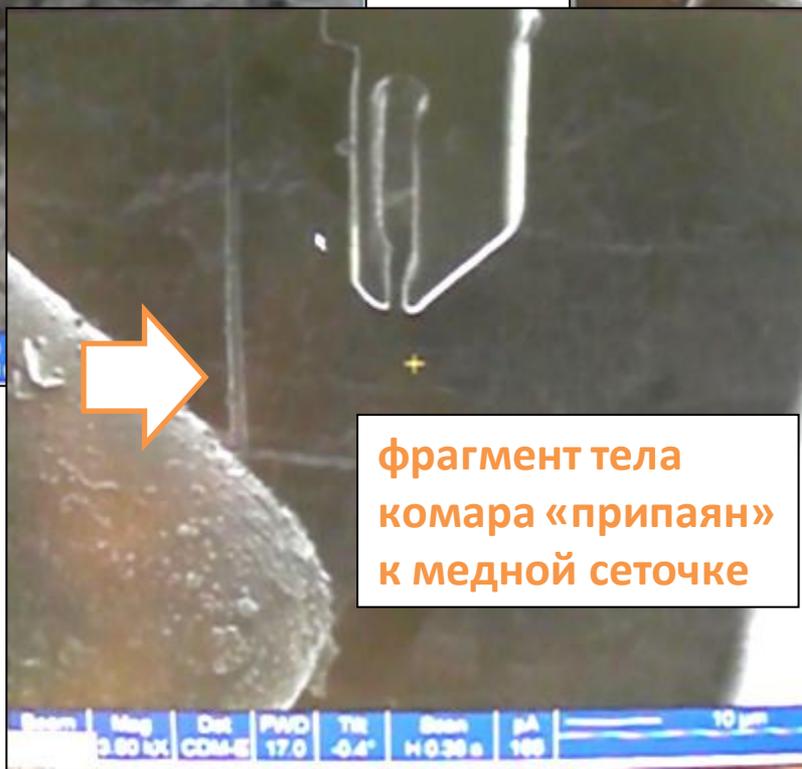
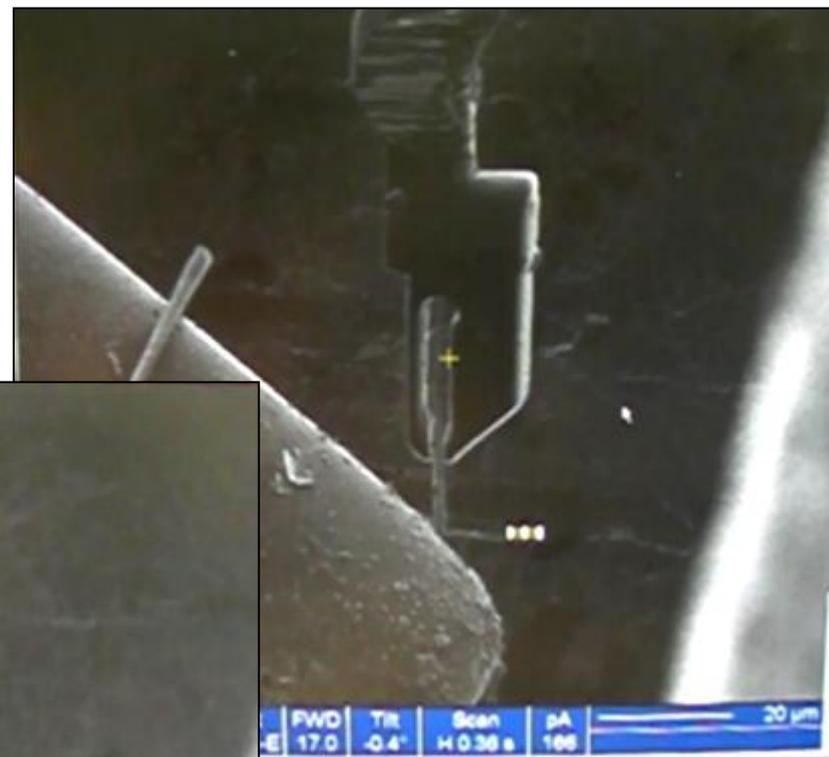
Манипулирование биологическим микрообъектом



Манипулирование биологическим микрообъектом



Манипулирование биологическим микрообъектом



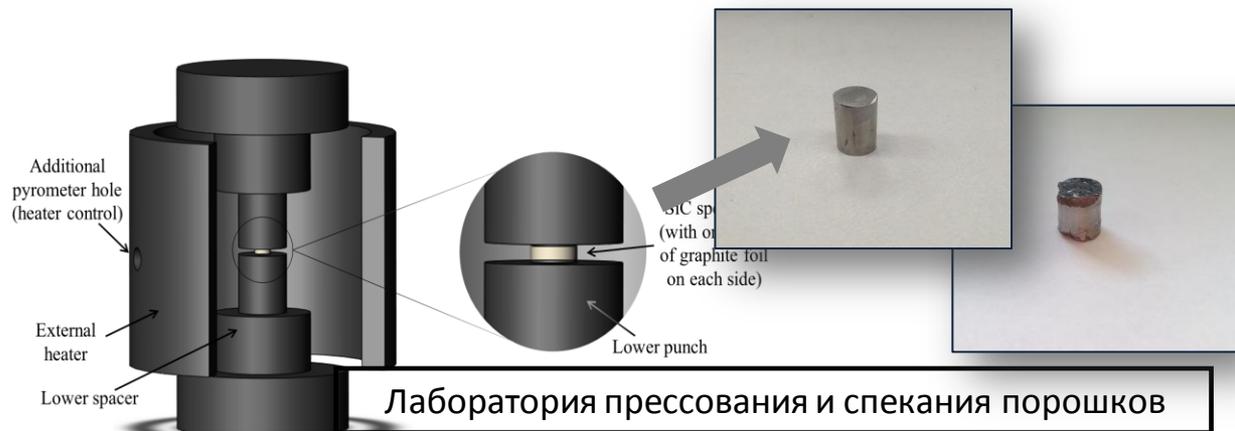
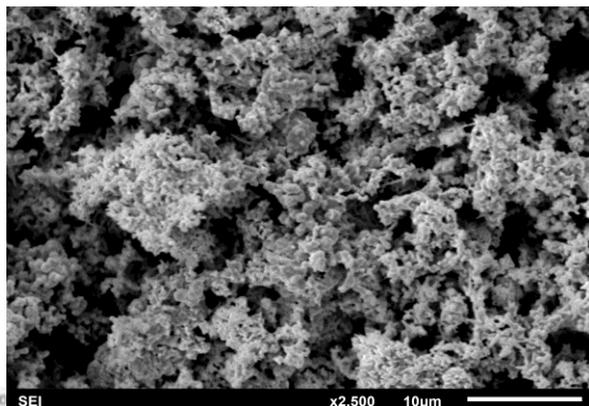
фрагмент тела
комара «припаян»
к медной сеточке



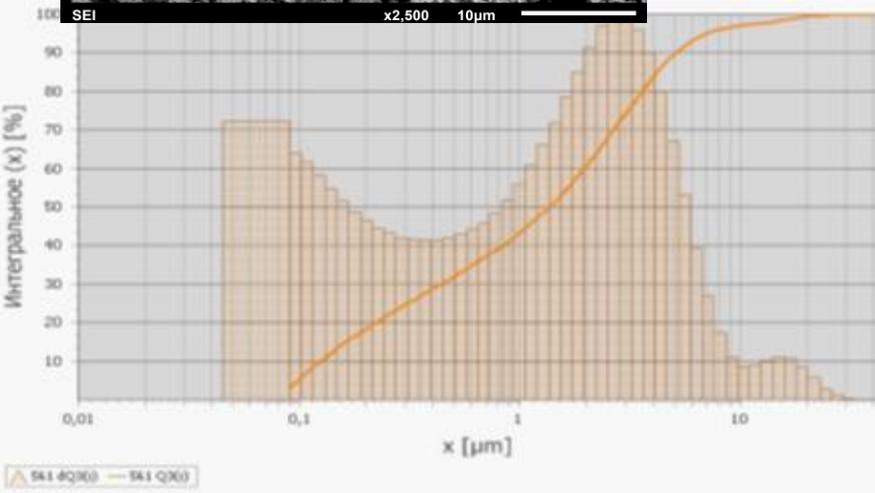
Названия проектов

1. Изучение методов исследования гранулометрического состава керамических нанопорошков.
2. Изучение методов измерения прочностных характеристик наноматериалов, полученных спарк-плазменным спеканием.
3. Получение наноструктурных материалов с помощью кристаллизации аморфных сплавов на основе никеля и кобальта.
4. Изучение изменения поверхности материала в процессе нанокристаллизации с помощью атомно-силовой микроскопии.
5. Модифицирование металлических материалов путем создания наноструктурированного поверхностного слоя при обработке потоками импульсной плазмы.
6. Создание дисперсно-упрочненного наноразмерными оксидами поверхностного слоя путем воздействия потоками высокотемпературной импульсной плазмы.

1. Изучение методов исследования гранулометрического состава керамических нанопорошков.
2. Изучение методов измерения прочностных характеристик наноматериалов, полученных спарк-плазменным спеканием.



Лаборатория прессования и спекания порошков



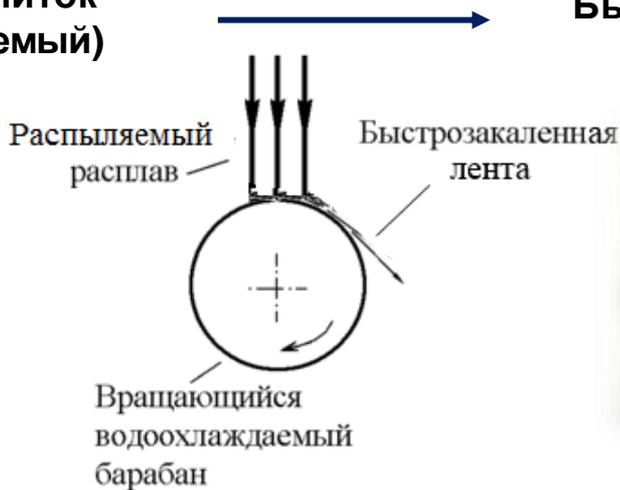
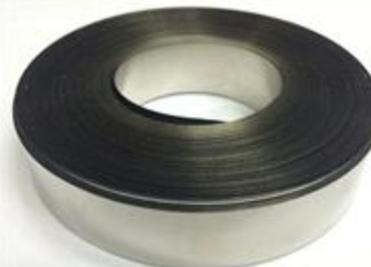
3. Получение наноструктурных материалов с помощью кристаллизации аморфных сплавов на основе никеля и кобальта.

4. Изучение изменения поверхности материала в процессе нанокристаллизации с помощью атомно-силовой микроскопии.

**Кристаллический слиток
(труднодеформируемый)**

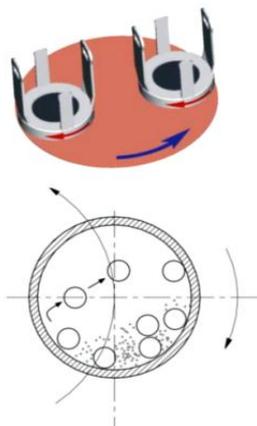
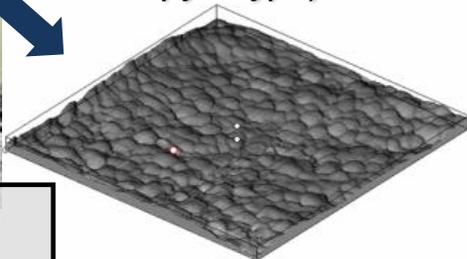


**Быстрозакаленный сплав
(Аморфная структура)**



Установка «Кристалл»

**Термообработанный
полуфабрикат
(Нанокристаллическая
структура)**



Порошок

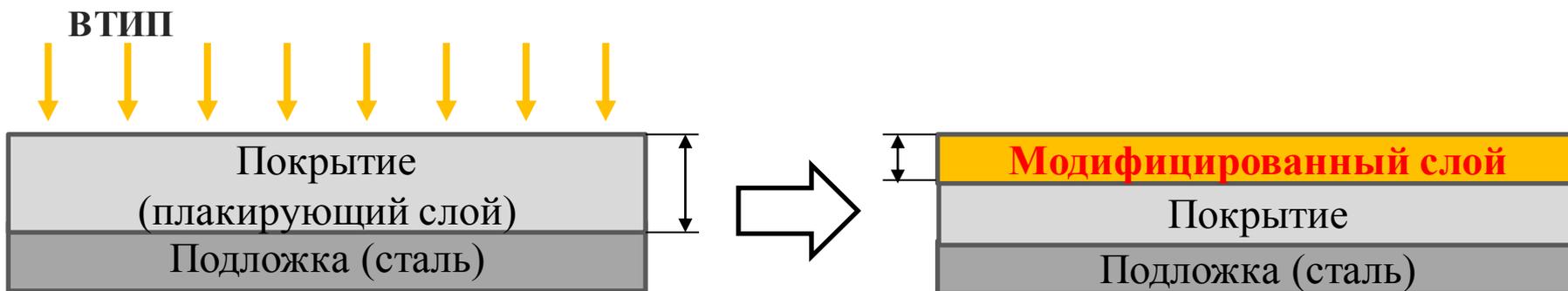


Вакуумная печь

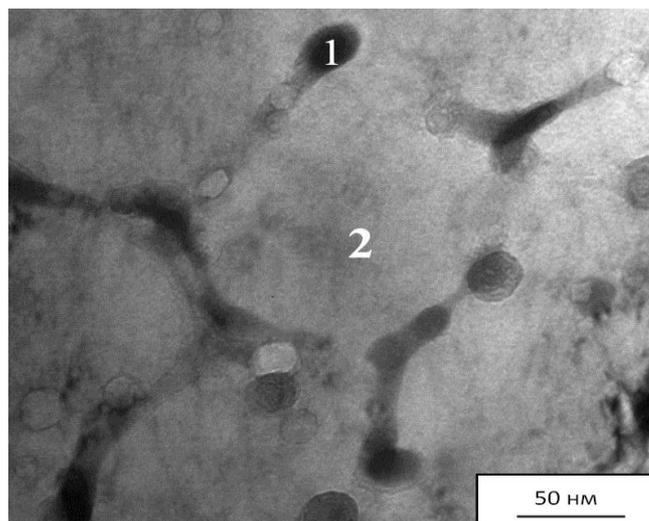
Мультимикроскоп
СММ-2000

5. Модифицирование металлических материалов путем создания наноструктурированного поверхностного слоя при обработке потоками импульсной плазмы.

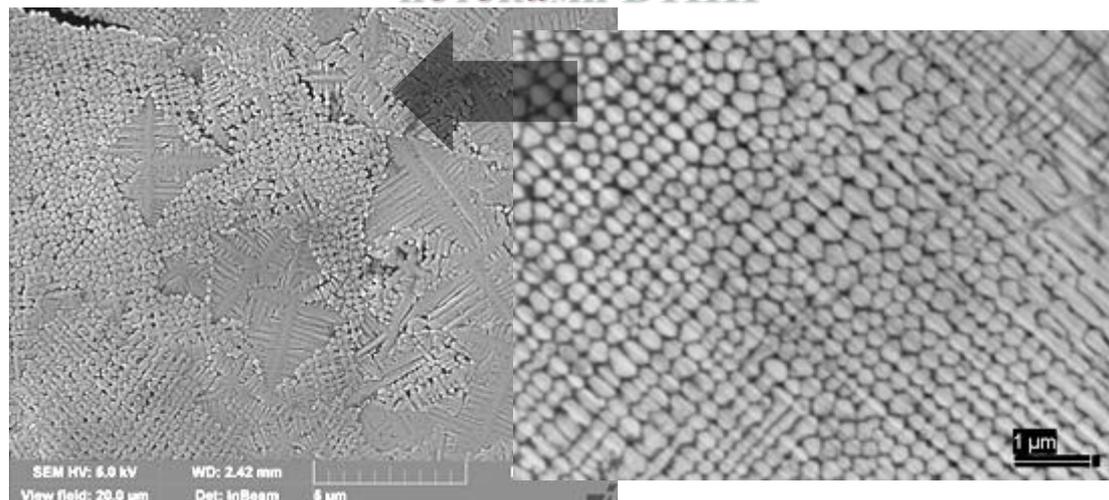
6. Создание дисперсно-упрочненного наноразмерными оксидами поверхностного слоя путем воздействия потоками высокотемпературной импульсной плазмы.



**Микроструктура
поверхностных слоев стали**



**Микроструктура образцов
плакированных сталей после обработки
потоками ВТИП**



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ