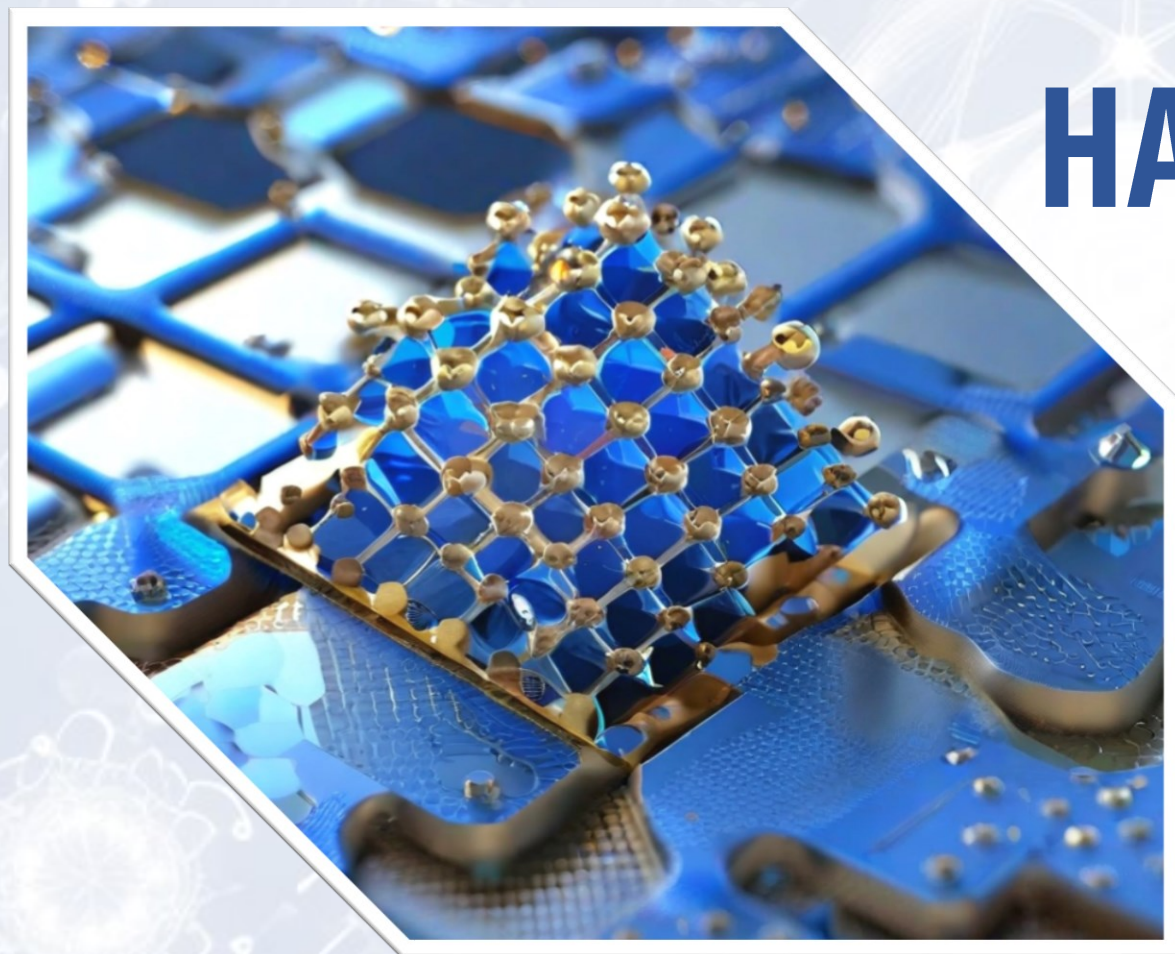


**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ**  
**Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова**

ЛАБОРАТОРИЯ НАНОПРОЦЕССОВ И ТЕХНОЛОГИЙ



# **НАНОИНЖЕНЕРИЯ**

# **ПОВЕРХНОСТИ**

*Современные  
методы и исследования*

## НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

**Исследование микро- и наноструктуры** – исследование образцов с высоким пространственным разрешением вплоть до атомного уровня с помощью атомно-силовой микроскопии



**Исследования специализированными методами АСМ** – наномеханическое картирование, электросиловая, магнитно-силовая, латерально-силовая микроскопия, механическая нанолитография

**Определение свойств** – модуль упругости, микротвердость, вязкость разрушения, коэффициенты  $H/E$ ,  $H^3/E^2$ , коэффициент и сила трения, удельный объемный износ, краевой угол смачивания, удельная поверхностная энергия

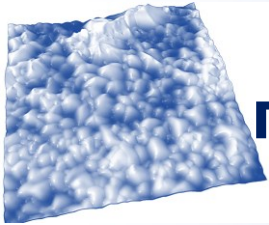


**Модификация поверхности материалов**  
методом Ленгмюра-Блоджетт

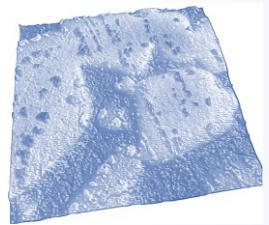
**Разработка новых методов и методик** с использованием атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования



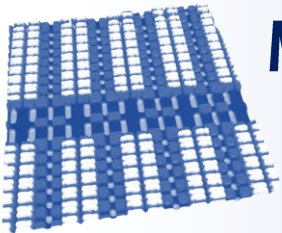
# ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭТАПЫ



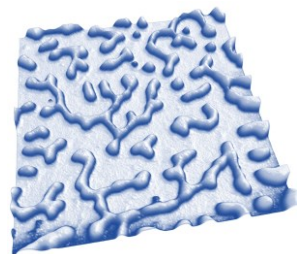
**Износостойкие твердые покрытия и пленки** (двух-, трех-, четырехэлементные, АПП и др.)



**Керамика и материалы** (карбид кремния и др.)



**Материалы и элементы МЭМС** (гетероструктуры, тонкие покрытия, интегральные схемы)



**Биологические клетки и материалы, полимерные материалы и пленки**

Исследовательская работа разделена на несколько этапов:

- ✓ Мы работаем с образцами клиентов.
- ✓ Полный спектр исследований на микро- и наноуровне методами АСМ и НИ (микроструктура со всеми сопутствующими свойствами, механические и трибологические свойства, магнитные и проводящие свойства и др.)
- ✓ Разработка оптимальных рекомендаций, характеристика и анализ результатов исследований.
- ✓ Публикация результатов исследований (в том числе в высокорейтинговых журналах)

# ОБОРУДОВАНИЕ



Атомно-силовой микроскоп NT-206

Жидкостная ячейка



Термоплатформа



Наноиндентор Hysitron 750 Ubi



Ванна Ленгмюра-Блоджетт



Установка для распылительной сушки  
LU-222 Advanced (Labultima)



Многофункциональный атомно-силовой микроскоп  
Dimention FastScan (Bruker)

Контактный профилометр  
SurfTest SJ-210 (Mitutoyo)



Прибор для измерения краевого угла  
смачивания DSA 100E (KRUSS)



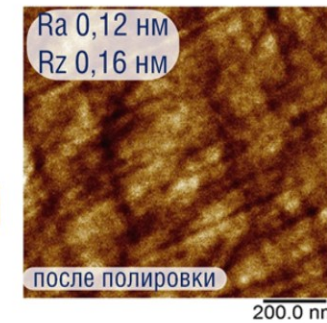
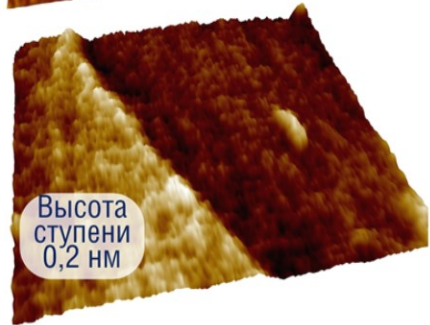
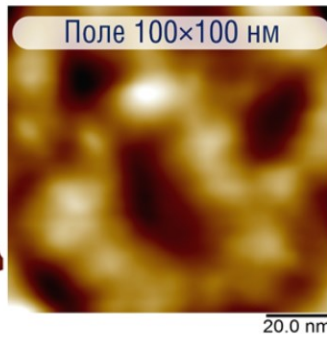
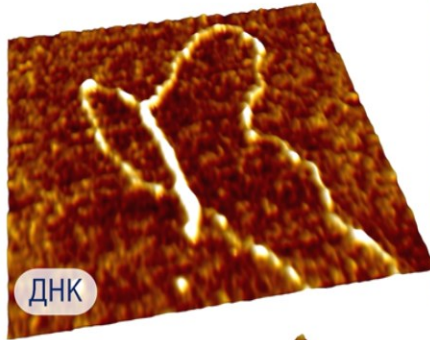
# ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРЫ

- Получение микроструктуры
- Высокоточный контроль шероховатости поверхности
- Определение адгезии и удельной поверхностной энергии
- Определение геометрических размеров
- Определение размера зерна

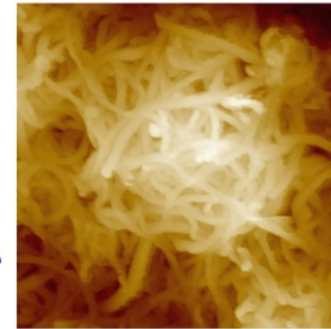
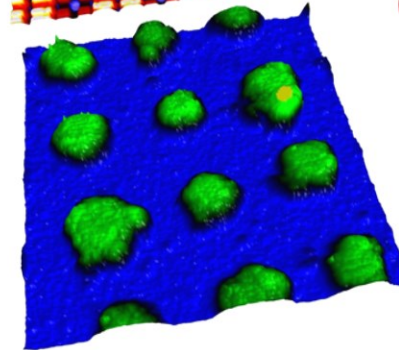
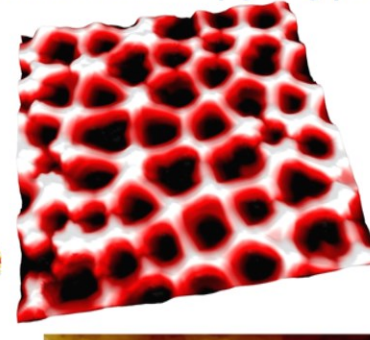
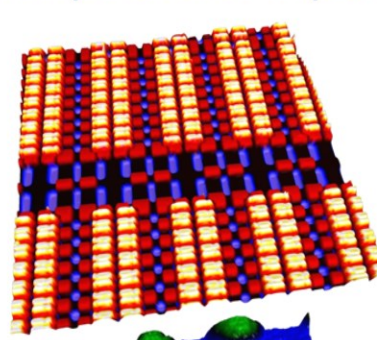
# ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРЫ

## получение микроструктуры

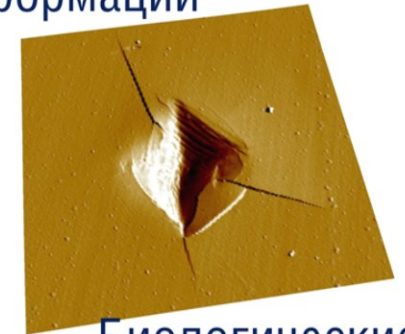
### Высокоточные измерения



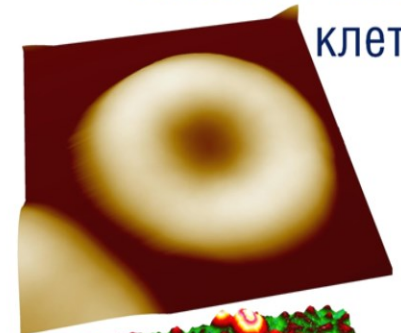
### Микросхемы и различные структуры



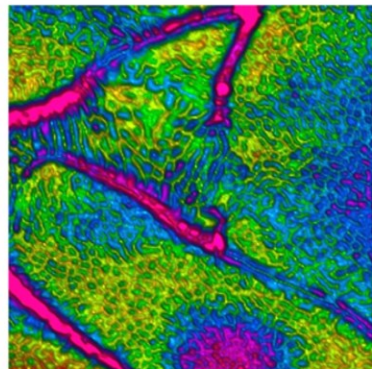
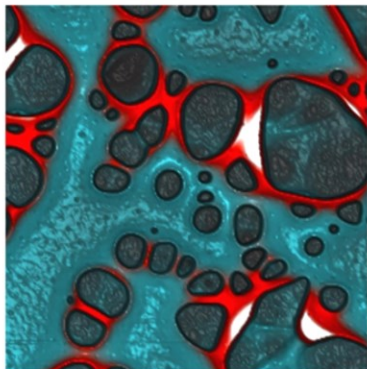
### Визуализация области деформации



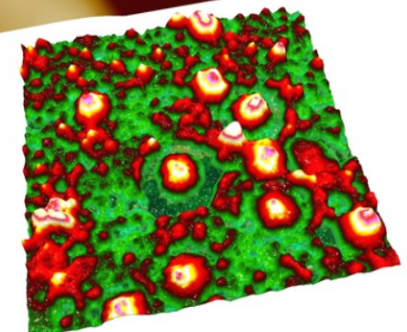
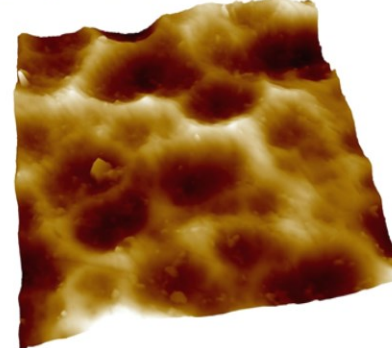
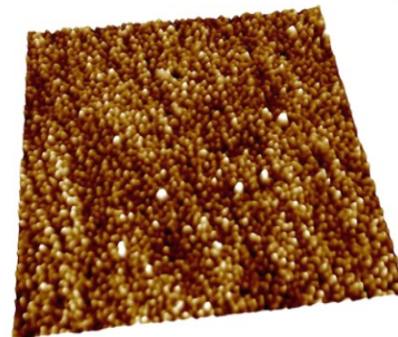
### Биологические клетки



### Полимеры и биологический материал



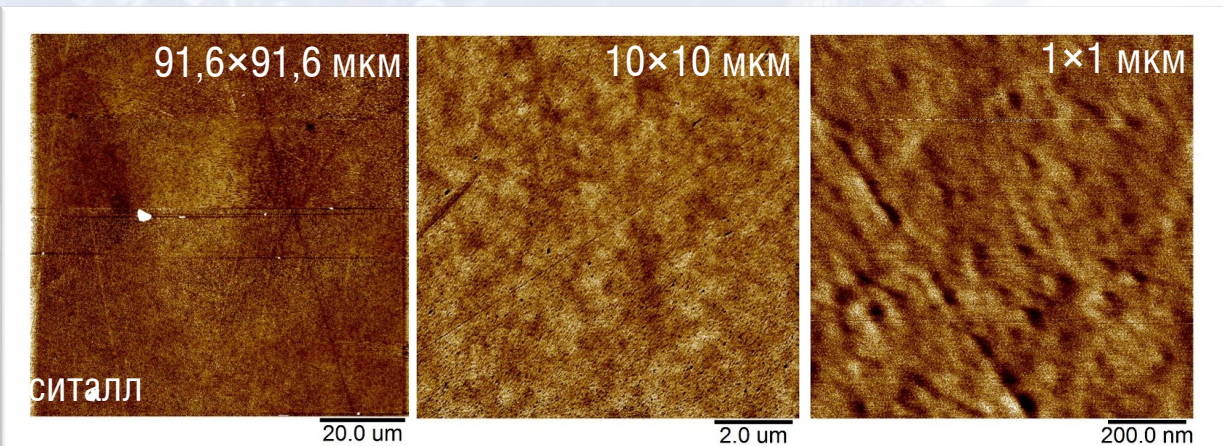
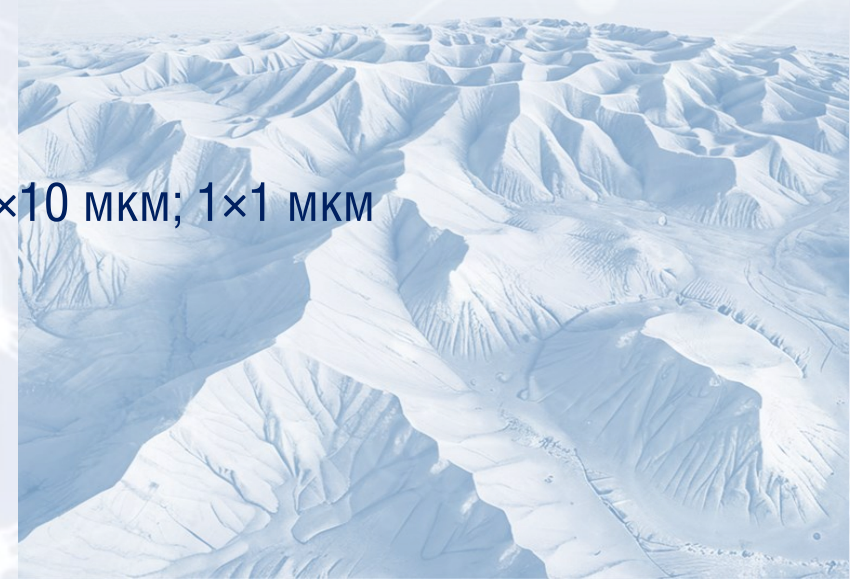
### Металлы и износостойкие покрытия



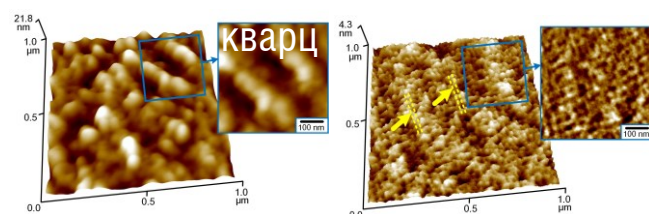
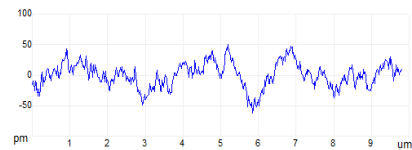
# ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРЫ

## высокоточный контроль шероховатости поверхности

- Шероховатость поверхности по ГОСТ Р 8.700-2010
- Контроль в полуконтактном или контактном режимах
- Измерения на 3 разных участках образца
- Поля сканирования на каждом участке: 91,6×91,6 мкм; 10×10 мкм; 1×1 мкм
- Разрешение кадра сканирования 512×512 точек



|        | 91,6×91,6 мкм | 10×10 мкм | 1×1 мкм |
|--------|---------------|-----------|---------|
| Ra, нм | 0,24          | 0,18      | 0,11    |
| Rq, нм | 0,57          | 0,62      | 0,14    |
| Rz, нм | 0,53          | 0,34      | 0,20    |



|        | механическая полировка | магнито-реологическая полировка |
|--------|------------------------|---------------------------------|
| Ra, нм | 1.63 ± 0.08            | 0.40 ± 0.02                     |
| Rq, нм | 3.82 ± 0.19            | 0.60 ± 0.03                     |
| Rz, нм | 2.81 ± 0.14            | 0.80 ± 0.04                     |

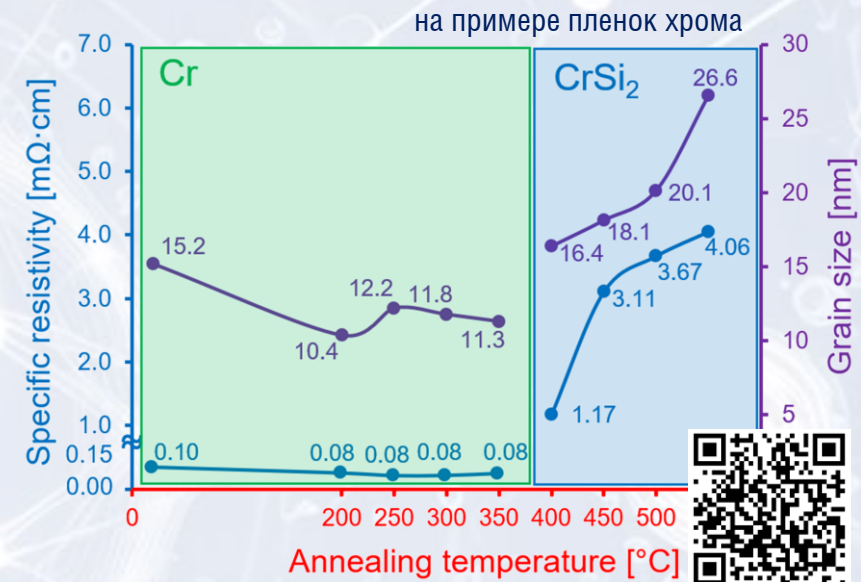
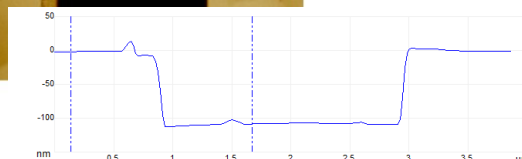
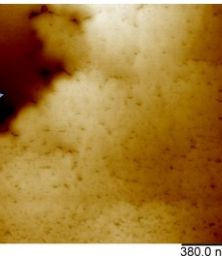
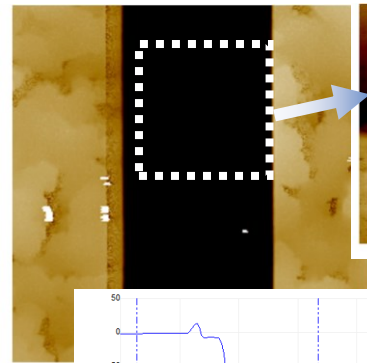
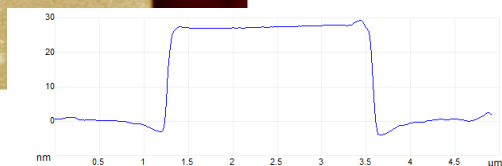
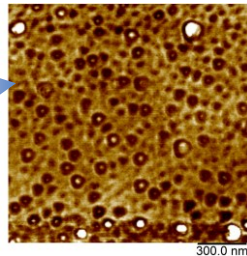
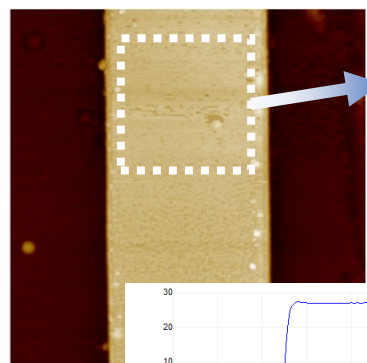
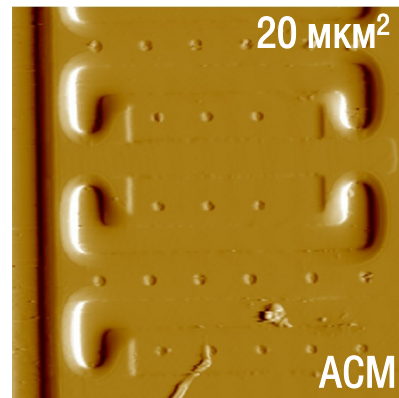
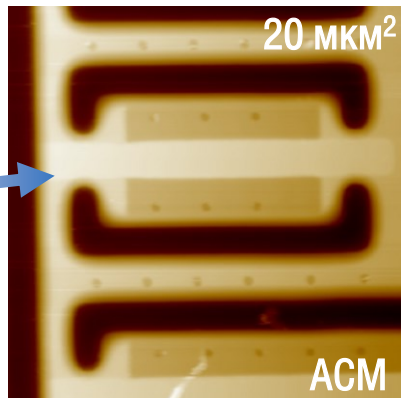
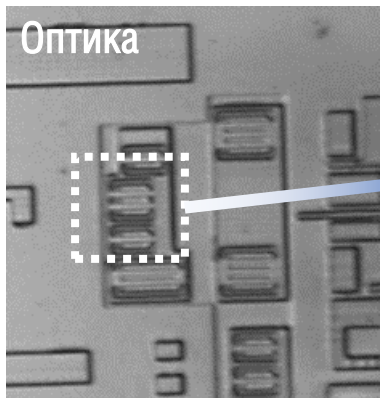
### Контроль шероховатости:

- оптических материалов высокоточных оптических микроскопов
- гетероструктур СВЧ-техники
- пьезоматериалов
- элементов МЭМС
- других материалов, требующих низкой шероховатости с целью обеспечения отличных рабочих характеристик

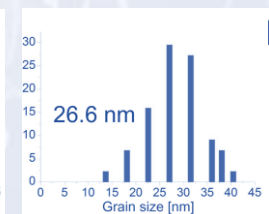
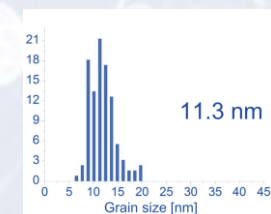
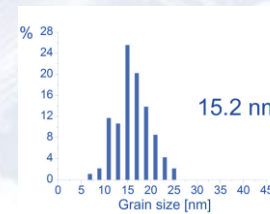
# ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРЫ

*Определение удельной поверхностной энергии, геометрических размеров, размера зерна*

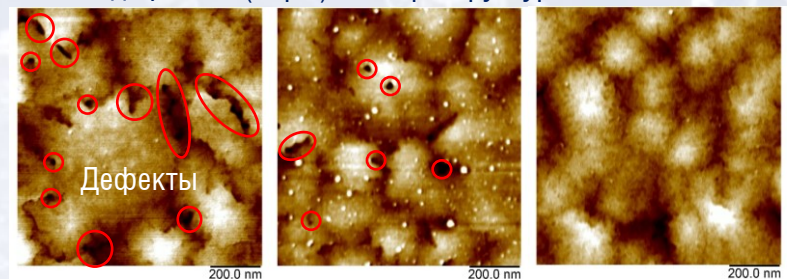
Контроль морфологии и геометрических размеров



Гистограммы распределения размера зерен в пленках хрома



Наличие дефектов (поры) в гетероструктурах GaN

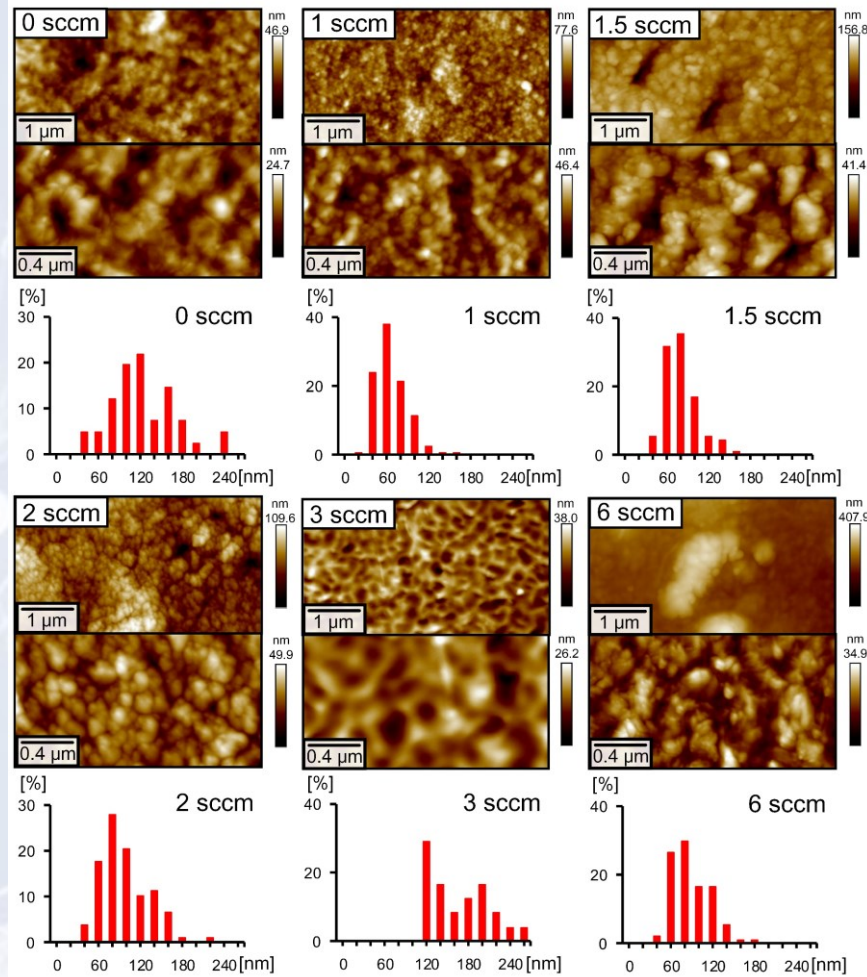




# ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРЫ

## Исследование морфологии поверхности пленок и покрытий

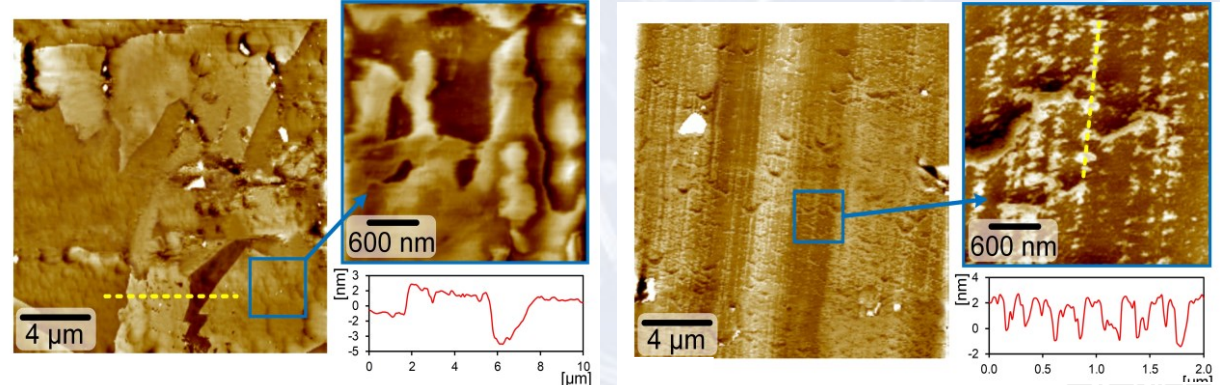
на примере твердых износостойких покрытий Zr(C)N  
(на изображениях исходная морфология)



Book Chapter 16. «Effect of Atmosphere During Deposition on the Morphology, Mechanical Properties and Microfriction of Zr-Based Coatings» / T.A. Kuznetsova, V.A. Lapitskaya, S.A. Chizhik, B. Warcholinski, A. Gilewicz // Advanced Structured Materials, vol 155. P. 271–319. 2022. Springer, Cham.



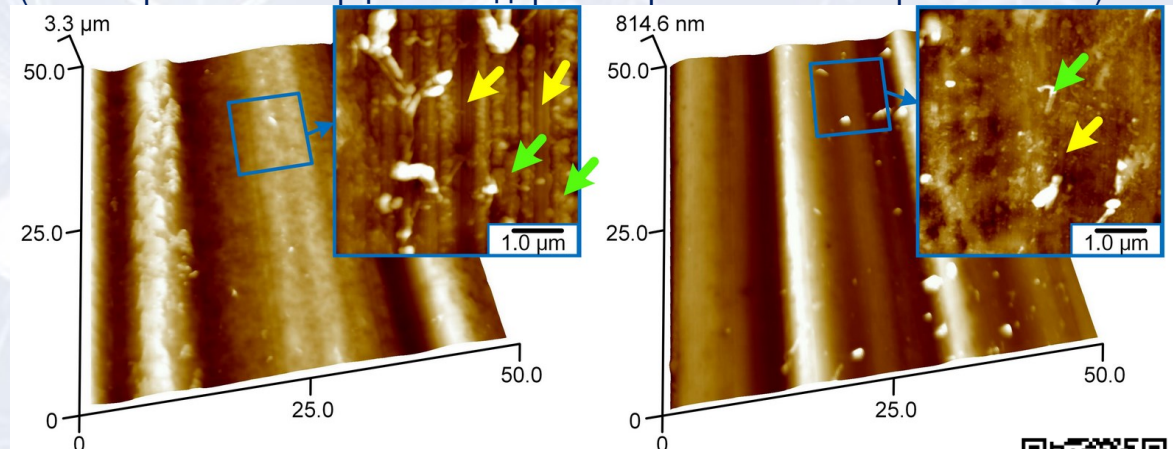
на примере твердых износостойких алмазоподобных покрытий (на изображениях морфология дорожек трения после макроиспытаний с нанотрибопленками)



Silicon addition as a way to control properties of tribofilms and friction of DLC coatings / T. Kuznetsova, V. Lapitskaya, A. Khabarava, R. Trukhan, S. Chizhik, E. Torskaya, A. Mezrin, S. Fedorov, A. Rogachev, B. Warcholinski // Applied Surface Science. – 2023. – V. 608. – Article № 155115.



на примере твердых износостойких покрытий Cr(V)N  
(на изображениях морфология дорожек трения после макроиспытаний)

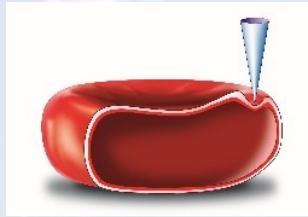


Structural, mechanical and tribological properties of Cr-V-N coatings deposited by cathodic arc evaporation / A. S. Kuprin, V. D. Ovcharenko, A. Gilewicz, G. N. Tolmachova, I. V. Kolodiy, R. L. Vasilenko, T. Kuznetsova, V. A. Lapitskaya, B. Warcholinski // Tribology International. – 2022. – Vol. 165. – P. 107246.

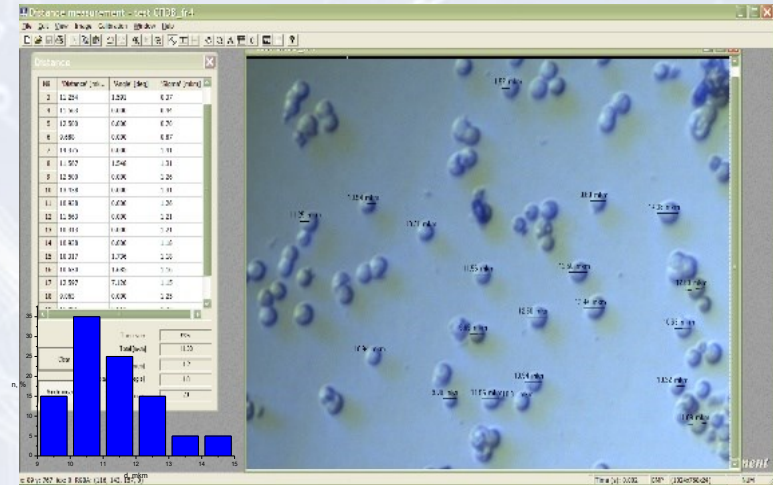
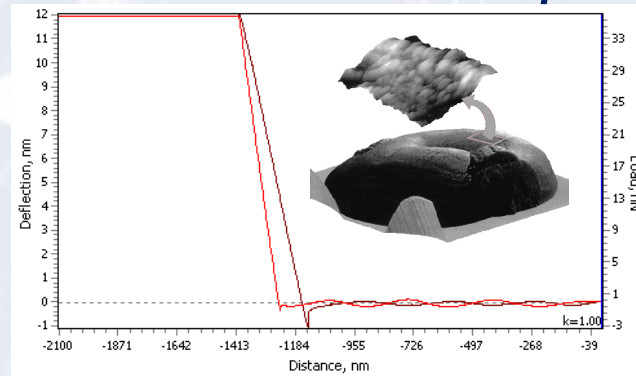
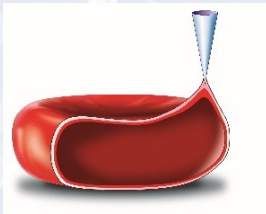


# ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРЫ

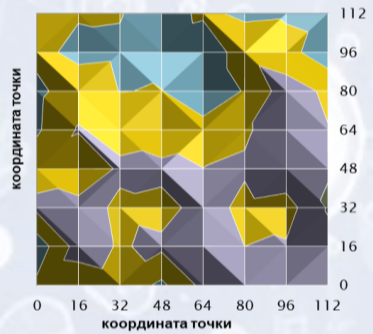
## Исследование биологических клеток и материалов



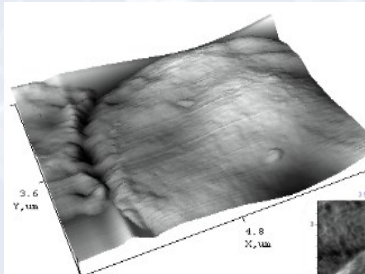
Карта распределения механических свойств поверхности мембраны клетки



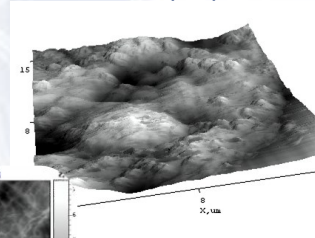
Оптическое изображение биологических клеток



Клетки почек быка

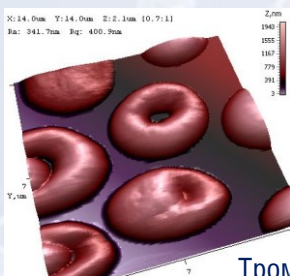


Влияние наночастиц меди и серебра

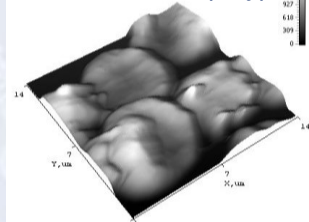


Клиническая гемостазиология

Эритроциты



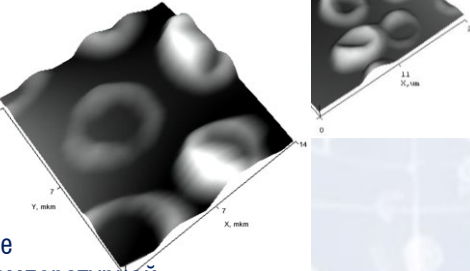
Влияние температуры



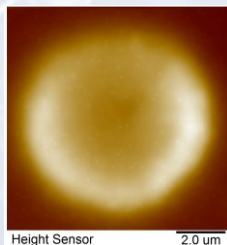
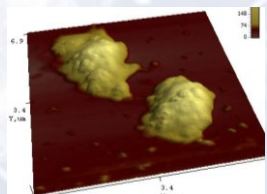
Влияние микрочастиц куркумина



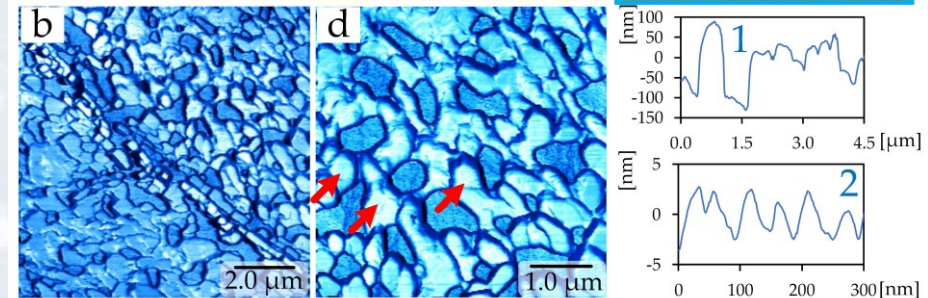
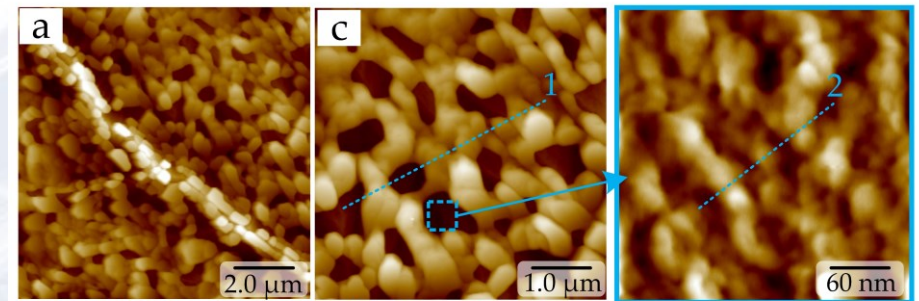
Влияние наночастиц SiO2



Тромбоциты



Влияние низкотемпературной плазмы



Структура высокомолекулярной гиалуроновой кислоты

# ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ АСМ

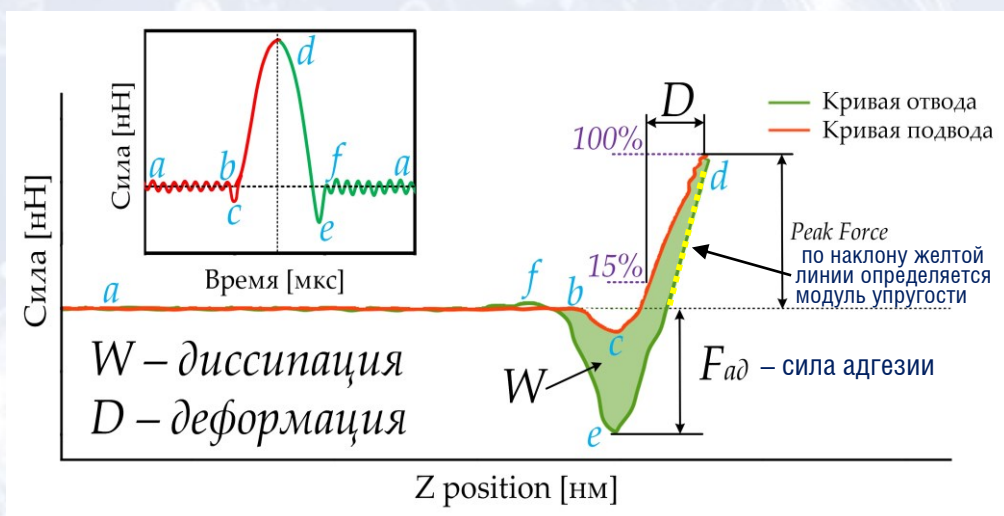
- Наномеханическое картирование
- Магнитно-силовая микроскопия
- Электросиловая микроскопия
- Латерально-силовая микроскопия
- Механическая нанолитография

# СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ АСМ

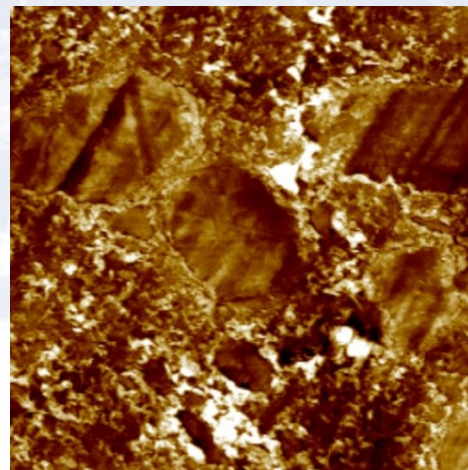
## Наномеханическое картирование

Режим PeakForce QNM (Quantitative NanoMechanics – количественное наномеханическое картирование) позволяет качественно получать карты и количественно измерять такие свойства материала как модуль упругости, адгезия, деформация и диссипация в наномасштабе.

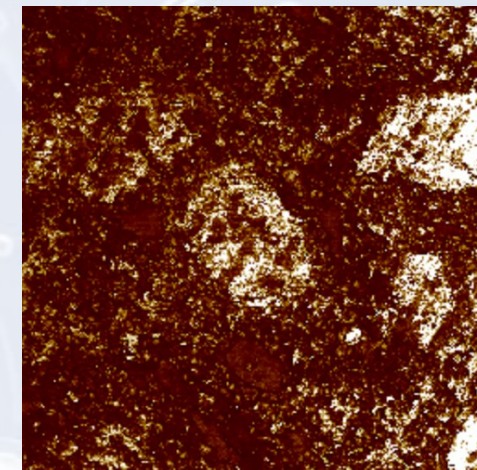
Поскольку в режиме Peak Force происходит постоянный контроль силы, с которой зонд воздействует на образец, глубина деформации образца очень мала и не превышает нескольких нанометров. В каждой точке изображения зонд совершает «подвод-отвод» к поверхности образца с записью силовых кривых (на изображении ниже). Получение и запись таких кривых и является основой работы режима PeakForce QNM, по которым автоматически идет пересчет значений механических свойств (модуль упругости, адгезия и др.) с учетом характеристик используемого зонда (радиус острия, жесткость консоли).



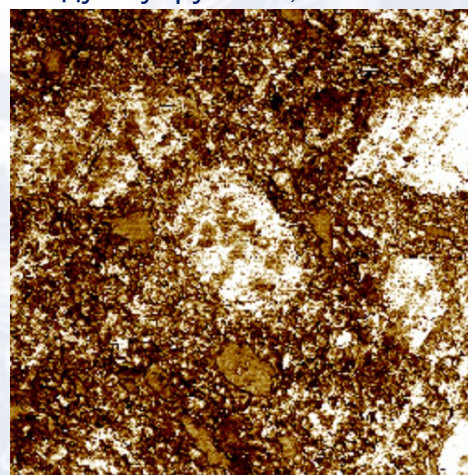
Топография, 60 мкм<sup>2</sup>



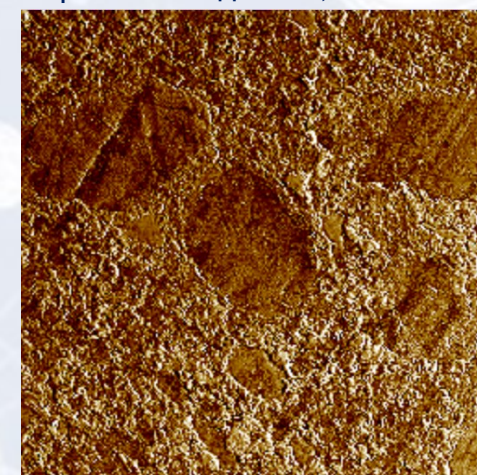
Карта модуля упругости, 60 мкм<sup>2</sup>



Карта логарифма модуля упругости, 60 мкм<sup>2</sup>



Карта силы адгезии, 60 мкм<sup>2</sup>



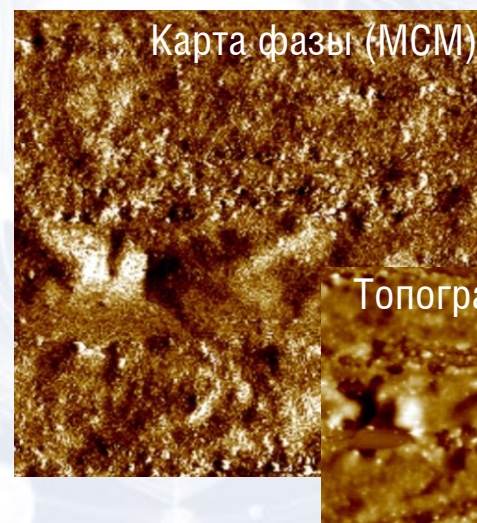
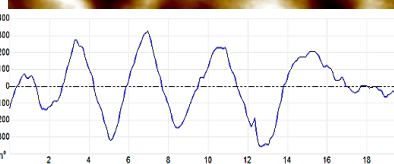
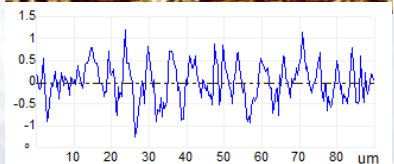
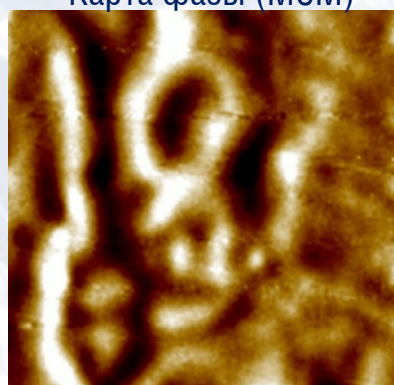
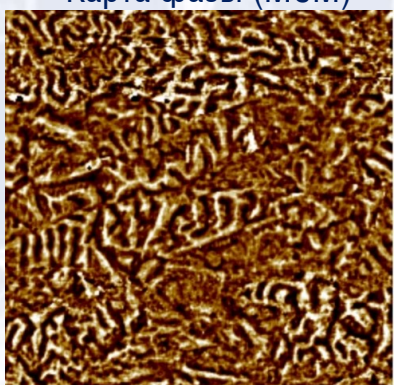
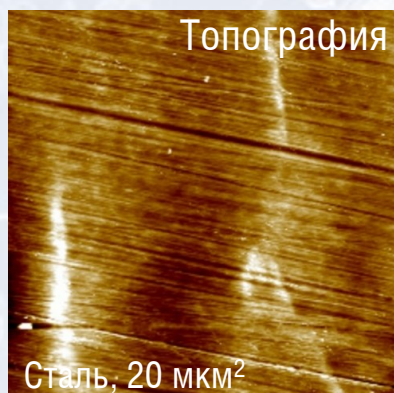
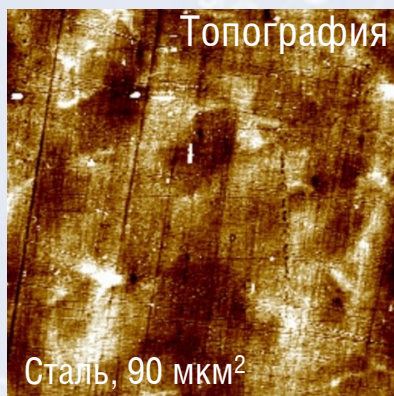
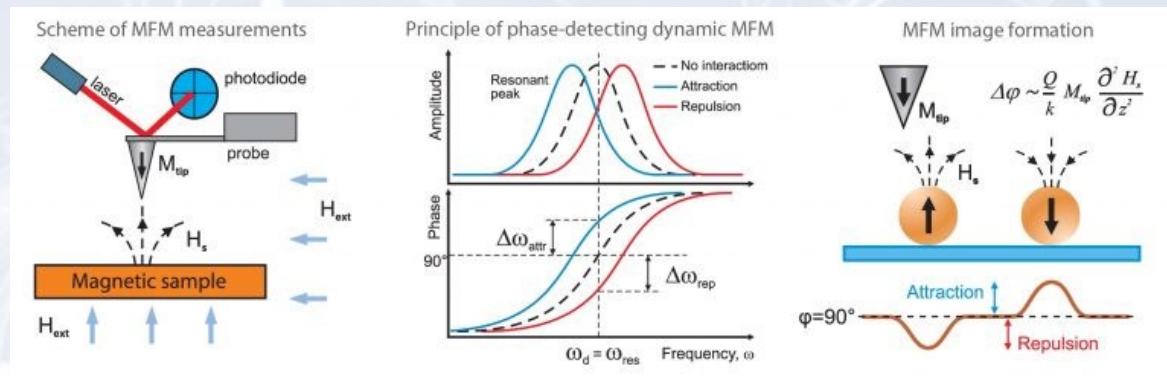
Hornig, J. H. Определение механических и фрикционных свойств углеродных композитов на разных масштабных уровнях / J. H. Hornig, И. Ю. Цуканов, Е. В. Торская, Т. А. Кузнецова, W. H. Као // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 2. – С. 139-144.



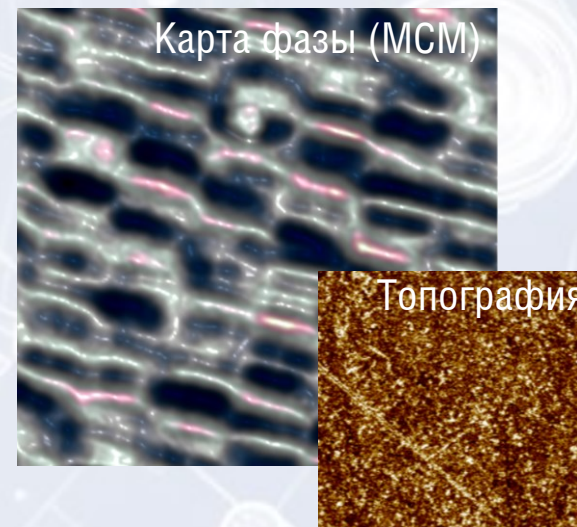
# СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ АСМ

## Магнитно-силовая микроскопия

Исследования структуры поверхности и распределение магнитных свойств на микро- и нанометровом уровне проводят в режиме MFM (magnetic force microscopy – магнитно-силовая микроскопия (МСМ)). Для исследований используются кантилеверы со специальным магнитным покрытием.



Al сплав + суспензия Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> (3 мкм<sup>2</sup>)



Жесткий диск (5 мкм<sup>2</sup>)

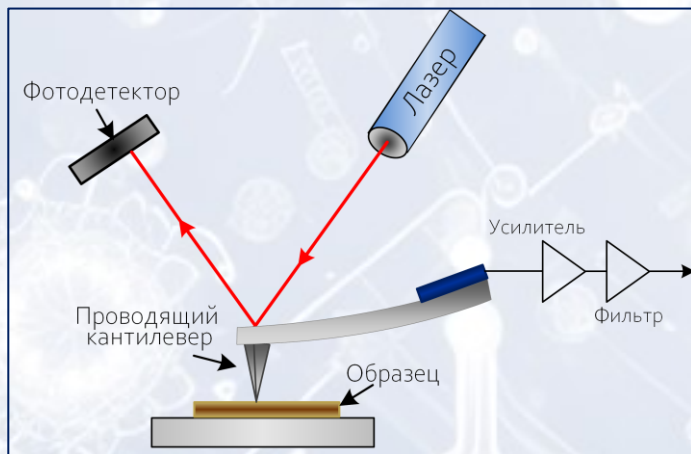
Nano-columnar, self-organised NiCrC/a-C:H thin films deposited by magnetron sputtering / Suszko T., Gulbiński W., Załęski K., Greczynski G., Morgiel J., Lapitskaya V. // Applied Surface Science. – 2022. – V. 591. – Article № 153134.



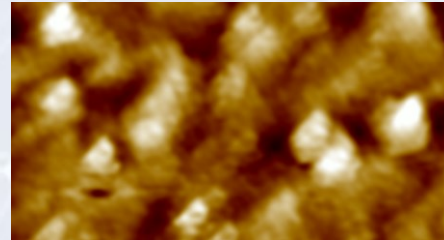
# СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ АСМ

## Электро-силовая микроскопия

Электро-силовая микроскопия (С-AFM – ЭСМ) расширяет диапазон токов зонда/образца, используемых для визуализации поверхностей, сохраняя при этом такое же высокое латеральное разрешение. С-AFM подходит для визуализации образцов, охватывающих широкий диапазон проводимости, особенно более проводящих. При сканировании в контактном режиме линейный усилитель с диапазоном от 1 пА до 1 мкА определяет ток, проходящий через образец. Поддерживая постоянную силу между наконечником и образцом, одновременно генерируются топографические и текущие изображения, что позволяет напрямую соотносить локальную топографию с электрическими свойствами.

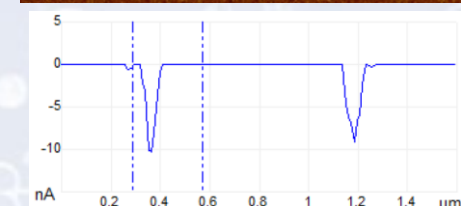
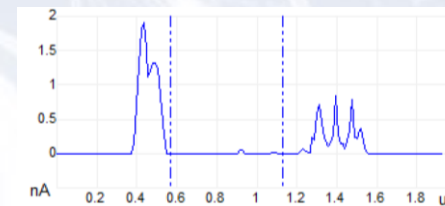
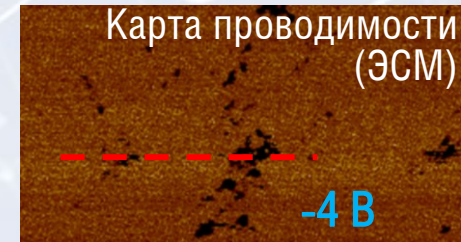
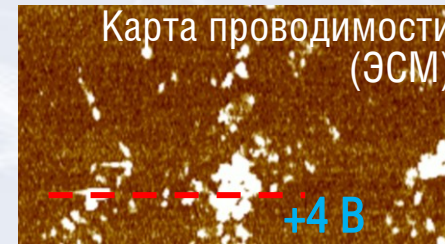


Топография



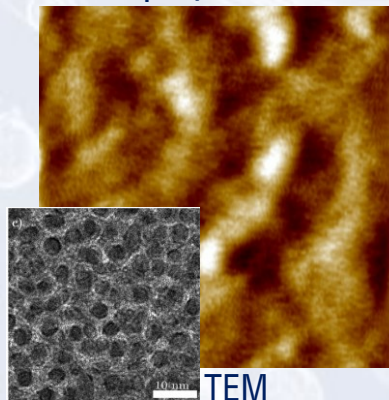
ЭСМ применяется для выявления проводящих дефектов в диэлектрических пленках.

на примере пленки NiSi толщиной 40 нм, 3 мкм<sup>2</sup>

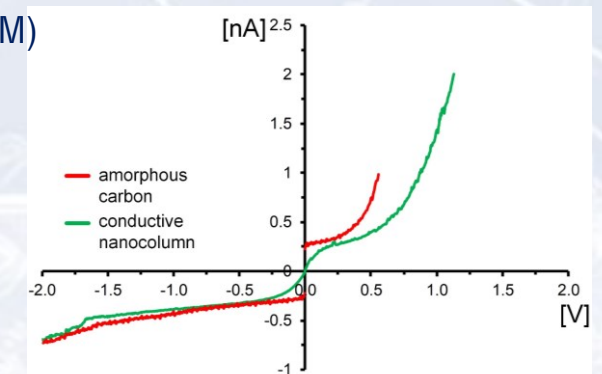
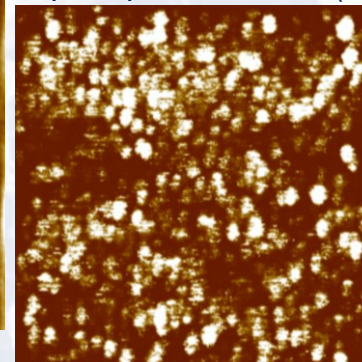


С помощью ЭСМ проводилось картирование проводимости покрытия NiCrC, состоящее из проводящих нанокolon (темные участки на ТЕМ-изображении) и оболочки из аморфного углерода. ЭСМ позволяет визуализировать данные колонны как проводящие (белые участки на карте проводимости), а также получать ВАХ в определенных местах (задается оператором).

Топография



Карта проводимости (ЭСМ)



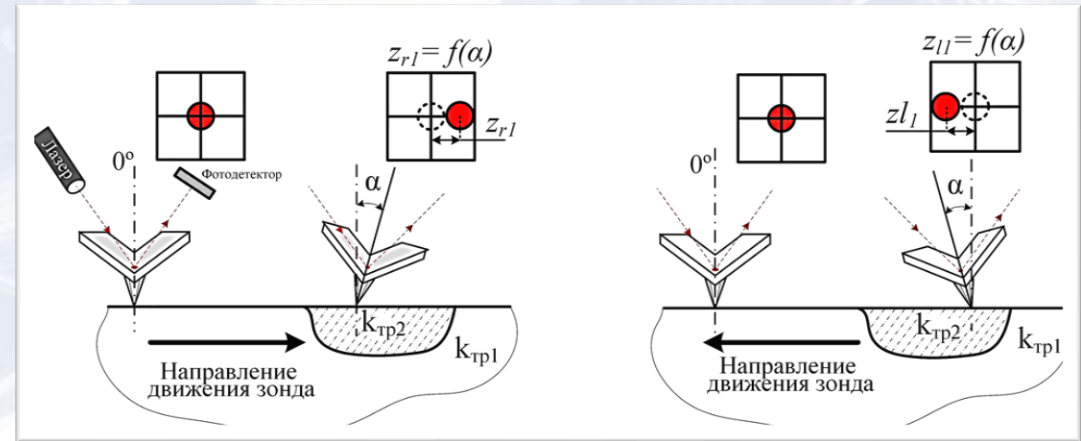
Вольт-амперные характеристики NiCrC

# СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ АСМ

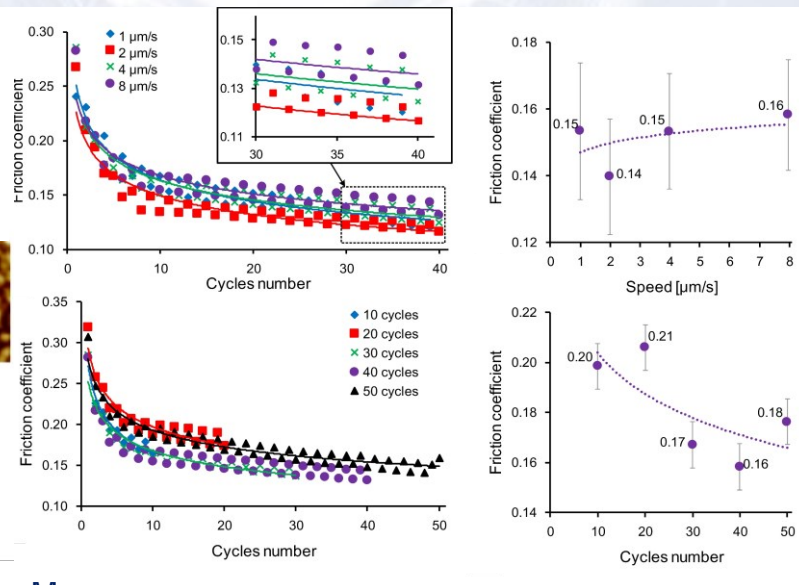
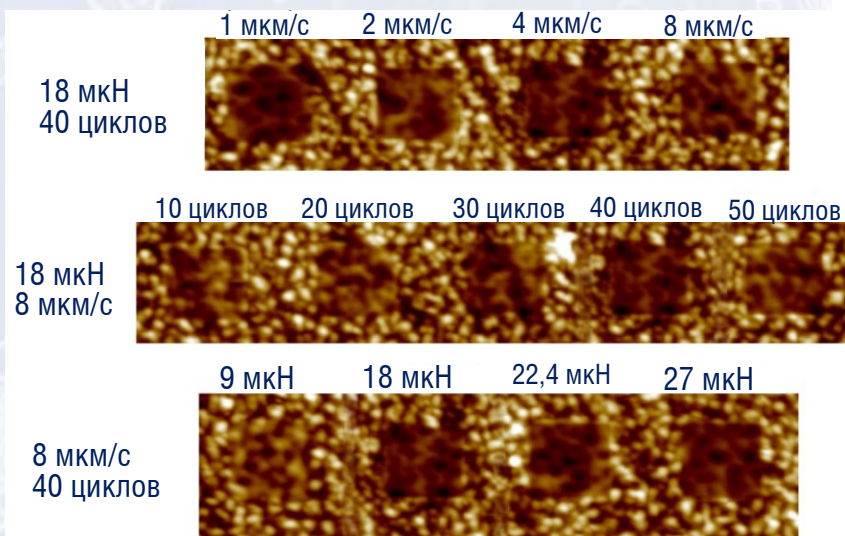
## Латерально-силовая микроскопия

Латерально-силовая микроскопия (ЛСМ) или микроскопия поперечных сил позволяет определять трибологические свойства (коэффициент и силу трения) на поверхности образцов. Кантилеверы, сканирующие в поперечном направлении (перпендикулярно их длине), подвергаются различному крутящему моменту (закручиваются) при прохождении участков с разным коэффициентом трения. Относительная мера боковых сил, возникающих вдоль поверхности, дает карту участков с высоким и низким коэффициентом трения.

Микротрибологические испытания с контролем структуры до и после испытаний, удельного объемного износа при изменении нагрузки (в нН-мкН), контактного напряжения (до ГПа), скорости (мкм в с), количества циклов.



Способ определения силы и коэффициента трения скольжения поверхности твердого образца при его взаимодействии с зондом атомно-силового микроскопа : пат. 23547 Респ. Беларусь, МПК G 01Q 60/26 / В. А. Лапицкая, Т. А. Кузнецова, С. А. Чижик, Т. И. Зубарь ; заявитель ИТМО ; заявл. 19.04.2019 ; опубл. 30.10.21 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2021.



Многоцикловое трение



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ

- Модуль упругости
- Микротвердость
- Вязкость разрушения
- Коэффициенты  $H/E$ ,  $H^3/E^2$
- Коэффициент трения и сила
- Удельный объемный износ
- Краевой угол смачивания
- Удельная поверхностная энергия

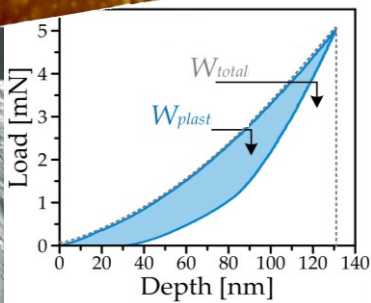
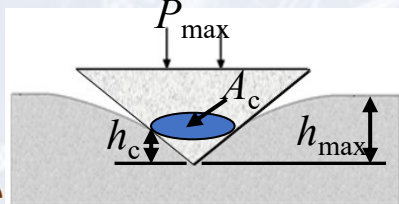
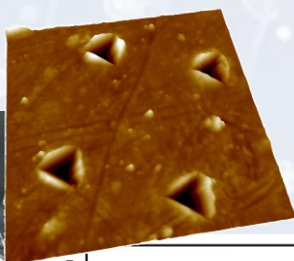
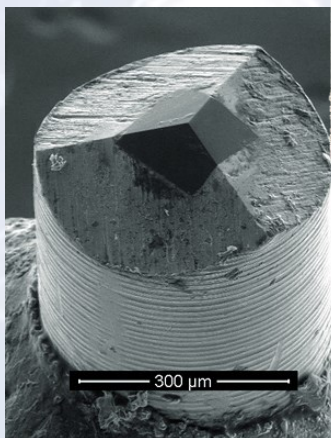


# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Исследования **механических** свойств:

- индентирование при постоянной нагрузке и определение среднего значения
- индентирование с увеличением нагрузки при частичной разгрузке
- индентирование с увеличением нагрузки при полной разгрузке

**Индентор Берковича**



Контактная площадь ( $A_c$ )

$$A_c = f(h_c)$$

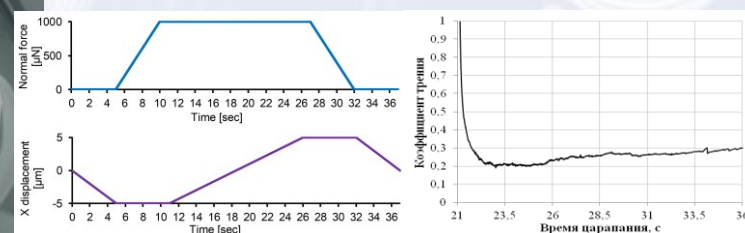
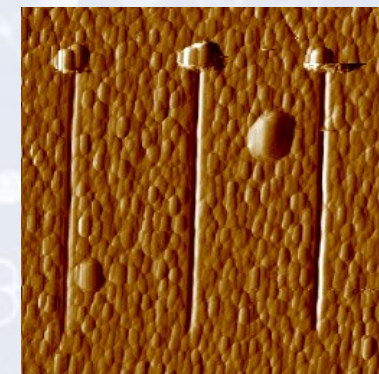
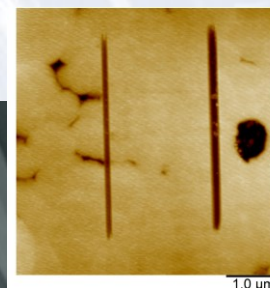
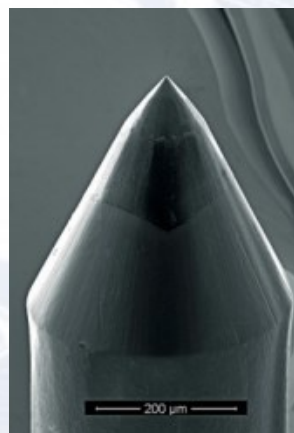
Контактная глубина ( $h_c$ )

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S}$$

Исследования **трибологических** свойств:

- при постоянной нагрузке с заданными функцией нагрузки и длинна царапин;
- с возрастающей нагрузкой с заданными функцией нагрузки и длинна царапин;
- многоцикловые испытания.

**Сферический индентор**



**Модуль упругости**

$$E_r^{-1} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s}$$

индентор      образец

← Коэффициент Пуассона  
← Модуль упругости образца

**Микротвердость**

$$H = \frac{P_{max}}{A_c}$$

## Характеристики

|   |                        |
|---|------------------------|
| Возможность сканировать поверхность перед индентированием |                        |
| Максимальная нагрузка                                     | 10 мН                  |
| Разрешение  | 1 нН                   |
| Глубина индентирования                                    | От единиц нм до 200 нм |
| Разрешение смещения                                       | 0,04 нм                |
| Радиус острия индентора                                   | Берковича - 60 нм      |
|   | Сферического - 226 нм  |

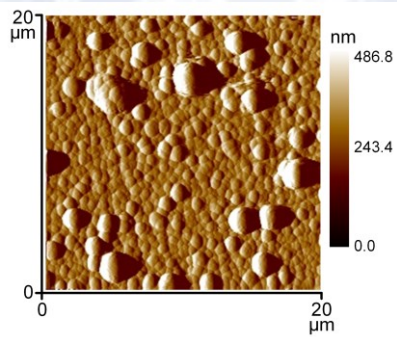
Определение микротвердости и модуля упругости методом Оливера-Фарра

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

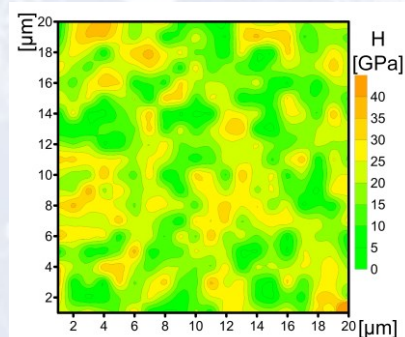
- Определение физико-механических свойств методом наноиндентирования по глубине, на поперечном срезе, а также получать зависимости от различных параметров.
- Получение карт распределения физико-механических свойств поверхности методом наноиндентирования различных композиционных материалов и покрытий
- Определение трибологических свойств методом наноскретч-тестирования (наноцарапание) – многоцикловые испытания, с постоянной и возрастающей нагрузкой, получать зависимости от различных параметров.

## Карты

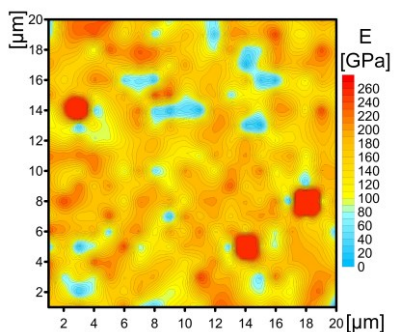
### Топография



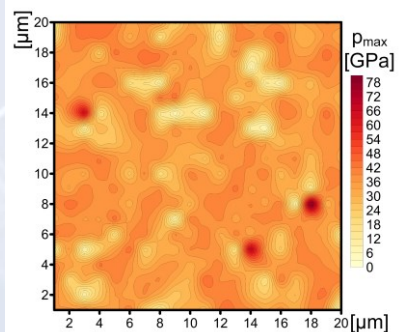
### Микротвердость



### Модуль упругости



### Контактные напряжения



Features of wear of DLC-Si coating under microcontact conditions during the formation of secondary structures / Kuznetsova, T., Lapitskaya, V., Khabarava, A., Trukhan, R., Chizhik, S., Torskaya, E., Fyodorov, S., Aizikovich, S., Sadyrin, E., Warcholinski B. // Composite Structures. – 2023. – Vol. 316. – Article № 117039.



Lapitskaya V, Nikolaev A, Khabarava A, Sadyrin E, Antipov P, Abdulvakhidov K, Aizikovich S, Chizhik S. The Influence of Nitrogen Flow on the Stoichiometric Composition, Structure, Mechanical, and Microtribological Properties of TiN Coatings. Materials. 2024; 17(1):120.

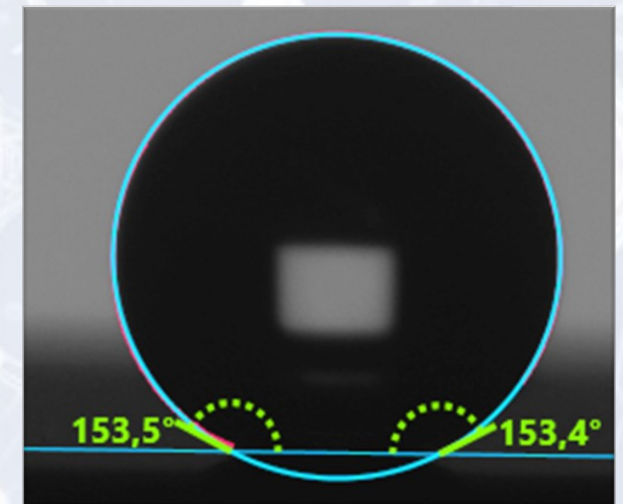


# АНАЛИЗ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ



- Метод лежащей капли
- Определение угла натекания-оттекания (динамического угла смачивания)
- Метод висящей капли
- Система микродозирования

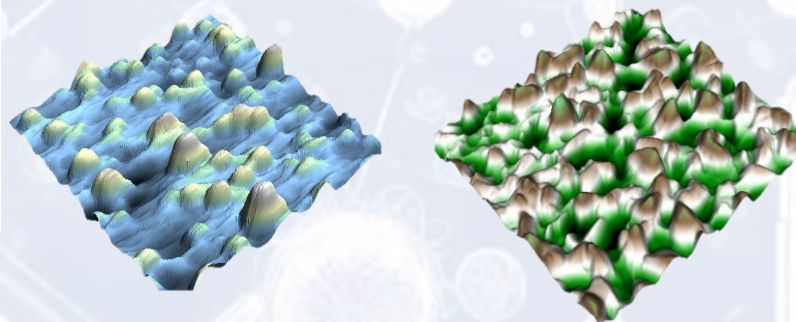
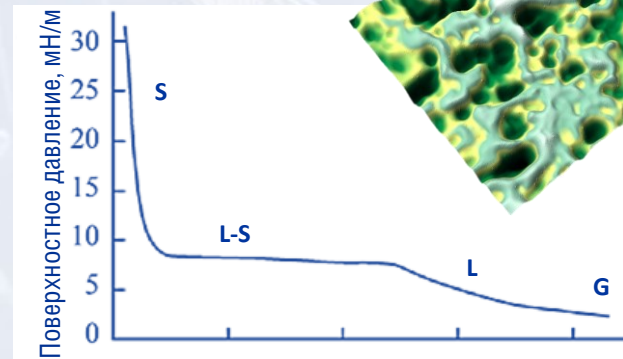
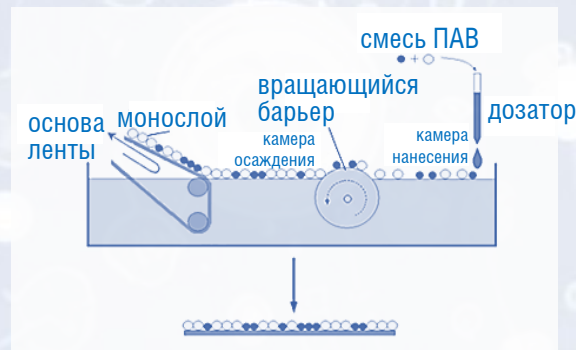
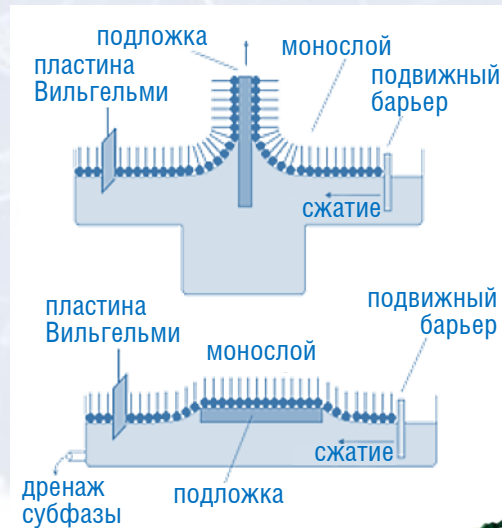
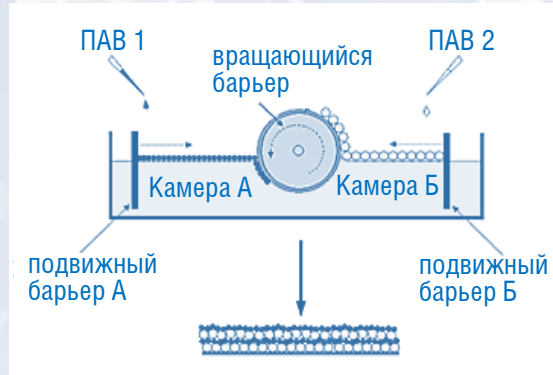
- Модуль контактного угла для определения статических и динамических углов смачивания с точностью  $\pm 0,1^\circ$
- Контролируемое дозирование не менее чем 5 жидкостей, скорость дозирования от 10 до 1400 мкл/мин с шагом дозирования 0,1 мкл
- Контролируемое раскапывание жидкости по поверхности
- Система микродозирования от 20 до 60 пкл
- Система термостатирования образца (рабочая температура от  $-30$  до  $160$  °C)
- Модуль поверхностного и межфазного натяжения
- Расчет свободной поверхностной свободной энергии от 0,01 до 1000 мН/м с точностью  $\pm 0,01$  мН/м





**МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ  
МЕТОДОМ ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ**

# ТЕХНОЛОГИЯ ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ



- горизонтальные и вертикальные модули
- дисковый и цилиндрический модули
- модуль послойного осаждения вещества на поверхность мембран из раствора с возможностью обработки и промывки гибких ленточных мембран в растворах
- лентопротяжный механизм
- автоматический подвод жидкости

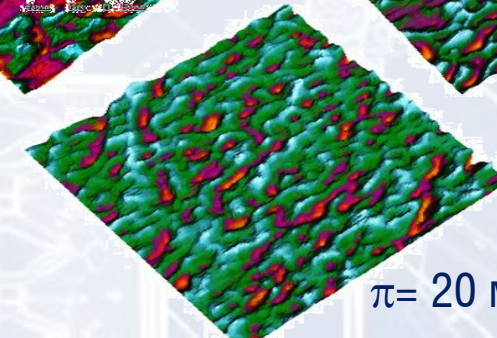
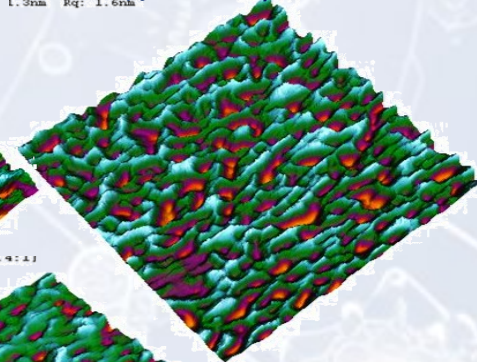
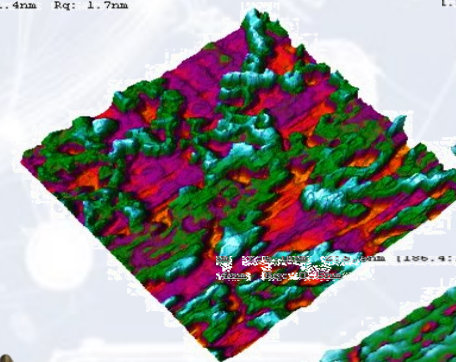
## Контроль структуры и свойств Поливинилпиридин

$\pi=4$  мН/м

1.4nm Rq: 1.7nm

$\pi=7$  мН/м

1.3nm Rq: 1.6nm



$\pi=20$  мН/м



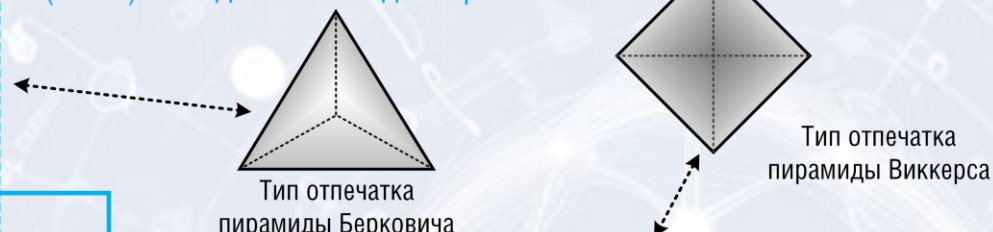
**РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ И МЕТОДИК  
С ПРИМЕНЕНИЕМ АСМ И НИ**

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ

Способ определения вязкости разрушения твердого материала : патент № 24335, Респ. Беларусь, МПК G 01N 3/00, G 01N 3/42, G 01N 3/44, G 01Q 60/24 / В. А. Лапицкая, Т. А. Кузнецова, С. А. Чижик; заявитель ИТМО; заявл. 09.07.21. Опублик. 20.07.2024 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2024.



← Определение микромеханических свойств (E и H) методом наноиндентирования



Определение вязкости разрушения  $K_{IC}$  методом индентирования

Определение  $K_{IC}$

Значения H и E методом наноиндентирования

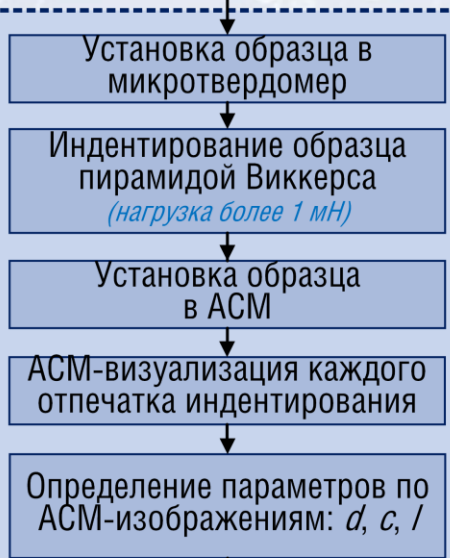
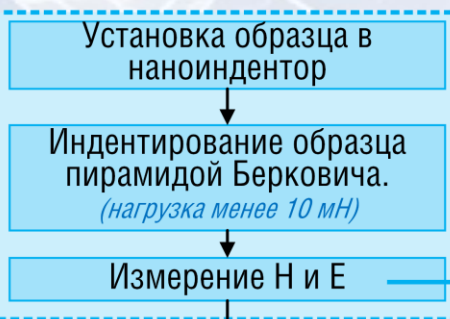
$$K_{IC} = 0,048 \cdot \left(\frac{l}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{H}{E\Phi}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot \left(\frac{Ha^2}{\Phi}\right)$$

$cla \leq 2.5$   
 (образование трещин Палмквиста)

$$K_{IC} = 0,129 \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{H}{E\Phi}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot \left(\frac{Ha^2}{\Phi}\right)$$

$cla > 2.5$   
 (образование медианных трещин)

Определение c/a



Lapitskaya, V.A. et al. The use of AFM in assessing the crack resistance of silicon wafers of various orientations / Engineering Fracture Mechanics. – 2022. – Vol. 259. – P. 107926.



Lapitskaya, V.A. et al. Influence of polishing technique on crack resistance of quartz plates / International Journal of Fracture. – 2021. – Vol. 231(1). – P. 61–77.



Lapitskaya, V. A. et al. Methods for accuracy increasing of determining the fracture toughness of solid brittle materials // Приборы и методы измерений. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 40–49.

# НАПРАВЛЕНИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА

Лаборатория нанопроцессов и технологий предлагает:

- исследование и анализ структуры и свойств наноструктурных материалов, покрытий, МЭМС, композитов и других материалов методами оптической, атомно-силовой микроскопии, наноиндентирования;
- контроль топологии, микро- и наногеометрических параметров, дефектности и шероховатости различных материалов и покрытий, МЭМС с применением специализированных методик;
- определение физико-механических, трибологических, износостойких, электро-магнитных свойств с применением высокоточных зондовых методов,
- модификацию поверхности материалов методом Ленгмюра-Блоджетт и другое

в рамках совместных научно-исследовательских и научно-технических проектов (ГПНИ, БРФФИ, ГНТП и др.) и прямых хозяйственных договоров.



Контакты:

**Лапицкая Василина Александровна,**

к.т.н., доцент, заместитель заведующего, лаборатория нанопроцессов и технол  
Институт тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, РБ

E-mail: [lapitskayava@hmti.ac.by](mailto:lapitskayava@hmti.ac.by)

[vasilinka.92@mail.ru](mailto:vasilinka.92@mail.ru)

тел.гор.: +375 (17) 356-10-60: тел.моб.: +375 (29) 837-01-63

