Центр атомно-масштабных и ядерно-физических микроскопических исследований конденсированных сред для получения разносторонней информации о наномасштабном состоянии различных материалов КАМИКС

КАМИКС создан 22 июня 2009 года

Распоряжением Правительства РФ от 30 декабря 2009 г. №2125-р КАМИКС включен в перечень уникальных ядерно-физических установок, необходимых для осуществления Национальным Исследовательским Центром «Курчатовский институт» своей деятельности.

На базе КАМИКС создан Центр коллективного пользования 02.09.2014

АДРЕС
117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

РУКОВОДИТЕЛЬ РАБОТ
Рогожкин Сергей Васильевич
Тел.: +7-499-125-35-68
Факс: +7-499-127-08-33
sergey.rogozhkin@itep.ru

БАЗОВАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

ИНФОРМАЦИЯ ОБ УНУ
Центр атомно-масштабных и ядерно-физических микроскопических исследований конденсированных сред для получения разносторонней информации о наномасштабном состоянии различных материалов КАМИКС включает в себя широкую экспериментальную базу и различные методики исследований. Комплекс включает в себя следующие уникальные исследовательские установки: атомно-зондовый томограф ECOTAP (CAMECA); атомно-зондовый томограф ПАЗЛ-3D (ИТЭФ) с фемтосекундным лазерным испарением; сканирующий зондовый микроскоп MULTIMODE NANOSCOPE III (VEECO); сканирующий мульти-микроскоп СММ-2000; профилометр модели 130; позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС). А также набор вспомогательного оборудования для пробоподготовки: просвечивающий электронный микроскоп JEM JEOL 1200 EX; установка для электрохимического травления TenuPol-5; шлифовально-полировальный станок с регулируемой скоростью вращения LaboPol-5; электроэрозионный станок ВЭСТ-240-3 с ЧПУ ДГТ 735. Совокупность приборной базы, развитых методик, а также навыков и компетенций в области ядерно-физических микроскопических исследований конденсированных сред позволяет проводить комплекс мероприятий, начиная с подготовки образцов из массивных фрагментов материала, и заканчивая интерпретацией и анализом полученных экспериментальных данных.

ОПИСАНИЕ УНУ, НАЗНАЧЕНИЕ, ГЛАВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА
В состав УНУ входит комплекс современного аналитического оборудования. Атомно-зондовый томограф ECOTAP позволяет получать данные о наноструктурном состоянии проводящих материалов (металлов, сплавов на основе Fe, Ti, V, и т.д., различных модельных сплавов, микропроводов и т.п.) с атомарным разрешением и определением химической природы каждого испаренного атома. Суть данного метода

заключается в последовательном испарении атомов с поверхности образца под воздействием электрического поля и последующим детектированием испаренных ионов. Томографическая атомно-зондовая микроскопия дополняет другие существующие методы микроскопического анализа и позволяет получать более широкую информацию об особенностях современных наноструктурированных материалов. Данная методика позволяет получать различную информацию (размер, состав, распределение химических элементов, плотность числа) о сложных наноразмерных (1-4 нм) объектах, внедренных в материал при приготовлении или образующихся при их эксплуатации. Разработанный и успешно эксплуатируемый Прототип атомного зонда с лазерным испарением ПАЗЛ-3D оснащен современным детектором на основе линий задержки, который позволил увеличить скорость сбора данных (до 1000 атомов/сек) и область исследований (до 100 × 100 × 1000 нм) в 25 раз по сравнению с атомным зондом ECOTAP. А использование в качестве испаряющей системы фемтосекундного лазера значительно расширяет возможный спектр исследуемых материалов (металлы, полупроводник, диэлектрики и т.д.). ПАЗЛ-3D является единственной установкой такого типа в России. Сканирующий зондовый микроскоп MULTIMODE NANOSCOPE III (VEECO), используя различные измерительные компоненты, позволяет проводить исследования топографии поверхности, шероховатости, распределения частиц по размерам и высоте и т. д. Имеются возможности проведения комплексных исследований различных образцов на площади от 1 нм × 1нм до 150 мкм × 150 мкм, с разрешением до 1 нм для АСМ, вплоть до атомного разрешения для СТМ. Микроскоп СММ-2000 – мультирежимный, он имеет и оба базовых режима - СТМ и АСМ, и более 20 дополнительных режимов исследования физических свойств образцов. Микроскоп позволяет достигать чрезвычайно высокого разрешения до 0.1 Ангстрем. Микроскопы не требуют вакуумирования и подготовки образцов, просты, надежны. Профилометр модели 130 предназначен для измерения 28 параметров шероховатости наружных и внутренних поверхностей и 4 параметров волнистости (пазы, отверстия) поверхностей, сечения которых в плоскости измерения представляют собой как прямые, так и изогнутые по радиусу линии (шарики, валы и т.д.), с измерением этого радиуса. Чувствительность индуктивного датчика профилометра модели 130 имеет рекордную величину в 0.002 мкм, что позволяет описывать рельеф неровностей высотой от 0.005 мкм. Профилометр прошёл во ВНИИМС процедуру Гос. испытаний и зарегистрирован как средство измерения РФ 1-й степени точности. Позитронная аннигиляционная микроскопия (ПАС) является неразрушающим методом изучения структуры вещества, использующего позитрон в качестве зонда следующих свойств окружающей его среды: электронную структуру вещества (топологию поверхности Ферми); образование и эволюцию нанодефектов (главным образом вакансионного типа; чувствительность ПАС таким дефектам оказывается на уровне 10^{15} $см^{-3}$); образование нанокластеров под действием облучения; распределение свободного объема (пористость); физико-химические процессы радиолиза среды. Суть ПАС состоит в имплантации в исследуемый образец позитронов и последующей регистрации характеристик их аннигиляционного гамма-излучения.

Также в состав УНУ входят вспомогательные установки и приборы для пробоподготовки и осуществления контроля образцов. Просвечивающий электронный микроскоп JEM JEOL 1200 EX с термоэлектронным источником электронов (LaB_6). Максимальное ускоряющее напряжение 120 кэВ. Основные направления использования установки: исследование микроструктуры и морфологии конструкционных материалов, контроль качества образцов для атомно-зондовой томографии. TenuPol-5 – автоматическая установка электролитического утонения образцов для электронной микроскопии со встроенной функцией сканирования параметров процесса и возможностью установки дополнительных параметров для новых материалов. Шлифовально-полировальный станок с регулируемой скоростью вращения LaboPol-5. Основные направления использования установки: механическое утонение ПЭМ образцов;

подготовка поверхности ПЭМ образцов к облучению тяжелыми ионами на ускорителе; подготовка образцов к проведению различных исследований морфологии поверхности и механических свойств (наноиндентирование, сканирующая туннельная и атомно-силовое исследование и др.). Электроэрозионный станок ВЭСТ-240-3 с ЧПУ ДГТ 735 предназначенный для автоматического изготовления деталей сложной формы из электропроводных материалов с вертикальной (цилиндрической) образующей. Процесс электроэрозионной обработки объектов исследования является одной из самых успешных методик, т.к. нарезание образцов происходит в воде при помощи плазменного распыления вещества, следовательно - бесконтактно, прецизионно, фактически без нагрева образца, с минимальным наведением дефектов.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВОДИМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УНУ

Атомно-зондовая томография позволяет получать данные о наноструктурном состоянии проводящих материалов (металлов, сплавов на основе Fe, Ti, V, и т.д., различных модельных сплавов, микропроводов и т.п.) с атомарным разрешением. Широкое применение атомно-зондовая томография нашла при анализе наноструктурированных сталей, макроскопические свойства которых определяются развитой наноструктурой. Томографическая атомно-зондовая микроскопия дополняет другие существующие методы микроскопического анализа и позволяет получать более широкую информацию об особенностях современных наноструктурированных материалов. Данная методика позволяет получать различную информацию (размер, состав, распределение химических элементов, плотность числа) о сложных наноразмерных (1-4 нм) объектах, внедренных в материал при приготовлении или образующихся при их эксплуатации. Применение этой методики востребовано в областях, где большое внимание уделяется процессам возникновения наноструктурных особенностей и влиянию подобных образований на свойства материала. Такими направлениями являются, ядерная энергетика, авиационная и автомобильная промышленность, космическая промышленность, микроэлектроника и т.д.

Комбинация атомно-зондовой томографии с облучением тяжелыми ионами позволяет проводить экспресс-анализ новых перспективных конструкционных материалов, которые планируется применять в новых ядерных и термоядерных энергетических установках, в космической технике, при создании новых научных и промышленных установок, подверженных радиационным воздействиям.

В случае использования ионных пучков для легирования, модификации приповерхностных слоев и создания наноструктурированных областей в материалах на глубинах от сотен нанометров до нескольких микрон, становится актуальным возможность количественного анализа образованных наноразмерных особенностей.

Наличие в составе УНУ современных аналитических приборов позволяет дополнительно исследовать: топографию поверхности, шероховатости, распределения частиц по размерам и высоте и т. д.; электронную структуру вещества (топологию поверхности Ферми); образование и эволюцию нанодефектов; образование нанокластеров под действием облучения; распределение свободного объема (пористость); физико-химические процессы радиолиза среды; микроструктурный и дифракционный анализ пленок проводящего не магнитного не органического материала толщиной не более 100 нм и т.д..

Основные направления использования УНУ:

- Исследования тонкой структуры материалов, в том числе гетерогенных и наноструктурированных (перспективные стали и сплавы, дисперсионно твердеющие и дисперсно-упрочненные оксидами стали, сплавы на основе V, Ti, модельные бинарные сплавы типа Fe-Cr, микропровода, оксидные пленки на поверхности металлов и т.д.);

- Анализ радиационной стойкости перспективных реакторных и термоядерных конструкционных материалов с применением облучения пучками тяжелых ионов и последующего атомно-масштабного анализа перестройки структурно-фазового состояния облученных материалов;
- Исследования модельных сплавов в условиях воздействия термических и радиационных полей;
- Исследования наноструктурных изменений материалов, при модификации приповерхностных слоев и создания наноструктурированных областей с использованием ионных пучков;
- Определение наличия дефектов вакансионного типа (вакансий, дивакансий, вакансионных комплексов и т.д.) в кристаллических материалах, либо свободного объема в молекулярных средах (например, в полимерах);
- Определение констант скорости химических реакций первичных радиолитических продуктов на ранней стадии процесса радиолиза среды;
- Изучение морфологии поверхностей, объектов на подложках, например, наночастиц, биологических объектов и др.

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Широкое применение методы атомно-зондовой томографии (АЗТ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) нашли при анализе наноструктурированных сталей, макроскопические свойства которых определяются развитой наноструктурой. Проведены исследования наномасштабного состояния ряда дисперсно-упрочненных оксидами ферритно-мартенситных сталей ODS Eurofer, ДУО ЭК-181, ДУО ЭП-450. Получена детальная информация о наноструктуре ДУО сталей с различным содержанием хрома, легированных ванадием и титаном [1-3]. Обнаружена высокая плотность (~ 5×10^{23} $м^{-3}$) наноразмерных (2-4 нм) кластеров в исходном состоянии дисперсно-упрочненной оксидами Y_2O_3 стали ODS Eurofer. Впервые исследован состав этих кластеров и показано, что они состоят из атомов иттрия, кислорода, ванадия и азота. Проведено детальное исследование наноструктуры ДУО сталей ODS 13.5Cr с различным содержанием титана: ПЭМ анализ оксидных включений и АЗТ анализ нанокластеров, содержащихся в этих материалах).

Проведены исследования ферритно-мартенситных сталей Eurofer 97 и ODS Eurofer, облученных в реакторе БОР-60 [1,4]. Впервые изучено изменение наноструктуры стали ODS Eurofer при реакторном облучении до дозы 32 сна при 330 °C и показано, что после облучения в стали ODS Eurofer имеются кластеры, существенно отличающиеся по составу от кластеров в исходном состоянии, в то время как размер и плотность близки к соответствующим значениям в исходном состоянии. Обнаруженное изменение состава твердого раствора указывает на частичное растворение включений оксидов иттрия, упрочняющих материал. Показано, что реакторное облучение при 330 °C до повреждающей дозы 32 сна ферритно-мартенситной стали Eurofer 97 приводит к распаду твердого раствора и формированию предвыделений a’ фазы, обогащенной не только Cr, но и Mn, Si. Обнаружена сильная пространственная корреляция в расположении атомов Cr и Mn, указывающая на важную роль марганца в распаде твердого раствора под облучением. Показано, что обнаруженные предвыделения вносят значительный вклад в радиационное упрочнение этого материала.

Проведены исследования корпусных сталей реакторов ВВЭР-440 поле реакторного облучения при 270 °C, восстановительного отжига при 475 °C и повторного реакторного облучения [5, 6, 7]. Методами томографической атомно-зондовой микроскопии получены данные о наноразмерных предвыделениях, образующихся в материале сварного шва корпуса реактора ВВЭР-440 при реакторном облучении с повышенной плотностью потока нейтронов в условиях первичной эксплуатации и эксплуатации после восстановительного отжига, исследован состав радиационно- индуцированных нанокластеров и распределение

меди и фосфора в кластерах, получены детальные данные о составе дискообразных карбидов. Впервые выявлены закономерности влияния плотности потока нейтронов на состав и количество кластеров, формирующихся при первичном облучении материала сварного шва корпуса ВВЭР-440 и после восстановительного отжига. В условиях быстрого набора дозы, в 10 раз превышающего эксплуатационные условия, установлено: - формирующиеся при первичном облучении кластеры имеют в два раза меньшее значение концентрации обогащающих элементов, чем в материале темплетов, вырезанных из корпуса реактора; - при облучении материала после восстановительного отжига формируется новая генерация меднообогщенных кластеров, в то время как в темплетах они не были обнаружены.

Проведены исследования по отработке имитационных экспериментов по облучению тяжелыми ионами образцов для атомно-зондовой томографии [8] и образцов для просвечивающей электронной микроскопии [9-10] на ускорителе ионов ТИПр-1 (ИТЭФ) и его вакуумно-дуговом источнике ионов. В настоящее время полностью подготовлены эксперименты по облучению образцов различными ионами металлов (Fe, Ti, V) на выходе ускорителя ТИПр-1 с энергиями 100 кэВ/нуклон и на специализированном стенде СОРМАТ на основе вакуумно-дугового источника ионов металлов с энергиями 40-75 кэВ/ заряд (в основном вторая зарядность). Диапазон доступных температур облучения от комнатной до 500 °С.

Проведены атомно-зондовые исследования образцов ферритно-мартенситных сталей Eurofer 97, ODS Eurofer, ЭК-181, облученных тяжелыми ионами при комнатной температуре [11-15]. При облучении образцов стали ODS Eurofer тяжелыми ионами выявлены две составляющие процесса деградации наноструктуры дисперсно-упрочненной оксидами стали: выход ванадия и азота из состава кластеров под воздействием каскадообразующего облучения и приход иттрия и кислорода из твердого раствора в кластеры. Впервые показано, что в процессе облучения стали ЭК-181 ионами железа до повреждающей дозы 10 сна происходит перераспределение элементов и изменение состава, размеров и количества наноразмерных Cr-V-N кластеров, упрочняющих материал после традиционной термической обработки, причем увеличение размера кластеров под воздействием каскадообразующего облучения сопровождается снижением в них концентрации ванадия, хрома и азота.

Методами АЗТ изучен распад твердого раствора сплава Fe-22%Cr при термическом старении при 500 °С и последующем облучении ионами железа при комнатной температуре [16-18]. Проанализирована атомно-масштабная кинетика формирования предвыделений а’ фазы при термическом старении и влияние на обнаруженные предвыделения низкотемпературного каскадообразующего облучения.

Проведены исследования методами ПЭМ и АЗТ образцов облученных тяжелыми ионами: ДУО сталей ODS Eurofer, ODS 13.5Cr и ODS 13.5Cr 0.3Ti при комнатной температуре и 300 °С до дозы 3 сна [19]. Показано, что каскадообразующее облучение при низких температурах приводит к растворению крупных оксидов и росту наноразмерных предвыделений и кластеров).

Исследована перестройка структурно-фазового состояния титанового сплава Ti-5Al-4V-2Zr - перспективного материала корпусов транспортируемых водо-водяных энергетических реакторов - с одновременным применением методик ПЭМ и АЗТ для облученных ионами титана образцов при температуре 260 °С до дозы 1 сна [20, 21]. Показано, что каскадообразующее облучение в этом случае приводит к образованию высокой плотности обогащенных ванадием наноразмерных предвыделений в альфа-фазе сплава.

Позитронная аннигиляционная спектроскопия как метод исследования конденсированных сред, а также быстропротекающих внутритрековых процессов радиолиза, развивается в ИТЭФ, начиная с 1970-х годов. К наиболее важным результатам, полученных с помощью аннигиляции позитронов, можно отнести следующее:

1) определение концентрации квазисвободных электронов в металлах и сплавах, а также соответствующих энергий Ферми. Изучение характера экранирования e+ электронами проводимости [22]; 2) оценка концентрации точечных дефектов вакансионного типа в кремнии [23]; 3) установление механизма образования атома позитрония в молекулярных средах – путем комбинации термализованного позитрона с одним из квазисвободных трековых электронов в конце трека e+. Выявление общности механизмов образования атома позитрония, мюония и радиолитического водорода [22]; 4) обнаружение в жидких средах квазисвободного атома позитрония, предшественника равновесного пузькового состояния позитрония. Получена оценка времени его локализации 50-100 пс. Это время определяется поиском предсуществующей ловушки (нанопузырька) в жидкости [25]; 5) показано, что атом ортопозитрония принимает участие во внутритрековых окислительно-восстановительных реакциях с короткоживущими радиолитическими продуктами, образующимися в треке e+ [26]; 6) получено экспериментальное доказательство существования термализованного атома позитрония в пористом кремнии [27].

Изменение морфологии поверхности монокристаллического кремния под воздействием потоков высокоэнергетичных протонов и ионов углерода исследовалось методами сканирующей зондовой микроскопии [28-30].

Отдельно стоит отметить работу коллектива по разработке прибора ПАЗЛ-3D [31] и методик исследования материалов на нем [31, 32]. Разработка нового прибора и методики исследования материалов на нем позволяет с высокой точностью исследовать наноразмерные особенности в широком спектре материалов.

1. С.В. Рогожкин, А.А. Алеев, А.Г. Залужный, Н.А. Искандаров, А.А. Никитин, P. Vladimirov, R. Lindau, A. Moslang. Томографическое атомно-зондовое исследование наномасштабных особенностей дисперсно-упрочненной стали ODS EUROFER в исходном состоянии и после облучения нейтронами. Физика металлов и металловедение, 2012, Т. 113, С. 104-112
2. Рогожкин С.В., Орлов Н.Н., Никитин А.А., Алеев А.А., Залужный А.Г., Козодаев М.А., R. Lindau, A. Moslang, P. Vladimirov, Исследование наноструктурного состояния 13.5% Cr ДУО стали при вариации содержания титана, Перспективные материалы, 2014, № 12 с. 38-44.
3. С. В. Рогожкин, А. А. Богачев, Д. И. Кириллов, А. А. Никитин, Н. Н. Орлов, А.А Алеев, А. Г. Залужный, М. А. Козодаев. «Влияние легирования титаном на микроструктуру дисперсно¬упрочненной оксидами 13.5% хромистой стали». 2014 г. Физика металлов и металловедение, 2014, том 115, № 12, с. 1328-1335.
4. С. В. Рогожкин, А. А. Никитин, А. А. Алеев, А.Б. Германов, А. Г. Залужный, Атомно-зондовые исследования радиационно-индуцированных сегрегаций в ферритно-мартенситной стали Eurofer97, облученной в реакторе БОР-60. Перспективные материалы, 2012, №5 с. 45-52.
5. С.В. Рогожкин, А.А. Никитин, А.А. Алеев, А.Г. Залужный, А.А Чернобаева, Д.Ю. Ерак, Я.И. Штромбах, О.О. Забусов. Исследование тонкой структуры материала сварного шва с высоким содержанием фосфора корпуса реактора ВВЭР-440 после облучения, отжига и повторного облучения. Ядерная физика и инжиниринг, 2013, Т. 4, С. 73-82.
6. A. Kryukov, Debarberis, A. Ballesteros, V. Krsjak, R. Burcl, S.V. Rogozhkin, A.A. Nikitin, A.A Aleev, A.G. Zaluzhnyi, V.I. Grafutin, O. Ilyukhina, Yu.V. Funtikov, A. Zeman. Integrated analysis of WWER-440 RPV weld re-embrittlement after annealing. Journal of Nuclear Materials, 2012, V. 429, P. 190-200.
7. Zeman, A. Chernobaeva, V. Grafutin, S. Rogozhkin, L. Debarberis, A. Ballesteros, D. Erak, A. Nikitin. Microstructure response of WWER-440 reactor pressure vessel weld

material after irradiation and annealing treatment, ASTM Special Technical Publication. 2013, 1547 STP, Code 96218, P. 85-108.
8. Р.П. Куйбида, Б.Б. Чалых, В.Б. Шишмарев, Н.Ю. Грачев, АД. Фертман, А.А. Алеев, А.А Никитин, Н.Н. Орлов, С.В. Рогожкин, Т.В. Кулевой. Имитационный эксперимент по излучению радиационной стойкости реакторных материалов на инжекторе ускорителя ТИПр-1. Вопросы атомной науки и техники, серия Ядерно-физические исследования, 2012, Т. 4, С. 188-190.
9. Г.Н. Кропачев, А.И. Семенников, Р.П. Куйбида, И.А. Стоякин, Б.Б. Чалых, С.В. Плотников, С.В. Рогожкин, А.А. Алеев, А.А. Никитин, Н.Н. Орлов, Д.Н. Селезнев, Т.В. Кулевой. Исследование динамики пучка ионов железа второй зарядности в канале вывода пучка линейного ускорителя тяжелых ионов ТИПр-1 с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. Ядерная физика и инжиниринг, 2012, Т. 3, С. 246-251.
10. Р.П. Куйбида, Т.В. Кулевой, Б.Б. Чалых, А.И. Семенников, Г.Н. Кропачев,И.А Стоякин, А.О. Черница, АД. Фертман, А.А. Алеев, А.А. Никитин, Н.Н. Орлов, С.В. Рогожкин. Настройка канала вывода ускорителя ТИПР-1 для имитационных экспериментов по изучению радиационной стойкости реакторных материалов. Вопросы атомной науки и техники, серия Ядерно-физические исследования, 2012, Т.4, С. 68-70.
11. С. В. Рогожкин, А. А. Алеев, А. Г. Залужный, Р. П. Куйбида, Т. В. Кулевой, А. А. Никитин, Н. Н. Орлов, Б. Б. Чалых, В. Б. Шишмарев. Исследование влияния тяжелоионного облучения на наноструктуру перспективных материалов ядерных энергетических установок. Физика металлов и металловедение, 2012, Т. 113, С. 212-224.
12. С. В. Рогожкин, А. А. Алеев, А. Г. Залужный, Р. П. Куйбида, Т. В. Кулевой, А. А. Никитин, Н. Н. Орлов, Б. Б. Чалых, В. Б. Шишмарев. Томографическое атомно-зондовое исследование эволюции наноструктуры дисперсно-упрочненной оксидами стали ODS Eurofer под воздействием тяжелоионного облучения. Ядерная физика и инжиниринг, 2012, Т. 3, 373-379
13. Рогожкин С.В., Искандаров Н.А., Алеев А.А., Залужный А.Г., Куйбида Р.П., Кулевой Т.В., Чалых Б.Б., Леонтьева-Смирнова М.В., Можанов Е.М. Исследование влияния облучения ионами Fe на наноструктуру ферритно-мартенситной стали ЭК-181, Перспективные материалы. 2013. № 2. С. 36-41.
14. Рогожкин С.В., Кулевой Т.В., Искандаров Н.А., Орлов Н.Н., Чалых Б.Б., Алеев А.А., Грачев Н.Ю., Куйбида Р.П., Никитин А.А.,. Фертман А.Д, Шишмарев В.Б. Имитационный эксперимент по изучению радиационной стойкости перспективной ферритно-мартенситной стали, упрочненной дисперсными включениями. Атомная энергия. 2013. Т. 114. С. 12-16.
15. С.В. Рогожкин, Н.Н. Орлов, А.А. Алеев, А.Г. Залужный, М.А Козодаев, Р.П. Куйбида, Т.В. Кулевой, А.А. Никитин, Б.Б. Чалых, R. Lindau, A. Moslang, P. Vladimirov. «Перестройка наноструктуры стали ODS Eurofer после облучения до дозы 32 сна». Физика металлов и металловедение 2015, Т. 116, №1, С. 76-82.
16. Рогожкин С.В., Корчуганова О.А., Алеев А.А., Кинетика зарождения a’ фазы при термическом старении сплава Fe-22%Cr, Перспективные материалы, 2015, № 12, С. 34-39.
17. Рогожкин С.В., Корчуганова О.А., Алеев А.А., Кинетика роста и коагуляции a’ фазы при термическом старении сплава Fe-22%Cr, Перспективные материалы, 2016, №2, С. 17-22.
18. Korchuganova O, Thuvander M, Aleev A, Rogozhkin S, Boll T, Kulevoy T, Microstructural evolution of Fe-22%Cr model alloy under thermal ageing and ion irradiation conditions studied by atom probe tomography. Journal of Nuclear Materials, 2016, V. 477, P. 172-177

19. S. Rogozhkin, A. Bogachev, O. Korchuganova, A. Nikitin, N. Orlov, A. Aleev, A. Zaluzhnyi, MXozodaev, T. Kulevoy, B. Chalykh, R. Lindau, A. Moslang, P. Vladimirov, M. Klimenkov, M. Heilmaier, J. Wagner, S. Seils. Nanostructure evolution in ODS steels under ion irradiation. Journal of Nuclear Materials and Energy. 2016, V. 9, P. 66-74.
20. Леонов В. П., Счастливая И. А., Рогожкин С. В., Никитин А. А., Орлов Н. Н., Козодаев М. А., Васильев А. А., Орехов А. С. Исследование наноструктуры опытного титанового сплава композиции Ti-5Al-4V-2Zr, Вопросы материаловедения, №3(87), 2016 с. 32-49.
21. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Орлов Н.Н., Кулевой Т.В., Федин П.А., Корчуганова О.А., Козодаев М.А., Васильев А.Л., Орехов А.С., Колобылина Н.Н., Леонов В.П., Счастливая И.А., Микроструктура титанового сплава Ti-5Al-4V-2Zr в исходном состоянии и после облучения ионами титана. Перспективные материалы, 2016, №12, с. 5-15.
22. В.И. Графутин, Е.П. Прокопьев. УФН. 2002. Т. 172(1). С.67-83.
23. Р. Бурцл, В.И. Графутин, О.В. Илюхина, Г.Г. Мясищева, Е.П. Прокопьев, С.П. Тимошенков, Ю.В. Фунтиков. Физика твердого тела, 2010, Т. 52(4), С. 651-655.
24. V.M. Byakov, V.I. Grafutin. Radiation Physics and Chemistry, 1986. V. 28(4), P. 1-18.
25. D.S. Zvezhinskiy, M. Butterling, A. Wagner, R. Krause-Rehberg, S.V. Stepanov. Journal of Physics: Conference Series, 2013. V.443, 012057 (4 pages).
26. S.V. Stepanov, V.M. Byakov, D.S. Zvezhinskiy, G.Duplatre, R.R. Nurmukhametov, P.S. Stepanov. Advances in Physical Chemistry, 2012. V. 2012, Article ID 431962, 17 pages.
27. О.М. Бритков, С.А. Гаврилов, В.И. Графутин, В.В. Калугин, О.В. Илюхина, Г.Г. Мясищева, Е.П. Прокопьев, С.П.Тимошенков, Ю.В. Фунтиков Химия высоких энергий. 2007. Т.41(1). С.1-6.
28. Affolder A., Aleev A., Allport P. P., Andricek L., Artuso M., Balbuena J.P., Barabash L., Barber T., Barcz A., Bassignana D., et al., Silicon detectors for the sLHC. NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, 2011, V. 658, 1, P. 11-16.
29. A.A. Aleev, Yu.V. Polovinkina, M.A. Kozodaev, O.N. Makeev, S.V. Rogozhkin, A.G. Zaluzhnyi, Radiation-induced structure modification in monocrystalline silicon under high-energy ion irradiation, 10th RD50 - Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders, Vilnius, Lithuania, 3-6 June, 2007, http://rd50.web.cern.ch/rd50/10th%2Dworkshop/.
30. T.S. Balashov, A.A. Golubev, M. Kozodaev, S.V. Rogozhkin, A.D.Fertman, V.I. Turtikov, A.G. Zaluzhnyi, Radiation-induced structure modification in monocrystalline silicon by high-energy carbon ions, Micro- and Nanoelectronics, Proceedings of SPIE (SPIE, Bellingham, WA, 2006), v. 6260, 626008.
31. Рогожкин С.В., Алеев А.А., Лукьянчук А.А., Шутов А.С., Разницын О.А., Кириллов С.Е. Прототип атомного зонда с лазерным испарением // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 3. С. 129-134 [S. V. Rogozhkin, A. A. Aleev, A. A. Lukyanchuk, A. S. Shutov, O. A. Raznitsyn, and S. E. Kirillov An Atom Probe Prototype with Laser Evaporation // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 60. N 3. P. 428-433]
32. Разницын О.А., Лукьянчук А. А., Шутов А.С., Рогожкин С. В., Алеев А. А. Оптимизация параметров анализа материалов методами атомно-зондовой томографии с лазерным испарением атомов // Масс-спектрометрия. 2017. Т. 14, № 1. С. 33-39

ПЕРЕЧЕНЬ ОБЪЕКТОВ В СОСТАВЕ УНУ

НАИМЕНОВАНИЕ	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	СТРАНА	ГОД ВЫПУСКА	КОЛИЧЕСТВО ЕДИНИЦ
Атомно-зондовый томограф ECOTAP Назначение, основные характеристики Атомно-зондовая томография уникальная методика, позволяющая получать информацию об особенностях материалов с атомарным разрешением и определением химической природы каждого испаренного атома. Суть данного метода заключается в последовательном испарении атомов с поверхности образца под воздействием электрического поля и последующим детектированием испаренных ионов. Основные технические характеристики установки: • рабочий вакуум $(5\div7)\times10^{-10}$ Торр; • температура образца 15-80 K; • размер исследуемой области до $20\times20\times500$ нм^3; • количество зарегистрированных атомов $(1\div10)\times10^6$ атомов; • разрешение по массе (M/ΔM) более 600; • латеральное разрешение ~2 Å, вглубь материала – менее 1 Å.	CAMECA	Франция	2001	1
Атомно-зондовый томограф ПАЗЛ-3D Назначение, основные характеристики Прототип атомного зонда с лазерным испарением позволяет проводить атомно-зондовые исследования широкого спектра материалов. Для испарения используются импульсы лазерной системы. Прототип позволяет определять элементный состав образца и трехмерную структуру образца. Основные технические характеристики установки: • рабочий вакуум $(5\div7)\times10^{-10}$ Торр; • температура образца 20-80 K; • размер исследуемой области до $100\times100\times1000$ нм^3; • разрешение по массе (M/ΔM) 400 -	ИТЭФ	Россия	2014	1

НАИМЕНОВАНИЕ	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	СТРАНА	ГОД ВЫПУСКА	КОЛИЧЕСТВО ЕДИНИЦ
1000; • латеральное разрешение 3 Å, вглубь материала менее 1 Å • чувствительность 10-100 ppm; • скорость сбора данных до 1000 атомов/сек;				
Сканирующий зондовый микроскоп MULTIMODE NANOSCOPE III (VEECO) Назначение, основные характеристики Используя различные измерительные компоненты, система позволяет проводить исследования топографии поверхности, шероховатости, распределения частиц по размерам и высоте и т. д. Имеются возможности проведения комплексных исследований различных образцов на площади от 1 нм х 1нм до 150 мкм х 150 мкм, с разрешением до 1 нм для АСМ, вплоть до атомного разрешения для СТМ. **Режимы работы:** Туннельный, контактный АСМ, полуконтактный АСМ; **Дополнительные режимы:** более двадцати: AFM-виброметодики; STM- и AFM- литография, STM-спектроскопия, люминесценция и спин-поляризация, анализ физических свойств - электропроводность, эл. потенциалы и ёмкость, намагниченность, упругость, трение, вязкость, адгезия, теплопроводность, пьезо-ферро-модули; **Два сменных сканера:** 150×150×5 мкм — сканер J 0.5×0.5×0.5 мкм — сканер А **Размер образцов:** до 1,5 см в диаметре **Разрешение:** СТМ режим: 10 А (сканер J), атомарное (сканер А); АСМ режим: 0.3 нм; **Условия работы**:	Digital Instruments – Veeco Instruments GmbH	США	2001	1

НАИМЕНОВАНИЕ	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	СТРАНА	ГОД ВЫПУСКА	КОЛИЧЕСТВО ЕДИНИЦ
учебная аудитория или научная лаборатория, допустимость сборки-разборки, питание 220В 3Вт **Контроллер:** NanoScope IIIa. Разрешение перемещения по каждой из 3-х координат составляет 16 бит, максимальный размер кадра 512x512 точек. **Оптическая система:** Высокоразрешающая (менее 2 мкм) оптическая система позволяет наблюдать область сканирования и контролировать процесс позиционирования образца. • Наблюдение ведется «сверху вниз» • Подсветка по оптоволокну • Автоматическая подстройка яркости • Возможность трансляции видеосигнала, как в компьютер, так и на отдельный монитор • Перемещение микроскопа в плоскости XY **Опции программного обеспечения**: сканирование, кривые подвода, двух/трехмерные кадры, выбор палитр, измерение размеров по сечениям, процентильные и матричные обработки; анализ шероховатостей; Фурье, корреляционный, фрактальный, морфологический и гранулометрический анализы; **Комплектация**: Сменные сканеры; АСМ-головка; СТМ-головка; держатели кантилеверов для АСМ-головки; блок управления с блоком питания, шнурами и программным обеспечением; оптическая система.				

НАИМЕНОВАНИЕ	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	СТРАНА	ГОД ВЫПУСКА	КОЛИЧЕСТВО ЕДИНИЦ
Сканирующий мульти-микроскоп СММ-2000 Назначение, основные характеристики Микроскоп СММ-2000 – мультирежимный, он имеет и оба базовых режима - STM и AFM, и более 20 дополнительных режимов исследования физических свойств образцов. Микроскоп позволяет достигать чрезвычайно высокого разрешения до 0.1 Ангстрем. **Базовые режимы:** сканирующая туннельная микроскопия (STM) и атомно-силовая микроскопия (AFM) **Дополнительные режимы:** более двадцати: AFM-виброметодики; STM- и AFM- литография, STM-спектроскопия, люминесценция и спин-поляризация, анализ физических свойств - электропроводность, эл. потенциалы и ёмкость, намагниченность, упругость, трение, вязкость, адгезия, теплопроводность, пьезо-ферро-модули; **Разрешение:** 0.1 А (атомарное) в режиме STM, 0.1А / 5-20А в режиме AFM по высоте / латерали; **Разрешение в дополнительных режимах:** 5-100А, в зависимости от зонда, физики процесса и образца; **Два сменных сканера:** поля 1.5мкм/1.5мкм/0.25мкм и 20мкм/20мкм/2.5 мкм; **Размер образцов:** до 40мм/25мм/15мм, подвод / позиционирование образца на 20мм / 2ммс шагом до 1нм; **Условия работы**: учебная аудитория или научная лаборатория, допустимость сборки-разборки, питание 220В 3Вт **Опции программного обеспечения**: сканирование, кривые подвода и ВАХ,	ПРОТОН-МИЭТ	Россия	**2012**	3

НАИМЕНОВАНИЕ	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	СТРАНА	ГОД ВЫПУСКА	КОЛИЧЕСТВО ЕДИНИЦ
двух/трехмерные кадры, выбор палитр, измерение размеров по сечениям, процентильные и матричные обработки; поточечная коррекция, анализ шероховатостей ISO; Фурье, корреляционный, фрактальный, морфологический и гранулометрический анализы; **Комплектация**: головка микроскопа с виброподвеской, лазерным датчиком и сканером; блок управления с блоком питания, шнурами и программным обеспечением; набор ЗИП со вторым сканером и запасными зондами				
Профилометр модели 130 Назначение, основные характеристики Профилометр модели 130 предназначен для измерения 28 параметров шероховатости наружных и внутренних поверхностей и 4 параметров волнистости (пазы, отверстия) поверхностей, сечения которых в плоскости измерения представляют собой как прямые, так и изогнутые по радиусу линии (шарики, валы и т.д.), с измерением этого радиуса. Чувствительность индуктивного датчика профилометра модели 130 имеет рекордную величину в 0.002 мкм, что позволяет описывать рельеф неровностей высотой от 0.005 мкм. Входящий в комплект стандартный датчик имеет диапазон 250 мкм, радиус опоры 125 мм, радиус острия алмазной иглы 10 мкм с длительным сроком службы, не царапающее измеряемую поверхность усилие 4 мН, позволяет работать внутри отверстий диаметром более 3 мм на глубине до 20 мм, а внутри отверстий диаметром более 10 мм – на глубине до 100 мм. Дополнительно могут быть поставлены безопорный датчик для	ПРОТОН-МИЭТ	Россия	2012	1

НАИМЕНОВАНИЕ	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	СТРАНА	ГОД ВЫПУСКА	КОЛИЧЕСТВО ЕДИНИЦ
снятия формы (с вычислением радиуса), датчик для работы с мягкими материалами (дерево, пластик) с радиусом острия иглы 20 мкм, а также оперативно разработанные под различные специальные применения другие варианты датчиков. **Диапазон работы:** 5...14 класс по ГОСТ 2789, степень точности 1, тип стационарный / переносной **Трассирование:** длина 0.5..12.5мм, точность до 0.1мкм, скорость 0.5, 1, 2 мм/с, отсечка 0.08..8мм **Стандартный зонд:** игла 10 мкм, усилие 4 мН, опора 125мм, отв.3мм/глуб.20мм, отв.10мм/глуб.100мм **Список параметров:** Класс шероховатости, Ra, Rz, Rq, Rmax, Ry, Rp, Rv, Rm, Rpk, Rk, Rvk, S, Sm, p, tp, tp1, tp2, Δa, Δq, L0, l0, λa, λq, D, Dp, r, Q, Wt, Wa, Wq, Swm **Диапазоны/точность:** 0.012..50мкм /2% (Ra,Rq); 0.025..125мкм /3% (Rp,Rv); 0.05..250мкм /3% (Rz,Rmax); 10…1600мкм / 2% (S, Sm); 0.01..30град (Δa, Δq); 1..100 /8% (tp) **Компьютер:** от Pentium-266 с Windows 98 до современных компьютеров с Windows 7 **Комплектация:** датчик, мотопривод, стойка с призмой, электроника, программа, мера, паспорт **Питание и вес:** питание от компьютера, не более 20Вт; вес в упаковке без компьютера 17 кг				
Позитронный аннигиляционный спектрометр ВРАФ Назначение, основные характеристики Регистрация временного распределения аннигиляционных фотонов (**ВРАФ**). Является неразрушающим методом изучения структуры вещества,	ИТЭФ	Россия		1

НАИМЕНОВАНИЕ	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	СТРАНА	ГОД ВЫПУСКА	КОЛИЧЕСТВО ЕДИНИЦ
использующего позитрон в качестве зонда. Суть метода состоит в измерении времени жизни каждого имплантированного в образец e+. Спектрометр **ВРАФ** собран из блоков наносекундной электроники фирмы ORTEC и имеет разрешающее время 240 пс. Облучение позитронами образцов исследуемых материалов производится с использованием источников на основе β^+-активных изотопов Na-22 (приобретен в iThemba LABS http://www.tlabs.ac.za/ в ЮАР в 2014 г) и Ti-44.				
Просвечивающий электронный микроскоп JEOL 1200 Назначение, основные характеристики Основные параметры установки: • Ускоряющее напряжение от 40 до 120 кэВ. • Термоэлектронный источник электронов (LaB_6). • Точечная разрешающая способность прибора не хуже 0,4 нм. • Разрешение по линиям не хуже 0,2 нм. • Разрешение проекционной линзы 4 нм. • Максимальное увеличение избранной области 500000 раз. Основные возможности: микроструктурный и дифракционный анализ пленок проводящего не магнитного не органического материала толщиной не более 100 нм. Основные направления использования установки: 1. Исследование микроструктуры и морфологии конструкционных материалов. 2. Контроль качества образцов для атомно-зондовой томографии.	JEOL	Япония	1986	1

НАИМЕНОВАНИЕ	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	СТРАНА	ГОД ВЫПУСКА	КОЛИЧЕСТВО ЕДИНИЦ
Установка для электрохимического травления TenuPol-5 Назначение, основные характеристики Автоматическая установка электролитического утонения образцов для электронной микроскопии со встроенной функцией сканирования параметров процесса и возможностью установки дополнительных параметров для новых материалов. Основные параметры установки: Размеры обрабатываемых образцов: диаметр 12-21 мм при максимальной толщине 1,0 мм; диаметр 3,0 мм при максимальной толщине 0,5 мм; диаметр 2,3 мм при максимальной толщине 0,5 мм. Напряжение на образце: 0-100В (шаг 0,1 В). Температура электролита: от -50 ºС до 35 ºС (охлаждение с помощью жидкого азота). Основные направления использования установки: 1. Электролитическое утонение образцов для электронной микроскопии. 2. Сканирования параметров процесса и подбор режима травления (при наличии системы охлаждения/нагрева можно контролировать постоянную температуру электролита в пределах ±1 ºС).	Struers	Дания	2008	1
Шлифовально-полировальный станок с регулируемой скоростью вращения LaboPol-5 Назначение, основные характеристики Основные параметры установки: • Скорость вращения диска 50-500 об/мин. • Подача воды на шлифовальный круг.	Struers	Дания	2010	1

НАИМЕНОВАНИЕ	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	СТРАНА	ГОД ВЫПУСКА	КОЛИЧЕСТВО ЕДИНИЦ
• Требуется подключение воды и слива. • Магнитный диск диаметром 200 мм для крепления шлифовальной бумаги. • Держатель AccuStop для подготовки заготовок ПЭМ образцов. Контролируемое, с точностью до 10 мкм, утонение образцов. • Шлифовка и полировка образцов SiC шлифовальной бумагой. • Полировка образцов кремниевой суспензией с размером абразивных частиц 40 нм. Основные направления использования установки: 1. Механическое утонение ПЭМ образцов. 2. Подготовка поверхности ПЭМ образцов к облучению тяжелыми ионами на ускорителе. 3. Подготовка образцов к проведению различных исследований морфологии поверхности и механических свойств: наноиндентирование, сканирующая туннельная и атомно-силовое исследование и др.				
Электроэрозионный станок ВЭСТ-240-3 с ЧПУ ДГТ 735 Назначение, основные характеристики Предназначен для автоматического изготовления деталей сложной формы из электропроводных материалов с вертикальной (цилиндрической) образующей. Оснащен системой числового программного управления (ЧПУ) с компьютерным управлением и генератором технологического тока, позволяющим производить обработку в обыкновенной водопроводной воде. Данный станок погружного типа, что позволяет в отличие от струйных	ООО «ЭЛГЕС»	Россия	2014	1

НАИМЕНОВАНИЕ	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	СТРАНА	ГОД ВЫПУСКА	КОЛИЧЕСТВО ЕДИНИЦ
станков эффективно обрабатывать контуры в деталях полых труб, выполнять контурную резку многослойных плит с пустотами между слоями и т.п. Электроэрозионный станок оснащен системой подготовки управляющих программ, которая обеспечивает получение управляющих программ непосредственно с чертежа, разработанного в Autodesk AutoCAD. Количество координат 2. Дискретность перемещений 0,1 - 199,99 мкм. Величина перемещения, не более 1000 мм. Интерполяция - линейная, круговая. Скорость интерполяции 2500 - 10000 шаг/сек. Напряжение форсажа шаговых двигателей 40 – 80 В. Ток форсажа шаговых двигателей 1 – 5 А. Гальванически развязанные сигналы ввода – вывода. Количество обрабатываемых сигналов (входных) 9 – 32. Количество выходных сигналов 16. Выходное напряжение коммутации 250 В. Выходной ток коммутации 1 А. Аналоговые выходные сигналы (2) 0 – 10 В. Скорость обмена с ПК 19200 Бод.				

УСЛУГИ

НАИМЕНОВАНИЕ	ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ
Исследования тонкой структуры материалов, в том числе наноструктурированных	Индустрия наносистем

НАИМЕНОВАНИЕ	ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ
Анализ микроскопических причин деградации конструкционных материалов ядерных энергетических установок	Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика
Исследования материалов в условиях воздействия термических и радиационных полей	Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика
Исследования наномасштабных изменений материалов при модификации приповерхностных слоев и создания наноструктурированных областей под воздействием ионных пучков	Индустрия наносистем
Анализ изменений морфологии поверхностей под воздействием высокоэнергетичных воздействий	Индустрия наносистем