



Получено: 21.07.2024 г. | Принято: 24.07.2024 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.248.258>

Научная статья

РАЗРАБОТКА ШИРОКОПОЛЬНОГО СКАНЕРА-ПРОФИЛОМЕТРА И НОВЫХ СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ДЛЯ ПЕРВОГО В МИРЕ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА – СПУТНИКА ЗЕМЛИ ЗЕМЛИ

Б.А.Логинов^{1,3,5}, нач. лаб., рук. проекта, ORCID: 0000-0001-5081-1424 / b-loginov@mail.ru, В.А.Беспалов¹, чл.-корр. РАН, д.т.н., ректор, ORCID: 0000-0003-4976-8515, А.Н.Образцов², д.ф.-м.н., проф., ORCID: 0000-0001-8017-0496, А.Б.Логинов^{1,2,5}, аспирант, ORCID: 0000-0003-2090-5301, В.Б.Логинов^{1,5}, вед. констр., ORCID: 0000-0002-2116-7411, Ю.В.Хрипунов^{3,4}, к.ф.-м.н., доц., ORCID: 0000-0003-2250-0420, М.А.Щербина^{3,4}, студент, ORCID: 0009-0001-8873-4986, Д.А.Севостьянова³, стажер, ORCID: 0009-0005-0496-6755, Д.С.Богданова³, студент, ORCID: 0009-0002-7532-4678, Р.Г.Горбачев³, студент, ORCID: 0009-0007-0435-6847, К.Е.Кондратьева³, студент, ORCID: 0009-0009-9965-7750, М.А.Лебедева³, студент, ORCID: 0009-0001-9070-3505, А.А.Мульгин³, студент, ORCID: 0009-0005-7847-7137, Д.А.Шевченко³, студент, ORCID: 0009-0009-8866-0268

Аннотация. Предложена и проработана новая конструкция сканера для атомно-силового микроскопа-спутника, предназначенного для работы в течение нескольких лет в автономном режиме в открытом космосе с целью исследования орбит на содержание микро- и наночастиц пыли на базе профилометра в качестве одной из осей сканирования. Микроскоп с данным сканером рассчитан и проверен на стойкость к перегрузкам до 50g при запуске, энергопотреблению не более 1 Вт от солнечных батарей, устойчив к потокам быстрых ионов солнечной плазмы, имеет большое поле сканирования открытого на космос зеркала для обнаружения и исследования попадающих на него частиц даже при малом их количестве. Показано, что применяемый в профилометрах индуктивный датчик с линейным приводом на длину в десятки миллиметров дорабатывается до разрешения в 1 нм, как по высотам рельефа за счет уменьшения магнитного зазора, так и по латерали за счет использования сверхострых алмазных игл с острием из нескольких атомов на конце. Применение второго линейного привода для второй координаты обеспечивает сканирование строчка за строчкой больших площадей с нанометровой точностью до 10 Гигапикселей, при этом сканирование одного кадра за несколько суток вполне допустимо для космического эксперимента, длящегося несколько лет в автономном режиме. При выборе материала зеркала микроскопа разработаны новые способы измерения твердости объемных материалов и тонких пленок, имеющие ряд принципиальных преимуществ и не требующие каких-либо других приборов при наличии профилометров или зондовых микроскопов. Изготовлены и испытаны макеты основных узлов нового сканера, которые показали его принципиальную работоспособность и позволили приступить к патентованию и изготовлению летной версии автономного космического атомно-силового микроскопа, претендующего на звание "первого в мире".

Ключевые слова: профилометрия, сканирующая зондовая микроскопия, атомно-силовая микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия, спутник Земли, космическая пыль, солнечный ветер, метеориты, твердость, индентирование

Для цитирования: Б.А. Логинов, В.А. Беспалов, А.Н. Образцов, А.Б. Логинов, В.Б. Логинов, Ю.В. Хрипунов, М.А. Щербина, Д.А. Севостьянова, Д.С. Богданова, Р.Г. Горбачев, К.Е. Кондратьева, М.А. Лебедева, А.А. Мульгин, Д.А. Шевченко. Разработка широкопольного сканера – профилометра и новых способов измерения твердости для первого в мире атомно-силового микроскопа – спутника Земли. НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17. № 5. С. 248–258. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.248.258>.

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

² МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия / Lomonosov Moscow State University, Physical department, Moscow, Russia

³ Образовательный центр "Сириус", федеральная территория "Сириус", Россия / Educational Centre "Sirius", Sirius Federal Territory, Russia

⁴ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия / Orel State University named after I.S.Turgenev, Orel, Russia

⁵ АО "Завод ПРОТОН", Зеленоград, Россия / JSC PROTON Plant, Zelenograd, Russia



Received: 21.07.2024 | Accepted: 24.07.2024 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.248.258>

Original paper

DEVELOPMENT OF A WIDE-FIELD SCANNER-PROFILOMETER AND NEW METHODS OF HARDNESS MEASUREMENT FOR THE FIRST EARTH SATELLITE ATOMIC FORCE MICROSCOPE IN THE WORLD

B.A.Loginov^{1, 3, 5}, Head of Laboratory, Head of Project, ORCID: 0000-0001-5081-1424 / b-loginov@mail.ru

V.A.Bespalov¹, Corr. Member of RAN, Doct. of Sci (Tech), Rector, ORCID: 0000-0003-4976-8515

A.N.Obraztsov², Doct. of Sci (Physics and Mathematics), prof., ORCID: 0000-0001-8017-0496

A.B.Loginov^{1, 2, 5}, Postgraduate, ORCID: 0000-0003-2090-5301

V.B.Loginov^{1, 5}, Leading Designer, ORCID: 0000-0002-2116-7411

Yu.V.Khripunov^{3, 4}, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Docent, ORCID: 0000-0003-2250-0420

M.A.Shcherbina^{3, 4}, Student, ORCID: 0009-0001-8873-4986

D.A.Sevostyanova³, Trainee, ORCID: 0009-0005-0496-6755

D.S.Bogdanova³, Student, ORCID: 0009-0002-7532-4678

R.G.Gorbachev³, Student, ORCID: 0009-0007-0435-6847

K.E.Kondratyeva³, Student, ORCID: 0009-0009-9965-7750

M.A.Lebedeva³, Student, ORCID: 0009-0001-9070-3505

A.A.Mulgin³, Student, ORCID: 0009-0005-7847-7137

D.A.Shevchenko³, Student, ORCID: 0009-0009-8866-0268

Abstract. A new design of scanner for atomic force microscope-satellite is proposed and worked out. The scanner is intended to work for several years in autonomous mode in open space to study orbits for the content of micro- and nanoparticles of dust and is based on profilometer as one of the scanning axes. The microscope equipped this scanner is designed and tested for resistance to overloads up to 50g at launch, power consumption of no more than 1 W from solar batteries, resistant to streams of fast solar plasma ions, has a large scanning field of the open-to-space mirror for detection and study of particles falling on it even if their number is small. It is shown that the inductive sensor with linear drive used in profilometers with a linear drive of several tens of millimeters can be upgraded to a resolution of 1 nm, both in relief heights by reducing the magnetic gap and laterally by using ultra-sharp diamond needles with a tip of several atoms at the end. The use of a second linear actuator for the second coordinate provides line-by-line scanning of large areas with nanometre accuracy and with the number of dots up to 10 Gigapixels, while scanning one frame in a few days is quite acceptable for a space experiment lasting several years in autonomous mode. New methods of measuring hardness of bulk materials and thin films, which have a number of fundamental advantages and do not require any other devices in presence of profilometers or probe microscopes, have been developed when selecting the microscope mirror material. Mock-ups of the main units of the new scanner were manufactured and tested, which showed its performance in principle and made it possible to start patenting and manufacturing of the flight version of the autonomous space atomic force microscope, which claims to be "the first in the world".

Keywords: profilometry, scanning probe microscopy, atomic force microscopy, scanning tunnelling microscopy, Earth satellite, space dust, solar wind, meteorites, hardness, indentation

For citation: B.A. Loginov, V.A. Bespalov, A.N. Obraztsov, A.B. Loginov, V.B. Loginov, Y.V. Khripunov, D.A. Sevostyanova, D.S. Bogdanova, R.G. Gorbachev, K.E. Kondratyeva, M.A. Lebedeva, A.A. Mulgin, D.A. Shevchenko. Development of a wide-field scanner-profilometer and new methods of hardness measurement for the first Earth satellite atomic force microscope in the world. NANOINDUSTRY. 2024. Vol. 17. No. 5. PP. 248-258. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.248.258>.

ВВЕДЕНИЕ

27 июня 2023 года в спутнике Земли "Нанозонд-1" Россией в космос был запущен первый в мире спутниковый сканирующий зондовый микроскоп (марка СММ-2000С), который сразу же начал передавать кадры (<https://nauka.tass.ru/nauka/18422659>) и успешно продолжает работать уже больше года (<https://www.mos.ru/news/item/136461073>). Этот микроскоп был создан для двух важных задач, которые стали решаться впервые в мире: для изучения стойкости материалов космических кораблей к воздействию ионов солнечного ветра, а также для выяснения, на каких орбитах еще нет облаков пыли, возникающей от столкновения старых неуправляемых спутников и их частей между собой. Проблема в том, что даже маленькие частицы пыли микро- и наноразмеров, как метеориты, из-за больших скоростей до 20 км/с и более делают мутными иллюминаторы и солнечные батареи, а также образуют микрократеры на корпусах космических кораблей [1].

В настоящее время "Нанозонд-1" находится в космосе и успешно передает данные на Землю. Уже получено много информации, однако оказалось недостаточно сведений о космической пыли. Используя имеющийся приоритет [2], начато строительство новых аналогичных [3, 4] космических аппаратов, и одним из решений для увеличения их чувствительности к малым количествам пыли явилось существенное увеличение площади сканирования "зеркала", на которое падает пыль и которое анализирует зондовый микроскоп. В новом спутнике "Нанозонд-А" планируется увеличение площади окна непрерывного сканирования более чем в 10 млн раз: до 40/40 мм с числом точек до 100 000 / 100 000 (10 Гигапикселей) – против нынешних 10/10 мкм с числом точек не более 4096/4096 (16 Мегапикселей) в спутнике "Нанозонд-1". Это – сама по себе сложная задача для конструирования зондовых микроскопов, а тем более – предназначенных для нескольких лет автономной работы в открытом космосе: со стойкостью к ускорениям до 50g при запуске, стойкостью к потоку ионов солнечного ветра со скоростями до 1000 км/с, с потребляемой мощностью на уровне 1 Вт от солнечных батарей спутника, и при этом в габаритах не более 90×90×200 мм, допускаемых для размещения в спутнике типоразмера CubeSat-3U. Найти решение этой задачи, несмотря на наш более чем 33-летний опыт конструирования зондовых микроскопов [5], не удалось нам в течение более двух лет. Например, юстировка даже специально разработанных лазерных систем – датчиков изгиба стандартных зондов – кантилеверов атомно-силовых микроскопов – не выдерживала требуемый уровень перегрузки при испытаниях на вибростендах, а сами кремниевые иглы этих кантилеверов под

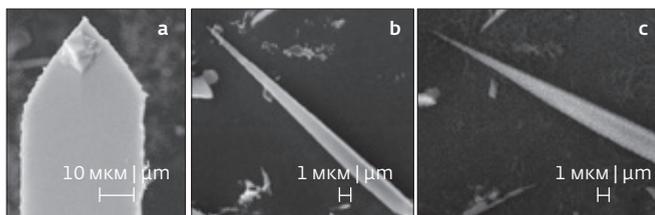


Рис.1. Кадры исследования игл в "Микроскопе сканирующем электронном РЭМ-10" до и после воздействия плазмы: а – разрушившаяся кремниевая игла кантилевера после воздействия плазмы; б – не разрушившаяся алмазная игла после воздействия плазмы; с – алмазная игла до воздействия плазмы

Fig.1. Images of needle examination in "Scanning Electron Microscope REM-10" before and after plasma exposure: a – destroyed silicon cantilever needle after plasma exposure; b – non-destroyed diamond needle after plasma exposure; c – diamond needle before plasma exposure

воздействием плазмы, аналогичной по воздействию всего 42 дням воздействия солнечной плазмы [6], практически полностью разрушались (рис.1).

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ

Идея конструкции нового сканера с необходимыми параметрами пришла в процессе работ по совершенствованию чувствительности разработанных и выпускаемых нами с 2005 года (АО "Завод ПРОТОН", Зеленоград, www.microscopy.su) профилометров модели 130 (№ 78157 в Госреестре средств измерений России). Было обращено внимание на то, что для возможности измерения параметров шероховатости разных, в том числе со специально зазубренным рельефом, изделий машиностроения, для которого в основном применяются профилометры, магнитный зазор в индуктивном датчике профилометра делается на уровне около 0,5 мм (рис.2), и при этом профилометр модели 130, производитель которого обладает патентом на уникальную запатентованную направляющую линейного двигателя [7], имеет чувствительность на уровне 1 нм по измерению высот рельефа. Однако, специально для измерения ровного зеркала космического микроскопа, имеющего полный разброс высот поверхности не более 0,1 мм, в основном из-за наклона – можно существенно уменьшить этот зазор, так как игла профилометра не должна сильно ходить вверх и вниз. При этом, ввиду короткодействия магнитных сил, было предположено, что может увеличиться и чувствительность датчика профилометра. Для проверки данного предположения в макромасштабе был изготовлен макет датчика (рис.2) и снят график чувствительности датчика в зависимости от величины магнитного зазора (рис.2). Как видно, чувствительность датчика при снижении величины

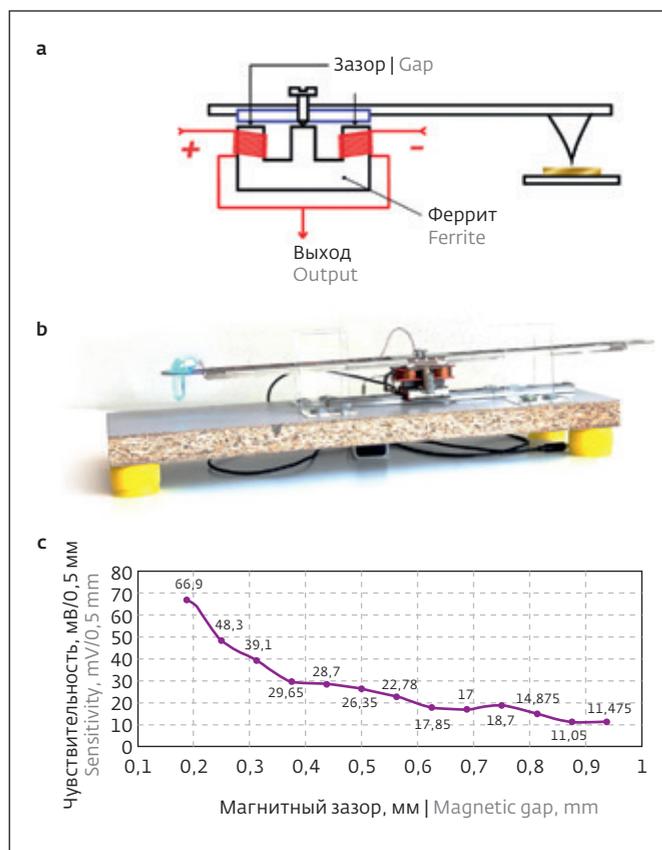


Рис.2. Индуктивный датчик "Профилометра модели 130 – КОСМОС": а – схема датчика; б – изготовленный макет; с – снятый график зависимости чувствительности датчика (изменение выходного сигнала при поднятии иглы на 0,5 мм) от величины магнитного зазора

Fig.2. Inductive sensor of "Profilometer model 130 – KOSMOS": a – sensor scheme; b – made model; c – taken graph of dependence of sensor sensitivity (change of output signal when the needle is raised by 0.5 mm) on the magnetic gap

магнитного зазора с уровня 0,5 мм в три раза приводит к увеличению чувствительности также примерно в три раза. Это может позволить визуализировать попавшие на зеркало частицы пыли диаметром примерно до 1 нм, описывая их как минимум тремя точками, что будет вполне удовлетворительно для анализа космической пыли.

Однако, кроме увеличения разрешения по высотам рельефа, для обнаружения упавших и застрявших в мягком металле зеркала (или образовавших микро- и нанократеры) космических частиц с диаметрами начиная с 1 нм, в датчике профилометра для повышения разрешения по латерали мы также заменили стандартную для этих датчиков алмазную иглу с радиусом острия в единицы микрометров, позволявшую видеть малые частицы размером только более сотен нанометров. Заменили на уникальные

алмазные иглы, разработанные на физическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова, имеющие на конце острие всего из нескольких атомов, и приспособивающее объекты размером до 0,5 нм [4]. При этом мы использовали уникальность дифференциального магнитного датчика в том, что за счет подмагничивания его плеч (рис.2) постоянным током можно с высокой точностью регулировать давление этой алмазной иглой на зеркало с тем, чтобы не царапать его.

Примененные нами алмазные иглы с использованием "Вакуумно-плазменной установки МАГ-5" (изготовитель – АО "Завод ПРОТОН") были проверены на стойкость к воздействию потока плазмы, аналогичного по воздействию 42-м дням воздействия солнечной плазмы [6]. С использованием выпускающегося в настоящее время российского электронного микроскопа "Микроскоп сканирующий электронный РЭМ-10" (изготовитель – АО "Завод ПРОТОН") были получены кадры этих игл до и после воздействия плазмы, и оказалось, что эти алмазные иглы совсем не изменяются и, более того, очищаются плазмой от поверхностных загрязнений (рис.1).

Для предварительных лабораторных экспериментов по стойкости к космическим перегрузкам до окончательных испытаний в сертифицированном вибростенде на заводе ПРОТОН, нами был собран небольшой вибростенд "Сириус-БВ24" на основе отечественного динамика 75ГДН-1М-4 (рис.3), с прикрепленной к его диффузору корзиной для испытания космического микроскопа в целом и его узлов по-отдельности. По формуле $A = a/(2\pi f)^2$, где a – уровень ускорения космической перегрузки, f – частота колебания диффузора – рассчитывалась из требования достижения заданного уровня ускорения космической перегрузки амплитуда "А" раскачки диффузора динамика. Например, для частоты $f = 50$ Гц и уровня ускорения космической перегрузки 50g амплитуда должна была составить около 5 мм, то есть полный размах колебания диффузора – 10 мм, что достигалось подачей соответствующего напряжения на динамик и проверялось линейкой. Примененный индукционный датчик профилометра модели 130 был проверен на этом вибростенде на стойкость к перегрузкам и показал работоспособность без сбоя в калибровке при ускорениях до 82g, где g – ускорение свободного падения, а разрушился без возможности восстановления работоспособности после снижения ускорения – только при величине ускорения 172g. Это существенным образом и окончательно подтвердило его применимость "Профилометра модели 130" в космическом атомно-силовом микроскопе.

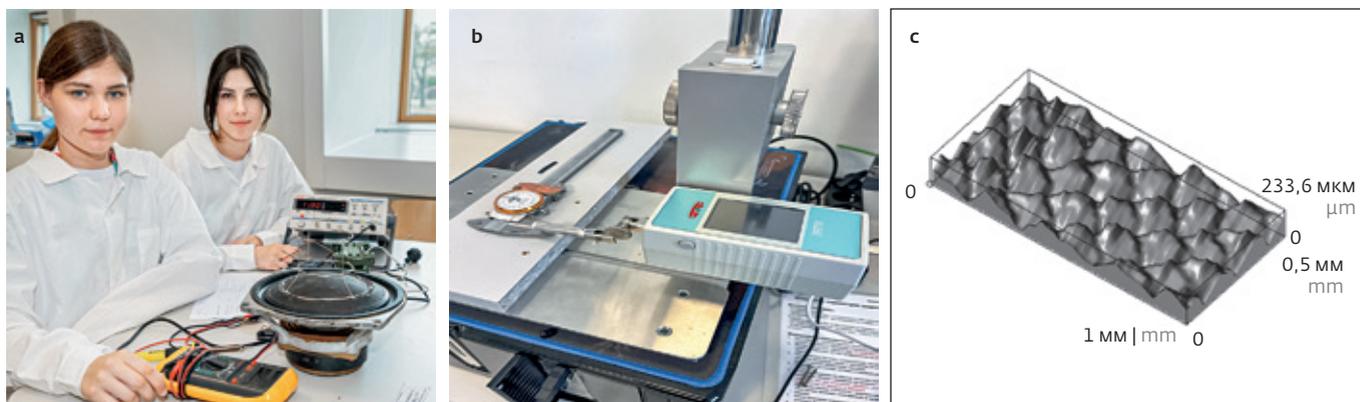


Рис.3. Изготовленные макеты: а – макет вибростенда "Сириус-БВ24"; б – макет широкопольного сканера микроскопа с составной частью в виде "Профилометра модели 130 – КОСМОС"; с – кадр участка надфиля, полученный на макете широкопольного сканера с автоматической сборкой кадра с помощью написанной программы из профилей, снятых профилометром Fig.3. Manufactured models: a – model of vibration test "Sirius-BB24"; b – model of wide-field microscope scanner with a component part in the form of "Profilometer model 130 – KOSMOS"; c – frame of the notch section obtained on the model of wide-field scanner with automatic assembly of the frame with the help of the written software from the profiles taken by the profilometer

РЕЗУЛЬТАТЫ

Команда из шести школьников на программе "Большие вызовы – 2024" в образовательном центре "Сириус" (г. Сочи) (рис.4) активно участвовала в сборке пять макетов и проверила на работоспособность основные узлы рассчитанной конструкции

широкопольного сканера нанометрового разрешения на основе профилометра для первого в мире атомно-силового микроскопа "СММ-2000-АЛМАЗ" для автономной работы в открытом космосе. Для сборки макетов, в том числе, использовалось моделирование и печать различных деталей



Рис.4. Команда программы "Большие вызовы" – 2024", выполнявшая работы по сборке и испытаниям макетов первого в мире атомно-силового микроскопа – спутника Земли, слева направо: Андрей Мульгин, Максим Щербина, Дарья Богданова, Юрий Хрипун, Ксения Кондратьева, Дарья Шевченко, Мария Лебедева, Александр Образцов, Дарья Севостьянова, Борис Логинов, Роман Горбачев

Fig.4. The Grand Challenges-2024 Programme Team that assembled and tested models of the world's first Earth satellite atomic force microscope, from left to right: Andrey Mulgin, Maxim Shcherbina, Daria Bogdanova, Yuri Khripunov, Ksenia Kondratyeva, Daria Shevchenko, Maria Lebedeva, Alexander Obraztsov, Daria Sevostyanova, Boris Loginov, Roman Gorbachev



Рис.5. Работа команды "Больших вызовов – 2024" в аудитории №108 имени Г.Н.Флерова в круглом корпусе "Школа" кампуса образовательного центра "Сириус" в г. Сочи: а – изготовление макета нового спутника "Нанозонд-А" в масштабе 1:1; б – процесс воздействия плазмы на алмазные и кремниевые иглы в "Вакуумно-плазменной установке МАГ-5"; в – снятие кадров на "Микроскопе сканирующем зондовом СММ-2000"; д – выбор в оптическом микроскопе наиболее длинной из сверхострых алмазных игл физфака МГУ для ее применения в первом в мире космическом атомно-силовом микроскопе "СММ-2000-АЛМАЗ"

Fig.5. The work of the Grand Challenges-2024 team in the G.N.Flerov auditorium No. 108 in the round building "School" of the Sirius Educational Centre campus in Sochi: a – production of a model of the new satellite "Nanozond-A" on a scale of 1:1; b – process of plasma impact on diamond and silicon needles in the "MAG-5 vacuum-plasma unit"; c – taking frames on the "SMM-2000 scanning probe microscope"; d – selection of the longest of the ultra-sharp diamond needles from the MSU Physical Department in the optical microscope for its use in the world's first space atomic force microscope "SMM-2000-ALMAZ"

на 3D-принтере. Кроме вышеописанных макетов вибростенда "Сириус-БВ24" (рис.3) и индуктивного датчика (рис.2), был собран макет широкопольного сканера микроскопа (рис.3) в целом, составной частью которого стал "Профилометр модели 130 – КОСМОС". Для этого макета была написана программа, которая заработала и будет потом работать для летной версии микроскопа – она автоматически собирает трехмерный кадр (рис.3) из строчек-профилей, снимаемых профилометром. Команда также провела воздействие плазмой

на алмазные и кремниевые иглы (рис.5), подтвердив правильность выбора стойких к плазме алмазных игл, изготавливаемых на физическом факультете МГУ им. М.В.Ломоносова, для условий открытого космоса.

Для подтверждения принципиальной возможности компоновки нового космического микроскопа в габаритах платформы CubeSat-3U был успешно собран макет будущего спутника "Нанозонд-А" со встроенным макетом космического атомно-силового микроскопа в масштабе 1:1 (рис.5).

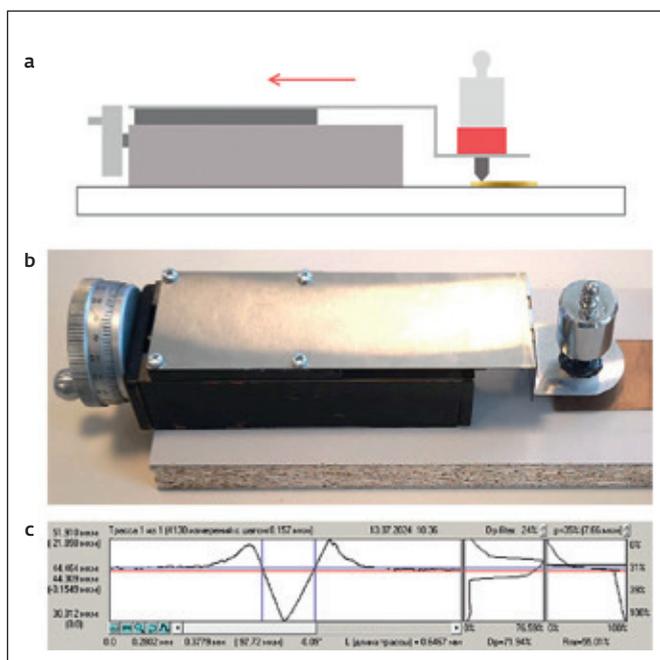


Рис.6. Макет для измерения твердости методом царапания алмазом: а – схема; б – фотография; с – снятый на "Профилметре модели 130" профиль с определением ширины канавки царапины в 97,72 мкм по расстоянию между пересечением профиля канавки синей линией, поставленной по уровню поверхности за пределами канавки Fig.6. Layout for diamond scratch hardness measurement: a – schematic; b – photograph; c – profile taken on a "Profilometer Model 130" with the scratch groove width of 97.72 μm determined by the distance between the intersection of the groove profile with a blue line placed at the level of the surface outside the groove

Пятым макетом явился макет для оценки необходимой твердости материала для зеркала космического микроскопа. Проблема в том, что сверхострая алмазная игла, подводимая к зеркалу со сверхмалыми усилиями уровня наноньютонов и работающая под управлением дифференциального индуктивного датчика и в контактном, и в вибрационном, и других известных режимах атомно-силовой микроскопии – все-таки может царапнуть зеркало или сделать в нем ямку, в том числе из-за периодически возникающих внештатных ситуаций в космосе, например из-за солнечных вспышек или попадания метеоритов. Поэтому встал вопрос пересмотра мягкого золота в качестве материала для зеркала, использованного в первом в мире космическом зондовом микроскопе СММ-2000С, работающем в режиме сканирующей туннельной микроскопии.

Неожиданно для нас, в процессе выбора материала для зеркала, решить проблему измерения твердости удалось отдельно и с помощью профилметра, и с помощью зондового микроскопа, не

прибегая к специальным для измерения твердости приборам – твердомерам.

Нанесение царапин четырехгранной пирамидкой алмаза обычным "Стеклорезом алмазным, тип 1.-0,16...0,24 карат" с задающимся гирькой усилием давлением на материал на собранном нами несложном макете с линейной направляющей (рис.6) с последующим измерением ширины профилетром модели 130 и определением твердости материала по таблицам ГОСТ 21318-75 "Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками" – стало первым легким способом измерения твердости. Удобство измерения ширины канавки профилетром, по сравнению с рекомендуемым в этом ГОСТе оптическим микроскопом – в том, что на профиле "Профилетра модели 130" легко провести линию по поверхности образца за пределами канавки и определить ширину канавки как расстояние между точками пересечения этой линии с канавкой (рис.6), при этом наплывы (выбросы материала из канавок в сторону) хорошо видны на профиле и не попадают в рассмотрение. Определить ширину канавки в оптический микроскоп трудно, так как не видно, где канавка, а где наплывы, и, фактически, использование профилетра реанимирует использование ГОСТ 21318-75. Мы провели ряд тестов этого метода с измерением твердости разных материалов, и подтвердили сходимость измерений с табличными значениями их твердости.

Второй способ, который является логическим продолжением первого, но с принципиальными признаками новизны – с измерениями не на профилетре, а на зондовом микроскопе СММ-2000 (рис.7). Мы разработали его для тонких покрытий и пленок, из которых также делаются зеркала, так как по вышеуказанному ГОСТ нельзя делать измерения в случае, если толщина слоя материала не превышает глубину канавки царапания как минимум в 10 раз. Суть второго метода в том, что мы царапаем образец не одним алмазом, а сразу множеством абразивных частиц, водя по образцу наждачной шкуркой. В зависимости от среднего размера абразивного зерна (рис.7) легко вычисляется необходимое число циклов прохода шкуркой туда-обратно по образцу с тем, чтобы в кадре определенного размера от зондового микроскопа попало достаточное для статистики количество царапин. Например, при среднем размере зерен в 3 мкм для попадания в кадр размером 10×10 мкм более 10-ти царапин необходимо совершить не менее двух циклов прохода туда-обратно, с учетом того, что зерна на практике проходят каждый раз по случайной траектории. Измеряя по кадру с зондового микроскопа ширину канавок и находя ее среднее значение,

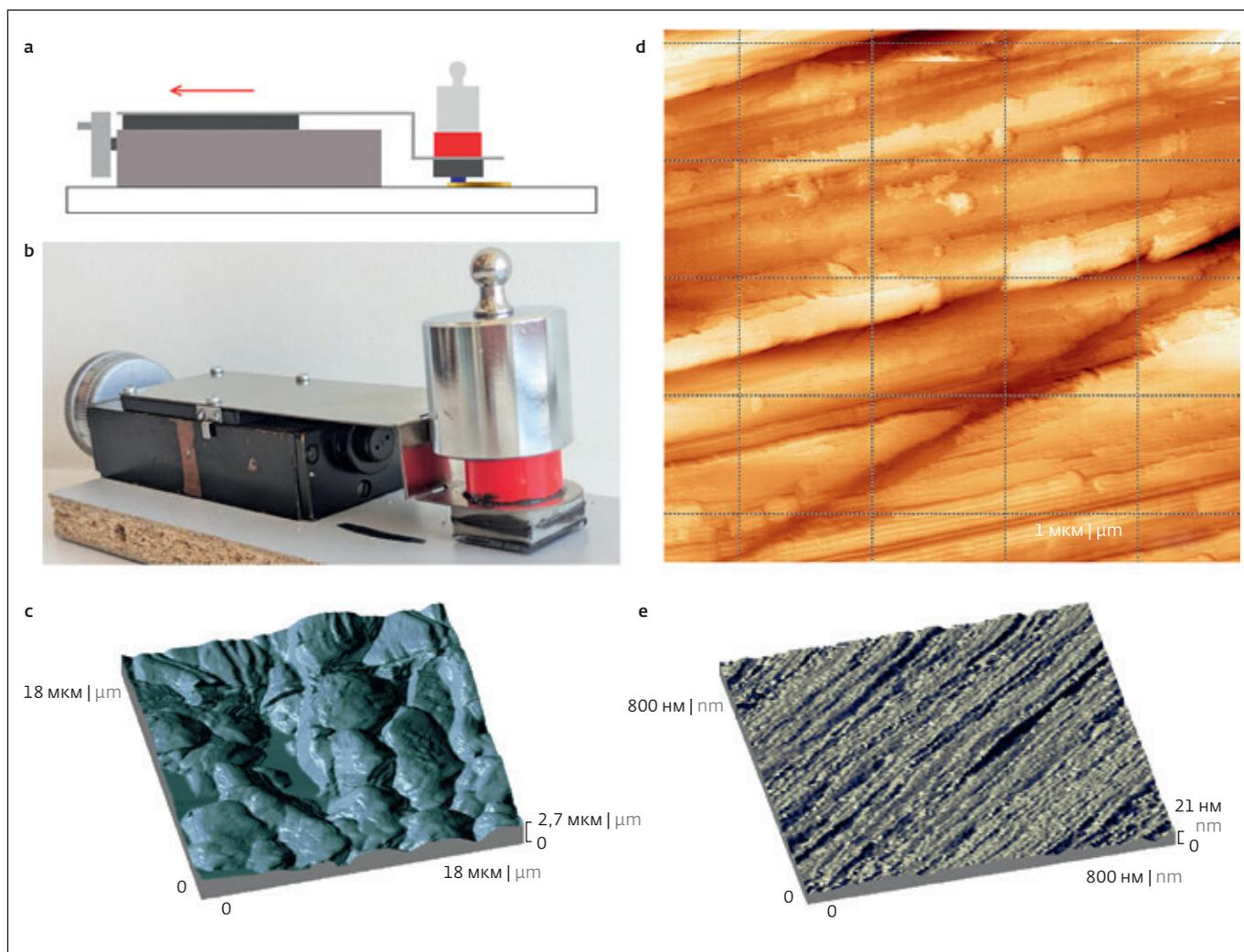


Рис. 7. Макет для измерения твердости методом царапания наждачной шкуркой и снятые на "Микроскопе сканирующем зондовом СММ-2000" кадры: а – схема, на которой показано, что для равномерного прижима кусочек шкурки, по рисунку синего цвета, прикреплен через эластичный подпятник; б – фотография макета; в – кадр шкурки "7000" со средним размером зерна около 3 мкм; д – снятый в режиме атомно-силовой микроскопии кадр поверхности золотого зеркала после 5 циклов прохода этой шкуркой, полный разброс высот по этому кадру размером $4,3 \times 4,3$ мкм составляет 277 нм; е – снятый в режиме сканирующей туннельной микроскопии кадр поверхности пленки хрома толщиной 90 нм на кварцевом стекле после 20 циклов прохода этой шкуркой

Fig.7. Layout for measuring hardness by scratching with emery cloth and frames taken with "Scanning Probe Microscope SMM-2000": а – scheme showing that for uniform pressure a piece of sandpaper, according to the blue colour drawing, is attached through an elastic support; б – view of the layout; в – frame of "7000" sandpaper with an average grain size of about 3 microns; д – atomic force microscopy frame of the surface of a gold mirror after 5 cycles of passing with this skin, the total height spread on this 4.3×4.3 μm frame is 277 nm; е – scanning tunnelling microscopy frame of the surface of a 90 nm thick chromium film on quartz glass after 20 cycles of passing with this sandpaper

например по 10 канавкам, или же "в один клик" вычисляя параметры шероховатости Ra, Rz и другие программным обеспечением микроскопа по ГОСТ Р ИСО 4287; далее откалибровываем измерения ширины канавок или параметров шероховатости по табличным значениям твердости измерениями на различных материалах с применением различных гирек для давления на измеряемый материал,

как это делалось и при разработке действующего ГОСТ 21318-75, мы получаем еще один метод измерения твердости как для объемных материалов, так и для пленок.

Таким образом, дополнительным выходом работ является то, что предложены и опробованы новые способы измерения твердости объемных материалов и тонких пленок с применением широко



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.

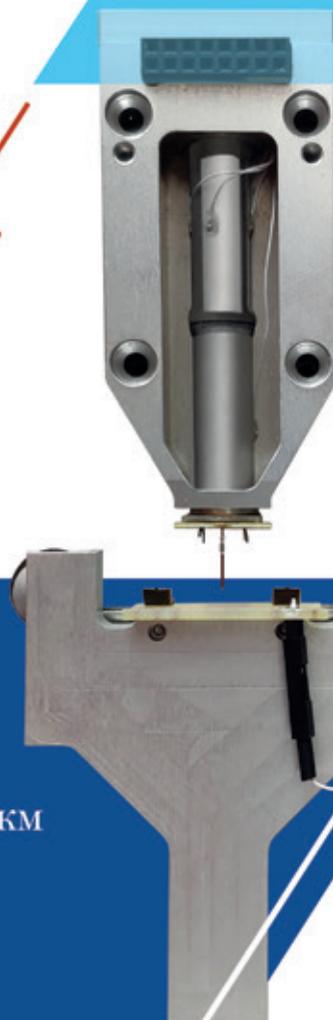
Для качественного осмотра малых и больших объектов микроскоп имеет сканеры с разными размерами полей по X/Y/Z.

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.

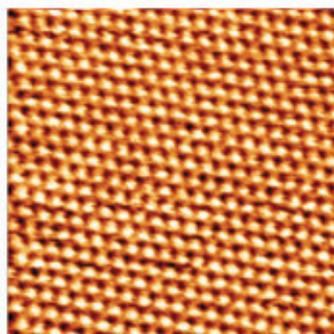


- Увеличение от 2 тыс. до 10 млн. крат
- Разрешение вплоть до АТОМОВ
- Трехмерный вид поверхности
- Измерение размеров от 0,2 нм до 40 мкм
- Распределение размеров зерен
- Анализ шероховатости до 0,2 нм
- Техподдержка 24/7 на «микроскоп.su»
- Серийный выпуск в России
- Для точных производств, науки и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

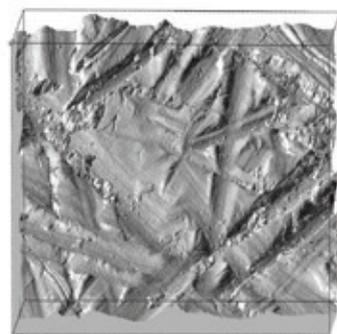


Микроскоп позволяет: отсканировать поверхность в выбранной точке образца, снять образец с микроскопа, воздействовать на образец тем или иным способом, например, напылить,

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

распространенных стандартных приборов типа профилометров и сканирующих зондовых микроскопов. Достоинством способов является отсутствие необходимости в поиске мест индентирования, что является трудностью в других способах, так как царапины или ямки индентирования с первого же раза попадают в область измерения профилометром или микроскопом. В способе с алмазом профилометр легко нацелить на прохождение поперек даже малой по длине царапины, а в случае со шкуркой царапин так много, что они всегда попадают в кадр, в какой бы точке образца мы его не снимали зондовым микроскопом.

Способы претендуют также на уникально широкий диапазон измерения твердости, от 1 до 10 единиц по Моосу, и претендуют на возможность определения твердости пленок или покрытий даже очень малой толщины, вплоть до трех атомов, до 1 нм. Это достигается за счет возможности применения малых сил индентирования, возникающих распределяясь на каждом из множества зерен наждачной шкурки и деформирующих образец на малую глубину, вплоть до глубин не более одного атома, а также за счет высокого разрешения зондовыми микроскопами высот рельефа области индентирования, вплоть до 1/10 от размера одного атома, до 0,02 нм [5]. Показано, что по этой же причине возможно измерение твердости индентированием, не нарушающим функции образца, что важно при измерении твердости таких точных поверхностей, как зеркала и полупроводниковые структуры.

ВЫВОДЫ

Итоговым выводом работ стало принятие решения о старте этапа разработки опытного образца летной версии вышеописанной конструкции космического атомно-силового микроскопа, с дальнейшими планами по его запуску в космос после успехов на испытаниях.

Дополнительным выводом работ стало решение об информировании общественности публикацией о новых идеях по способам измерения твердости, с планами по дальнейшему, возможно совместному, развитию этих способов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа выполнена благодаря партнерству Образовательного центра "Сириус", АО "Завод ПРОТОН", г. Зеленоград, Национального исследовательского университета МИЭТ, Орловского государственного университета имени И.С.Тургенева и физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

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. Беспалов В.А., Логинов Б.А., Новиков Л.С., Никитушкина О.Н. Исследование ударной микроструктуры на поверхности медной пластины, экспонировавшейся в открытом космосе. Физика и химия обработки материалов. 2008. № 2. С. 28-31.
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. Логинов Б.А. Первый в мире сканирующий зондовый микроскоп в виде спутника как старт этапа научных спутников-лабораторий. НАНОИНДУСТРИЯ. 2021. № 5. С. 22-26. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.5.270.274>
4. 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. Наблюдение изменения морфологии пленок высокотемпературных металлов в сканирующем зондовом микроскопе при прогреве в условиях открытого космоса. НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. № 2. С. 90-97. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.2.90.9>
5. Логинов Б.А., Логинов П.Б., Логинов В.Б., Логинов А.Б. Зондовая микроскопия: применения и рекомендации по разработке. НАНОИНДУСТРИЯ. 2019. № 6. С. 352-365. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2019.12.6.366.369>
6. Левин К.Л., Беспалова Е.А., Ванькаев А.С., Ключкина Е.В., Лопатин А.В., Метальников Н.М., Сапрыкин М.Э., Логинов А.Б., Оразов И.В., Логинов Б.А. Изучение изменения морфологии поверхности многослойных графеновых структур при воздействии плазмы в качестве модели солнечного ветра в открытом космосе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 9. С. 51-55.
7. Елкин А.Г., Логинов Б.А., Логинов В.Б., Троян В.И. Устройство прецизионного перемещения. Патент на изобретение RU 2537363 С2, 10.01.2015, Заявка № 2013107665/11 от 21.02.2013.

