



Получено: 19.02.2024 г. | Принято: 26.02.2024 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.2.90.97>

Научная статья

НАБЛЮДЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОРФОЛОГИИ ПЛЕНОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕТАЛЛОВ В СКАНИРУЮЩЕМ ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ ПРИ ПРОГРЕВЕ В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО КОСМОСА

Б.А. Логинов^{1, 2}, ORCID: 0000-0001-5081-1424 / b-loginov@mail.ru

Ю.В. Хрипунов^{2, 3}, ORCID: 0000-0003-2250-0420

М.А. Щербина^{2, 3}, ORCID: 0009-0001-8873-4986

А.О. Вьюник², ORCID: 0009-0000-8743-9013

В.Д. Дмитриева², ORCID: 0009-0009-8784-4815

А.А. Дьякова², ORCID: 0009-0009-8289-1065

М.К. Лебедева², ORCID: 0009-0001-9070-3505

В.С. Макеев², ORCID: 0009-0009-3503-0078

А.Р. Первых², ORCID: 0009-0008-8348-3111

Д.С. Шевченко², ORCID: 0009-0009-8866-0268

С.Д. Ханин⁴, ORCID: 0000-0002-8316-0362

Аннотация. Наблюдены закономерности изменения морфологии поверхности покрытий из высокотемпературных металлов, которые в качестве защитных покрытий могут наноситься на конструкции космических аппаратов, посылаемых ближе к Солнцу. Показано, что пленки при этом становятся менее рыхлыми, а мелкие зерна этих пленок увеличиваются по размеру, как бы растекаясь по поверхности и перестраиваясь в более крупные образования.

Ключевые слова: термоэмиссионное напыление, сканирующая зондовая микроскопия, морфология поверхности

Для цитирования: Б.А. Логинов, Ю.В. Хрипунов, М.А. Щербина, А.О. Вьюник, В.Д. Дмитриева, А.А. Дьякова, М.К. Лебедева, В.С. Макеев, А.Р. Первых, Д.С. Шевченко, С.Д. Ханин. Наблюдение изменения морфологии пленок высокотемпературных металлов в сканирующем зондовом микроскопе при прогреве в условиях открытого космоса. НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17. № 2. С. 90–97. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.2.90.97>

¹ Национальный исследовательский университет МИЭТ, Зеленоград, Россия / National Research University of Electronic Technology MIET, Zelenograd, Russia

² Образовательный центр "Сириус", федеральная территория "Сириус", Россия / Educational Centre "Sirius", Sirius Federal Territory, Russia

³ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия / Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

⁴ Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия / Military Order of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny of the Ministry of Defence of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia



Received: 19.02.2024 | Accepted: 26.02.2024 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.2.90.97>

Original paper

OBSERVATION OF CHANGES IN MORPHOLOGY OF HIGH-TEMPERATURE METAL FILMS IN A SCANNING PROBE MICROSCOPE DURING WARMING UP IN OPEN SPACE CONDITIONS

B.A. Loginov^{1, 2}, ORCID: 0000-0001-5081-1424 / b-loginov@mail.ru

Y.V. Khripunov^{2, 3}, ORCID: 0000-0003-2250-0420

M.A. Shcherbina^{2, 3}, ORCID: 0009-0001-8873-4986

A.O. Vyunik², ORCID: 0009-0000-8743-9013

V.D. Dmitrieva², ORCID: 0009-0009-8784-4815

A.A. Dyakova², ORCID: 0009-0009-8289-1065

M.K. Lebedeva², ORCID: 0009-0001-9070-3505

V.S. Makeev², ORCID: 0009-0009-3503-0078

A.R. Pervykh², ORCID: 0009-0008-8348-3111

D.S. Shevchenko², ORCID: 0009-0009-8866-0268

S.D. Khanin⁴, ORCID: 0000-0002-8316-0362

Abstract. Regularities of changes in the surface morphology of high-temperature metal coatings used as protective coatings can be applied to the structures of spacecraft sent closer to the Sun, have been observed. It is shown that films become less friable, and small grains of these films increase in size, as if spreading on the surface and rearranging into larger formations.

Keywords: thermal emission sputtering, scanning tunnel microscopy, surface morphology

For citation: B.A. Loginov, Y.V. Khripunov, M.A. Shcherbina, A.O. Vyunik, V.D. Dmitrieva, A.A. Dyakova, M.K. Lebedeva, V.S. Makeev, A.R. Pervykh, D.S. Shevchenko, S.D. Khanin. Observation of changes in the morphology of high-temperature metal films in a scanning probe microscope during warming up in open space conditions. NANOINDUSTRY. 2024. Vol. 17. No. 2. PP. 90–97. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.2.90.97>

ВВЕДЕНИЕ

Перспективы освоения космоса рассматривают в том числе и такие миссии, в которых космические аппараты могут испытывать существенный нагрев. Температура является многолетним препятствием для полетов на Венеру, средняя температура поверхности превышает 400 °С. С проблемами деградации поверхности материалов, к примеру, от сильного нагрева светом сталкивается также идея раскрывающего вблизи Солнца паруса для получения огромной тяги в виде давления на парус солнечного света и возможности межзвездных полетов из-за этого. Возможность получения различных защитных покрытий, в том числе методами CVD и PVD, активно развиваются на Земле. Но сейчас, в связи с успешной реализацией новой

возможности запуска в космос сканирующего зондового микроскопа [1], который может прямо в полете следить за состоянием поверхности элементов конструкции космического аппарата с нанометровым разрешением, встал вопрос о предварительных экспериментах на Земле, в которых эмулируются воздействия на поверхность защитных покрытий открытого космоса и используются сканирующие зондовые микроскопы для исследования деградации этих поверхностей.

25 июля 2023 года в спутнике Земли "Нанозонд-1" в космос был запущен первый в мире спутниковый сканирующий зондовый микроскоп (марка СММ-2000С) [2], который начал передавать на Землю кадры [3]. Начато строительство новых аналогичных



космических аппаратов для разных задач в космосе. В одном из следующих этих космических аппаратов, кроме контроля поверхностей сканирующим зондовым микроскопом, предусматривается наличие системы дополнительного напыления высокотемпературных металлов на защищаемые от воздействия излучения или температуры поверхности, по мере необходимости, прямо в полете. При этом стойкость самого сканирующего зондового микроскопа к температурам может быть довольно высокой, такие микроскопы работоспособны и выживают даже в горячих камерах атомных реакторов и в условиях солнечных температур в камере термоядерного реактора ТОКАМАК [4]. Напыление и изучение стойкости к температуре металлов в камерах на Земле в вакууме, аналогичном космическому, представляет собой цель данной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выбор рассматриваемых для напыления металлов был предложен Военной орденов Жукова и Ленина Краснознаменной академией связи имени Маршала Советского Союза С.М.Буденного Министерства обороны Российской Федерации. К экспериментам были предложены ванадий, вольфрам, гафний, молибден, ниобий и цирконий. В условиях малого объема в спутнике крайне затруднено использование плазменных, в том числе магнетронных, способов распыления ввиду необходимости размещать для их работы баллон с газом, чаще всего аргоном, а также клапаны подачи газа с блоками управления ими. Выбранные же высокотемпературные материалы могут распыляться простым и компактным в реализации методом термоэлектрического распыления, где требуемый к распылению металл формуется в виде тонкой проволоки, по которой по команде процессора космического аппарата пропускается электрический ток, из-за чего проволока раскаляется и с ее поверхности испаряются атомы металла, образуя пленку при осаждении на поверхностях, вдоль которых перемещается распыляемая проволока.

В проработке этого решения приняла участие также и команда из семи участников научно-технологической проектной образовательной программы "Большие вызовы", проводимой 1-24 июля 2023 года в образовательном центре "Сириус". В качестве вакуумной системы была применена "Вакуумно-плазменная установка МАГ-5" (изготовитель – Завод ПРОТОН,

Москва, Зеленоград), в которой могут реализовываться процессы [5, 6] физического (PVD) и даже химического (CVD) осаждения [7, 8]. Испытания по напылению дублировались также на более компактной, настольной версии этой установки – "Вакуумной установке МАГ-5А" (изготовитель – Завод ПРОТОН, Москва, Зеленоград). Все эксперименты проводились при давлении 10^{-3} мбар, что соответствует условиям открытого космоса на высоте чуть ниже линии Кармана, расположенной на высоте примерно 100 км над уровнем моря Земли между космосом и атмосферой. Это давление было выбрано для экспериментов как наиболее жесткое условие эксперимента из-за наличия примесей в виде остаточной атмосферы.

В качестве подложки для экспериментов по напылению металлов были применены полированные пластинки из стеклокерамического материала для СВЧ-приборов, ситалла марки СТ32-1 ТУ № ТХ7.817.000, состоящего в основном из смесей оксидов кремния и алюминия, с очень малой шероховатостью поверхности Ra на уровне 2 нм, которые применялись и описаны в работе [9], что необходимо для того, чтобы не учитывать влияние подложки при рассмотрении шероховатости поверхности последующих покрытий этих подложек.

Для исследований микрорельефа использовался серийно выпускаемый "Микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000" (изготовитель – Завод ПРОТОН, Зеленоград, Россия, www.microscopy.ru, номер 46918 в Государственном реестре средств измерений Российской Федерации, www.z-proton.ru), у которого есть версия для использования в космосе. Получение топографии поверхности в нем выполнялось в режиме атомно-силовой микроскопии с применением зондов – кантилеверов марки MSCT (Bruker, США) с рекордно малым радиусом закругления острия в 2 нм, что дает возможность микроскопу работать с латеральным разрешением на уровне 1 нм. Средняя шероховатость Ra (среднее отклонение высот рельефа от среднего уровня) и средний размер зерна S (среднее расстояние между выступами) автоматически рассчитывалось программой микроскопа СММ-2000 в соответствии с отечественным ГОСТ 25142 и международным ISO 4287 стандартами.

Напыление производилось с постепенным увеличением силы пропускаемого тока до достижения нагреваемой спирали [10] свечения красным цветом, аналогично методу

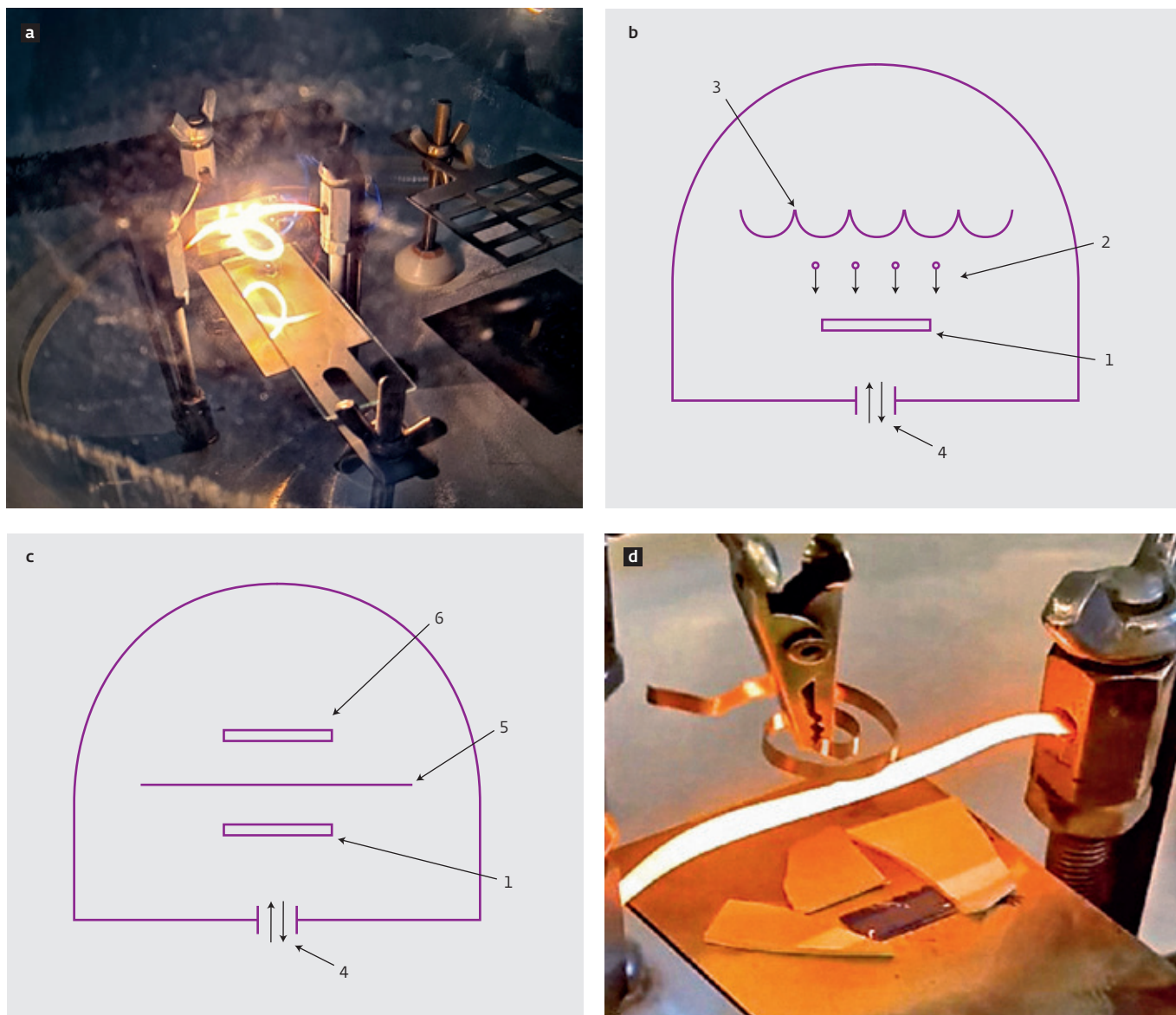


Рис.1. Схемы и фотографии процессов напыления и прогрева на "Вакуумно-плазменной установке МАГ-5": а – фотография процесса напыления; б – схема процесса напыления; в – схема процесса прогрева; д – фотография процесса прогрева; где: 1 – подложка, 2 – летящие атомы металла, 3 – нагревающаяся током спираль из распыляемого металла, 4 – откачка и напуск атмосферы, 5 – нагреваемая током танталовая полоска, 6 – термометр в виде спирали из биметаллической ленты
 Fig.1. Diagrams and photos of sputtering and heating processes on the "MAG-5 vacuum-plasma unit": а – photo of sputtering process, б – photo of sputtering process, в – photo of heating process, д – photo of heating process; where: 1 – substrate, 2 – flying metal atoms, 3 – current-heated spiral from atomised metal, 4 – pumping and atmospheric inlet, 5 – current-heated tantalum strip, 6 – thermometer in the form of a spiral from bimetallic tape

химического осаждения из газовой фазы [11, 12], при этом, как и в работе [9], напыление останавливается при достижении напыляемой пленкой электропроводности со значением электрического сопротивления в 100 кОм.

После извлечения подложки с напыленной пленкой и снятия кадров ее поверхности в сканирующем зондовом микроскопе

подложка снова помещалась в вакуумную камеру для прогрева. Прогрев производился тепловым излучением от раскаляемой током полоски из молибдена в течение 20 с с температурой разогрева подложки около 400 °С, измеряемой расположенным на том же расстоянии от молибденовой полоски откалиброванным вакуумным термометром в виде спирали



Рис.2. Работа на "Вакуумной установке МАГ-5А": а – в процессе напыления; б – коллективная фотография всех работавших на установке, слева направо: Щербина Максим, г. Орел; Шевченко Дарья, г. Череповец; Дмитриева Виктория, г. Орел; Дьякова Анна, г. Междуреченск (Кузбасс); Макеев Всеволод, г. Орел; Первых Антон, г. Орел; Хрипунов Юрий, г. Орел; Логинов Борис, Зеленоград, Москва; Вьюник Алексей, г. Волгоград; Лебедева Мария, г. Бийск (Алтайский край)

Fig.2. Operation of the "MAG-5A vacuum unit": a – in the process of sputtering; b – collective photo of all those who worked on the unit, from left to right: Maxim Shcherbina, Orel; Daria Shevchenko, Cherepovets; Victoria Dmitrieva, Orel; Anna Dyakova, Mezhdurechensk (Kuzbass); Vsevolod Makeev, Orel; Anton Pervykh, Orel; Yuri Khripunov, Orel; Boris Loginov, Zelenograd, Moscow; Alexei Vyunik, Volgograd; Maria Lebedeva, Biysk (Altai Territory)

из биметаллической ленты. Схемы и фотографии процессов напыления металлов и прогрева подложек с напыленными пленками этих металлов представлены на рис.1. Процесс работы на вакуумной установке и фотография всех работавших на ней соавторов представлены на рис.2.

После прогрева подложка вынималась из вакуумной камеры и сразу же, в течение около 15 мин, подвергалась повторному сканированию в сканирующем зондовом микроскопе с нанометровой точностью на микроскопе СММ-2000, с вычислением параметра средней шероховатости R_a и среднего размера зерна S . Характерные для пленки каждого металла кадры поверхности до и после нагрева показаны на рис.3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результатом проведенных экспериментальных исследований является визуализация общей картины изменения структуры металлических пленок при прогреве. При этом пленки становятся менее рыхлыми, а мелкие зерна этих пленок увеличиваются по размеру, как бы растекаясь по поверхности и перестраиваясь в более крупные образования. Параметры

рельефа поверхности пленок до и после прогрева приведены в табл.1.

В качестве перспектив развития данных исследований подготавливаются исследования в более чистой среде сверхвысокого вакуума с давлениями порядка 10^{-9} ... 10^{-11} мбар, со встроенным в вакуумную камеру напыления и прогрева сверхвысоковакуумным зондовым микроскопом атомарного разрешения, например, отечественного производства [4]. Сверхвысоковакуумные исследования более точны, и, кроме того, соответствуют более дальнему космосу, также представляющему интерес для данных работ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа выполнена благодаря вкладом нескольких организаций. На Научно-технологической проектной образовательной программе "Большие вызовы" в Образовательном центре "Сириус" по направлению "Нанотехнологии" в 2021-м году с привлечением команд одаренных школьников была начата разработка прототипа первого в мире зондового микроскопа – спутника Земли (рис.4а), в 2022-м году были разработаны системы связи с ним (рис.4б), а в 2023-м году

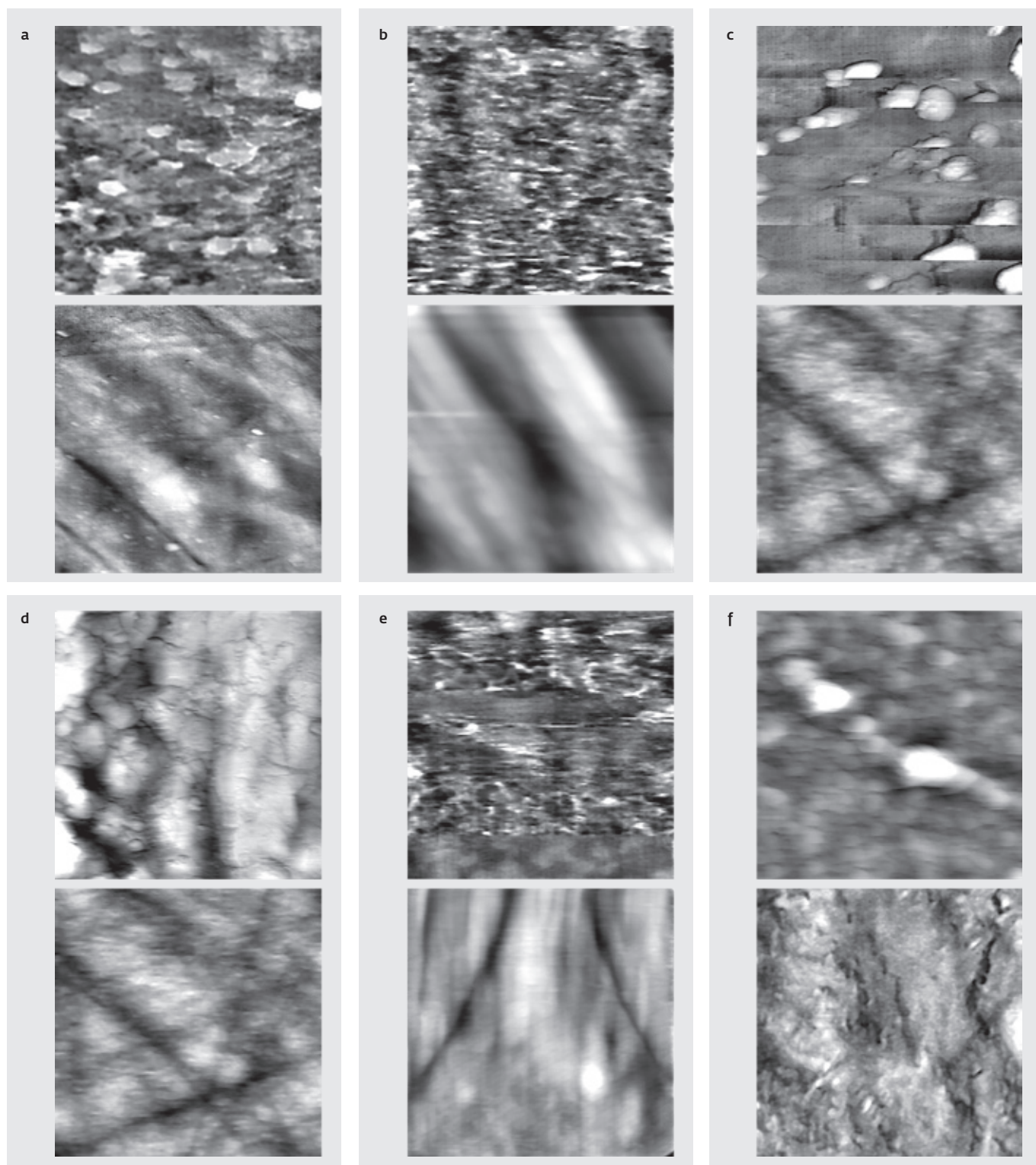


Рис.3. Характерные кадры размером 4×4 мкм морфологии поверхности напыленных (вверху) и далее прогретых (внизу) пленок разных высокотемпературных металлов (в скобках атомный номер / температура плавления в градусах Цельсия): а – ванадий (51/1910); б – вольфрам (184/3422); с – гафний (178/2227); д – молибден (96/2623); е – ниобий (93/2477); ф – цирконий (91/1855)

Fig.3. Characteristic 4×4 μm frames of surface morphology of sputtered (top) and further heated (bottom) films of different high-temperature metals (atomic number / melting point in degrees Celsius in brackets): а – vanadium (51/1910); б – tungsten (184/3422); с – hafnium (178/2227); д – molybdenum (96/2623); е – niobium (93/2477); ф – zirconium (91/1855)



Таблица 1. Сводная таблица сравнительных параметров пленок до и после нагрева

Table 1. Summary table of comparative parameters of films before and after heating

№	Материал Material	Средняя шероховатость Ra, нм, до прогрева Average roughness Ra, nm, before heating	Средняя шероховатость Ra, нм, после прогрева Average roughness Ra, nm, after heating	Средний размер зерна S, нм, до прогрева Average grain size S, nm, before heating	Средний размер зерна S, нм, после прогрева Average grain size S, nm, after heating
а	Ванадий, V	7,7	5,8	179	596
б	Вольфрам, W	5,8	4,2	154	1356
в	Гафний, Hf	14,4	5,6	489	1195
г	Молибден, Mo	6,4	4,2	282	1020
д	Ниобий, Nb	6,1	3,5	157	959
е	Цирконий, Zr	4,4	3,7	236	536

были начаты изложенные в настоящей публикации работы по дальнейшему развитию конструкции этого космического микроскопа.

Запуск этого микроскопа в спутнике Земли "Нанозонд-1" (бортовой номер SXC3-2218, дата запуска 27 июня 2023 года)

осуществлен Орловским государственным университетом имени И.С.Тургенева, при этом платформа этого спутника была изготовлена в ООО "Спутникс", Москва, Технопарк "Сколково". Авторы благодарят АО "Завод ПРОТОН" за идею создания



Рис.4. Команды школьников в Образовательном центре "Сириус" в проекте первого в мире зондового микроскопа-спутника Земли: а – команда 2021 года, слева направо: Лопатин Андрей, г. Бийск, Алтайский край; Беспалова Елизавета, г. Липецк; Ванькаев Александр, г. Астрахань; Ключина Екатерина, г. Астрахань; Сапрыкин Михаил, г. Новосибирск; Метальников Никита, г. Орел; б – команда 2022 года, слева направо: Ляшко Екатерина, г. Гатчина; Кириллова Варвара, Москва; Первых Антон, г. Орел; Макеев Всеволод, г. Орел; Второва Владислава, г. Астрахань; Блинныек Данил, г. Орел

Fig.4. Teams of schoolchildren at the Sirius Educational Centre in the project of the world's first Earth probe microscope-satellite: а – the 2021 team, from left to right: Andrey Lopatin, Biysk, Altai Territory; Elizaveta Bespalova, Lipetsk; Alexander Vankaev, Astrakhan; Ekaterina Klyukina, Astrakhan; Mikhail Saprykin, Novosibirsk; Nikita Metalnikov, Orel; б – the 2022 team, left to right: Ekaterina Lyashko, Gatchina; Varvara Kirillova, Moscow; Anton Pervykh, Orel; Vsevolod Makeev, Orel; Vladislav Vtorova, Astrakhan; Danil Blinnikov, Orel



первого в мире зондового микроскопа – спутника Земли, за материальное обеспечение работ в Образовательном центре "Сириус" в 2021–2023 годах, за безвозмездное изготовление зондового микроскопа – спутника Земли; благодарят за научно-методическое сопровождение работ Военную орден Жукова и Ленина Краснознаменную академию связи имени Маршала Советского Союза С.М.Буденного Министерства обороны Российской Федерации и благодарят Фонд содействия инновациям (Москва), при финансовой поддержке которого по программе "Дежурный по планете" был осуществлен запуск первого, и готовится осуществление Национальным исследовательским университетом МИЭТ запуск второго, более совершенного, космического зондового микроскопа.

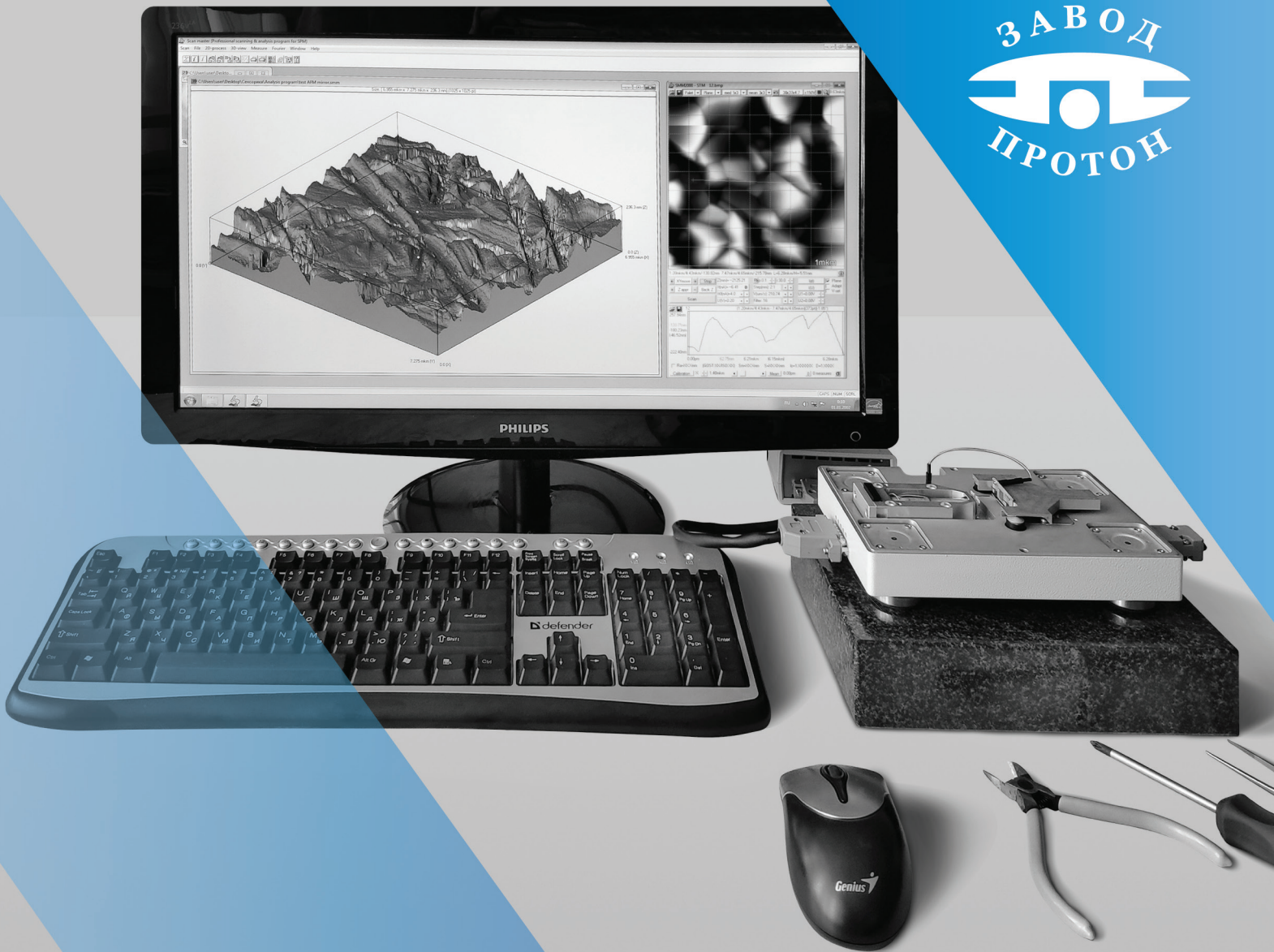
ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

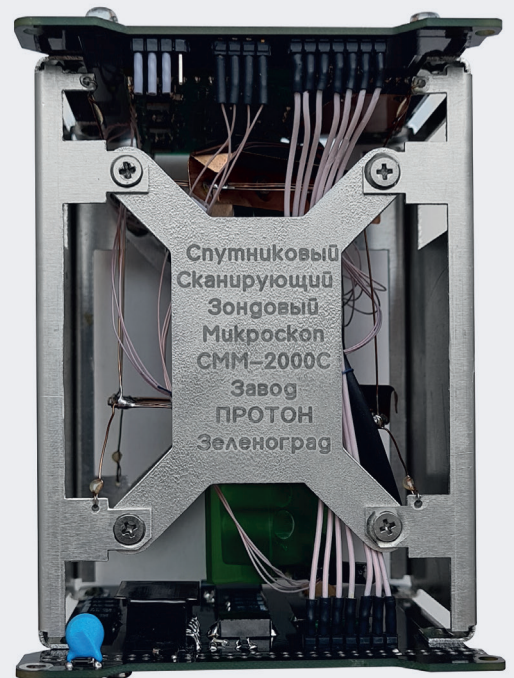
1. **Логинов Б.А.** Первый в мире сканирующий зондовый микроскоп в виде спутника как старт этапа научных спутников-лабораторий. *НАНОИНДУСТРИЯ*, 2021. Т. 14. № 5. С. 22–26. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.5.270.274>
2. **Логинов Б.А.** Комплекс зондовой микроскопии для работы в космическом пространстве и атмосфере. Патент на изобретение 2778278 С1, 17.08.2022, Заявка № 2021128836 от 04.10.2021.
3. Электронный источник: Получены снимки с первого в мире спутникового сканирующего зондового микроскопа (дата обращения: 20.09.2023), ссылка: <https://nauka.tass.ru/nauka/18422659>
4. **Логинов Б.А., Логинов П.Б., Логинов В.Б., Логинов А.Б.** Зондовая микроскопия: применения и рекомендации по разработке. *НАНОИНДУСТРИЯ*, 2019. Т. 12. № 6, С. 352–365. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2019.12.6.366.369>
5. **Loginov A.B., Ismagilov R.R., Obraztsov A.N., Bozhev I.V., Bokova-Sirosh S.N., Obraztsova E.D., Loginov B.A.** Few-layer graphene formation by carbon deposition on polycrystalline Ni surface. *Applied Surface Science*, 2019. Vol. 494. PP. 1030–1035.
6. **Логинов А.Б., Божьев И.В., Бокова-Сирош С.Н., Образцова Е.Д., Исмагилов Р.Р., Логинов Б.А., Образцов А.Н.** Формирование графена на поликристаллическом никеле. *Журнал технической физики*. 2019. Т. 89. № 11. PP. 1756–1762.
7. **Komarov N.S., Shevlyuga V.M., Loginov B.A., Andryushechkin B.V.** Chlorine Adsorption on the Ag(110) Surface: STM and DFT Study". *J. Phys. Chem. C*. 2023. No. 127. PP. 2266–2273.
8. **Loginov A.B., Ismagilov R.R., Bokova-Sirosh S.N., Bozhev I.V., Obraztsova E.D., Loginov B.A., Obraztsov A.N.** Formation of nanostructured films based on MoS₂, WS₂, MoO₂ and their heterostructures. *Technical Physics*. Vol. 92. No. 13. P. 2078.
9. **Логинов Б.А., Хрипунов Ю.В., Щербина М.А., Вьюник А.О., Дмитриева В.Д., Дьякова А.А., Лебедева М.К., Макеев В.С., Первых А.Р., Шевченко Д.С., Ханин С.Д.** Исследование способа термоэмиссионного распыления для создания тонкопленочных покрытий из металлов для работы сканирующего туннельного микроскопа в открытом космосе. *НАНОИНДУСТРИЯ*. 2024. Т. 17. № 1. С. 8–17. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.1.8.17>
10. **Логинов А.Б., Исмагилов Р.Р., Бокова-Сирош С.Н., Божьев И.В., Образцова Е.Д., Логинов Б.А., Образцов А.Н.** Формирование наноструктурированных пленок MoS₂, WS₂, MoO₂ и гетероструктур на их основе. *Журнал технической физики*. 2021. Vol. 91. No. 10. PP. 1509–1516.
11. **Loginov A.B., Fedotov P.V., Bokova-Sirosh S.N., Sapkov I.V., Chmelenin D.N., Ismagilov R.R., Obraztsova E.D., Loginov B.A., Obraztsov A.N.** Synthesis, Structural, and Photoluminescence Properties of MoS₂ Nanowall Films. *Physica Status Solidi (B): Basic Research*, John Wiley & Sons Ltd. (United Kingdom). 2022. PP. 2200481.
12. **Логинов А.Б., Бокова-Сирош С.Н., Федотов П.В., Сапков И.В., Хмеленин Д.Н., Исмагилов Р.Р., Образцова Е.Д., Логинов Б.А., Образцов А.Н.** Получение и свойства мезопористых пленок MoS₂". *Физика и техника полупроводников*. 2022. Vol. 56. No. 12. PP. 1112–1119.



МИКРОСКОП СКАНИРУЮЩИЙ

ЗОНДОВЫЙ «СММ-2000»

Единственный в мире зондовый микроскоп, летающий в космосе в виде спутника Земли, работающий в перчаточных и горячих камерах атомных реакторов и внутри термоядерного реактора ТОКАМАК.



ВСТРОЕННАЯ ВИБРОИЗОЛЯЦИЯ И ВЫСОЧАЙШЕЕ РАЗРЕШЕНИЕ

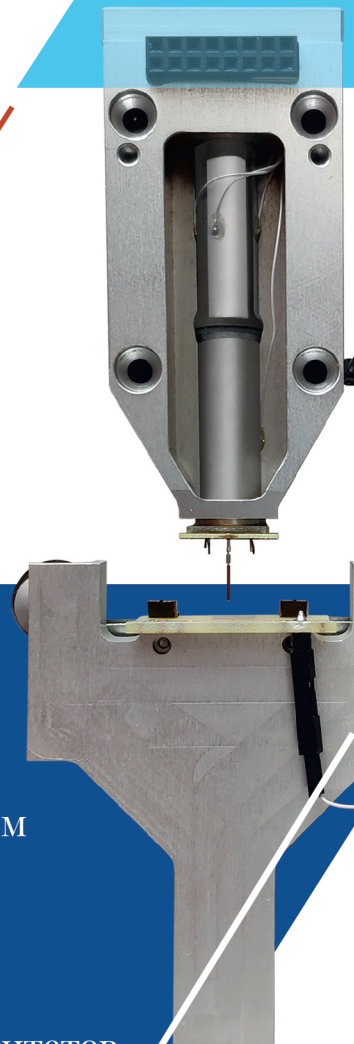
В базовой комплектации показывает атомы пиролитического графита в режиме сканирующей туннельной микроскопии.

Для качественного осмотра малых и больших объектов микроскоп имеет сканеры с разными размерами полей по X/Y/Z.

Микроскоп предоставляет уникальную возможность сборки его и разборки – для встраивания в различные системы и для лучшего обучения, выдерживая сборки-разборки до 12 лет в учебных классах

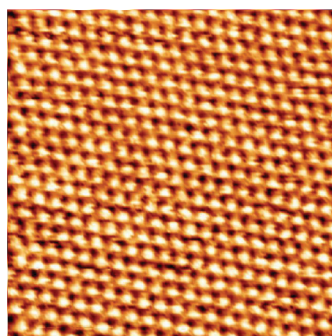
Микроскоп СММ-2000 работает со стандартными зондами-кантилеверами, имеет 3 основных режима сканирующей туннельной, полуконтактной и контактной атомно-силовой микроскопии, а также более 25 дополнительных режимов по снятию карт различных физических характеристик.

- Увеличение от 2 тыс. до 10 млн. крат
- Разрешение вплоть до АТОМОВ
- Трехмерный вид поверхности
- Измерение размеров от 0,2 нм до 40 мкм
- Распределение размеров зерен
- Анализ шероховатости до 0,2 нм
- Техподдержка 24/7 на «микроскоп.ru»
- Серийный выпуск в России
- Для точных производств, науки и университетов
- Надежен даже для обучения в школах!

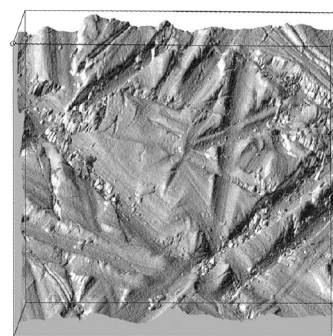


Микроскоп позволяет: отсканировать поверхность в выбранной точке образца, снять образец с микроскопа, воздействовать на образец тем или иным способом, например, напылить,

протравить или облучить, обратно установить образец в микроскоп и просканировать ту же с нанометровой точностью ранее выбранную точку на образце.



АТОМЫ ПИРОГРАФИТА
кадр 8,8×8,8 нм



ШЛИФ СТАЛИ, кадр 10×10 мкм,
шероховатость Ra = 0,007 мкм