

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ФИЗИКА РАДИАЦИОННЫХ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 537.534

ПУЧКОВЫЕ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*М.Ф.Ворогушин, В.А.Глухих, Г.Ш.Манукян, Д.А.Карпов, М.П.Свиньин,
В.И.Энгелько, Б.П.Яценко*

ФГУП НИИЭФА им.Д.В.Ефремова, г.Санкт-Петербург, Россия

В ФДУП НДИЭФА им. Д.В.Ефремова протягом багатьох років розробляються та впроваджуються пучкові та іонно-плазмові технології. Імпульсні електронні пучки застосовуються для підвищення зносостійкості, корозійної стійкості, динамічної міцності матеріалів. Широкоапертурні прискорювачі електронів використовуються для радіаційно-хімічної модифікації полімерних матеріалів. На базі лінійних та високовольтних прискорювачей електронів освоєні промислове виробництво кровельного матеріалу "КРОВЛЕН", двошарової термоусаджуваної полімерної стрічки для захисту підземних газо- та нафтопроводів від корозії, пінного поліетилену та полімерної стрічки адгезивним шаром, стерилізація виробів медичного призначення і таке інше. Для високодозної імплантації та активаційного аналізу розроблені прискорювачі різних сортів іонів. Іонно-плазмові пристрої застосовуються для нанесення на поверхню виробів плівок металів, сплавів та діелектриків.

В ФГУП НИИЭФА им.Д.В.Ефремова в течение многих лет разрабатываются и внедряются пучковые и ионно-плазменные технологии. Импульсные электронные пучки применяются для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, динамической прочности материалов. Широкоапертурные ускорители электронов используются для радиационно-химической модификации полимерных материалов. На базе линейных и высоковольтных ускорителей электронов освоены промышленное производство кровельного материала «КРОВЛЕН», двухслойной термоусаживающейся полимерной ленты для защиты подземных газо- и нефтепроводов от коррозии, вспененного полиэтилена и полимерной ленты адгезивным слоем, стерилизация изделий медицинского назначения и т.д. Для высокодозной имплантации и активационного анализа разработаны ускорители различных сортов ионов. Ионно-плазменные установки применяются для нанесения на поверхность изделий пленок металлов, сплавов и диэлектриков.

In FSUP "NIEFA" during many years beams and ion-plasma technologies are developed and introduced. Pulsed electron beams are used for the increase of wear resistance, corrosion resistance and dynamic strength of materials. Large aperture electron accelerator are used for the radiation-chemical modification of polymer materials. On the base of linear and high-voltage electron accelerator the industrial production of roofing material is adopted; also are developed the production of two-layers thermal-shrinking band for the protection of underground gas and petroleum pipe-line from corrosion, production of foam polyethylene and polymer band by adhesive layer, sterilization of medical instruments. For the high-dose implantation and activation analysis different ions accelerators were developed. Ion-plasma installation are fabricated. Ion-plasma installation are used for the deposition of metal, alloy and dielectric films on the surface.

ПУЧКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1. Модификация материалов воздействием электронными и ионными пучками

Во многих странах разрабатываются и внедряются в промышленное производство пучковые технологии модификации поверхности материалов. Этими технологиями достигается повышение износостойкости, коррозионной стойкости, динамической прочности изделий, полировка поверхности, уменьшение коэффициента трения, удаление отработанных покрытий. Интерес к этим технологиям обусловлен тем, что их применение в промышленности вместо традиционных методов (термообработка в печах, закалка в кислотных и солевых растворах, гальваническое нанесение покрытий) экономит электроэнергию, повышает эффективность производства, уменьшает или исключает экологически

вредные последствия производства. В ряде случаев плазменно-пучковая технология позволяет получать такие структурно-фазовые состояния материалов, которые при традиционных методах воздействия не реализуются.

Проведённые в НИИЭФА совместно с другими российскими и зарубежными организациями исследования позволили определить перспективные направления пучковых технологий модификации материалов. К ним относятся:

- модификация поверхности металлов и сплавов мощными импульсными электронными пучками;
- радиационно-химическая модификация полимерных материалов;
- модификация поверхности материалов ионной имплантацией.

1.1. Модификация поверхности металлов и сплавов мощными импульсными электронными пучками

При воздействии мощных импульсных электронных пучков на материал его слой толщиной порядка длины пробега электронов (в данном материале 10...100 мкм) очень быстро нагревается до температуры фазовых переходов.

По окончании импульса пучка нагретый слой быстро охлаждается процессом теплопроводности в глубину материала. В результате изменяются свойства поверхностного слоя:

- изменяется микроструктура – размер зерна уменьшается от сотен микрон до долей микрона, возможен переход в аморфное состояние;
- изменяется фазовый состав, при этом возможно появление метастабильных фаз и соединений, которые при обычных методах термообработки образоваться не могут;
- гомогенизируется фазовый состав, например, измельчаются и однородно распределяются карбиды в сталях.

Следствием таких изменений является повышение твёрдости, коррозионной стойкости и износостойкости поверхности материалов, уменьшение коэффициента трения, повышение динамической прочности изделий.

Модификация поверхности металлов и сплавов мощными импульсными электронными пучками осуществляется на ускорителях ГЕЗА.

Параметры электронного пучка ускорителей ГЕЗА

Энергия электронов, кэВ	50...400
Ток пучка в импульсе, кА	0,5...1,0
Длительность импульса, мкс	5...250
Диаметр пучка, см	5...10

Импульсная электронно-пучковая модификация поверхности материалов

Скорость нагрева и охлаждения зависит от свойств материала и параметров пучка. Максимальная скорость охлаждения ($10^7\text{--}10^9$ К/с) достигается при так называемом адиабатическом режиме облучения, при котором энергия, вносимая пучком в материал, в течение длительности импульса пучка остается в пределах поверхностного слоя, то есть не выносится в глубину материала процессом теплопроводности.

Повышение коррозионной стойкости лопаток турбин электрогенераторов

Рабочая поверхность лопаток с нанесённым защитным покрытием оплавляется импульсным высокоэнергетическим электронным пучком. При этом в поверхностном слое покрытия толщиной 20...30 мкм изменяется микроструктура и фазовый состав, а сама поверхность становится полированной. В результате скорость диффузии кислорода внутрь защитного покрытия уменьшается в 2...2,5 раза. Срок службы лопаток соответственно увеличивается в 2...2,5 раза.

Изменение микроструктуры и фазового состава поверхностного слоя покрытия существенно улучшает также адгезионные свойства поверхности. Это важно, когда на защитное покрытие наносится дополнительное термобарьерное покрытие, например ZrO_2 . Стойкость термобарьерного покрытия в этом случае повышается более чем на порядок величины.

Удаление защитных покрытий турбинных лопаток

Отработанное покрытие удаляется обработкой поверхности лопатки импульсным электронным пучком. Параметры электронного пучка ускорителя ГЕЗА обеспечивают удаление за один импульс слоя покрытия толщиной более 10 мкм. Пучком диаметром 10 см можно удалить покрытие толщиной 200 мкм со скоростью 100 см²/мин.

Формирование сплавов на поверхности изделий

На поверхность образца каким-либо способом наносится слой материала с заданными свойствами. Затем поверхность обрабатывается импульсным электронным пучком. В результате быстрого плавления, перемешивания и рекристаллизации поверхностного слоя формируется соединение нанесённого материала с базовым. Коррозионная стойкость и износостойкость сформированного сплава существенно выше, чем у базового материала изделия. Толщина модифицированного слоя может существенно превышать толщину нанесённого покрытия.

Вследствие высокой скорости охлаждения расплавленного слоя возможно образование соединений, которые в обычных (равновесных) условиях не образуются, например Cu/Au, Fe/Si, Mo/Cu, Fe/Pb.

Повышение усталостной прочности и жаростойкости материалов, применяемых в авиационной промышленности

Результаты испытаний образцов из сплавов ВТ18У и ВТ8М, обработанных импульсным электронным пучком, показали, что на начальной стадии окисления их жаростойкость возрастает более чем в два раза, усталостная прочность повышается на 20%.

Повышение износостойкости деталей автомобильных двигателей

Исследовано влияние обработки импульсным электронным пучком на износостойкость толкателей клапанов и кулачков распределительного вала автомобильных двигателей. Толщина модифицированного слоя 20 мкм.

Обработка толкателей пучком проводилась после их упрочнения традиционными методами. Износостойкость определялась по потере массы деталей, измеряемой активационной методикой. Продолжительность испытаний – 18 прогонов в двигателе по 2 часа каждый прогон.

Результаты исследований показали, что микротвёрдость рабочих поверхностей толкателей дополнительно повысилась на 30%. Износостойкость толкателей возросла в 4,3 раза, при этом износостойкость кулачков распределительного вала увеличилась

лась в 2,3 раза несмотря на то, что они пучком не обрабатывались.

1.2. Радиационно-химическая модификация полимерных материалов с помощью широкоапертурных ускорителей электронов

Радиационно-химическая модификация полимеров основана на физическом явлении неупругого рассеяния электронов или квантов электромагнитного излучения в облучаемом веществе. Вторичные электроны инициируют процессы, изменяющие структуру полимера.

Используя радиационно-технологические процессы, можно получать многие материалы с улучшенными, а иногда и с качественно новыми свойствами. Например, при радиационной модификации полиэтилена структурирование (сшивка) молекул повышает механическую прочность и термостойкость полиэтилена. Облучённые провода и кабели с полиэтиленовой изоляцией могут эксплуатироваться при более высоких температурах (токовых нагрузках), что даёт совокупный экономический эффект.

Радиационная полимеризация композиций из полиэфирных смол и мономеров позволяет получать высококачественные декоративные и защитные покрытия поверхности деревянных и металлических изделий (без шлифовки и полировки поверхности изделий), а также изделий из пластмасс с невысокой нагревостойкостью. При этом устраняются источники взрыво- и пожароопасности, уменьшается загрязнение окружающей среды, так как не используются легковоспламеняющиеся и летучие растворители. Радиационный процесс отверждения длится секунды вместо часов, энергозатраты уменьшаются на порядок величины.

Радиационно-химическая обработка текстильных материалов придаёт им антимикробные свойства и несминаемость, повышает гигроскопичность. При

радиационной вулканизации резиновых изделий, так же как и при отверждении покрытий, достигается значительная экономия энергоресурсов.

В качестве генераторов электронного пучка используются импульсные широкоапертурные ускорители, высоковольтные ускорители и линейные ускорители.

Для обработки покрытий толщиной до 300 мкм оптимальная энергия электронов на выходе ускорителя 250 кэВ.

Обработка полимерного покрытия электронным пучком является энергосберегающим, ресурсосберегающим и экологически чистым технологическим процессом, так как не используются растворители.

В отличие от традиционных технологий электронно-пучковая технология обеспечивает:

- полимеризацию многослойных покрытий за один цикл обработки;
- более высокую адгезию покрытия к поверхности изделия;
- высокую (около 100 %) степень полимеризации защитной композиции;
- повышение предела прочности защитного покрытия на отрыв и на сдвиг в 2 - 3 раза;
- малое (несколько секунд) время полимеризации (отверждения) покрытия.

Для генерации электронного пучка применяются низкоэнергетичные широкоапертурные ускорители электронов импульсного действия, которые обеспечивают:

- одновременное облучение больших поверхностей;
- повышение скорости транспортёров, перемещающих облучаемый объект.

Ускорители сравнительно просты по конструкции, технологичны в изготовлении, невелики по габаритам и массе. (Табл. 1).

Таблица 1

Широкоапертурные ускорители электронов

Ускоритель	Технические характеристики			
	Энергия электронов, кэВ	Площадь зоны облучения, м ²	Средняя мощность в пучке, кВт	Ток пучка в импульсе, А
SMOL	180	0,45×0,30	2	5
LITTLE-SMOL	200	0,17×0,22	2	1,5
TUR-M	250	2,2×0,3	6	6
BUR	250	1,20×0,18	5	8
EFA-1	250	2,2×0,3	50	10

1.3. Радиационно-технологические процессы с использованием высоковольтных ускорителей

На базе высоковольтных ускорителей освоено промышленное производство кровельного материала "Кровлен", двухслойной термоусаживающейся полимерной ленты для защиты подземных газо- и

нефтепроводов от коррозии, вспененного полиэтилена и полимерной ленты с адгезивным слоем.

Производство кровельного материала с использованием ускорителя "Электрон-10"

Кровельный материал "КРОВЛЕН" для устройства кровель и гидроизоляции зданий изготавлива-

ется по типовой технологии резинового производства, состоящей из следующих операций:

- приготовление резиновой смеси в резиномесителе;
- формирование резиновой ленты на термовальцах;
- придание окончательных размеров ленте с помощью каландра;
- вулканизация ленты двухсторонним облучением электронным пучком;
- рулонирование и упаковка ленты.

Производительность технологической линии – до миллиона квадратных метров в год.

В составе технологического оборудования используется высоковольтный ускоритель «Электрон-10», облучающий ленту одновременно с двух сторон. Ускоритель снабжен индивидуальной защитой.

Основные характеристики ускорителя: энергия электронов 500...700 кэВ; мощность пучка до 50 кВт.

Производство термоусаживающейся полимерной ленты с использованием ускорителя "Электрон-10"

Наилучший способ защиты от коррозии подземных трубопроводов для транспортировки нефти и газа – это обмотка труб снаружи двухслойной термоусаживающейся полимерной лентой. Сторона ленты, прилегающая к поверхности трубы, покрыта герметиком-адгезивом, который выравнивает поверхность трубы при термоусадке ленты. Натяжение усадки – до 20 кг/см.

Технологические операции изготовления двухслойной термоусаживающейся ленты:

- изготовление ленты из полимерной композиции на основе полиэтилена;
- двухстороннее облучение ленты электронным пучком;
- растяжка ленты в туннельной печи;
- нанесение на одну сторону ленты герметика-адгезива;
- намотка ленты в рулон и обрезка кромок.

Производительность технологической линии – до 1500 тонн в год.

Промышленное изготовление термоусаживающейся ленты организовано на предприятиях "Терма" в Санкт-Петербурге и "Гефест" в Ростове-на-Дону.

Производство вспененного полиэтилена с использованием ускорителя "Аврора-5"

Вспененный полиэтилен обладает хорошими тепло- и звукоизолирующими свойствами, широко применяется в строительстве, на транспорте и в бытовых условиях.

Технологические операции изготовления вспененного полиэтилена:

- смешивание предварительно измельченного полиэтилена высокого давления с порообразователем и другими добавками;
- формование листов с помощью экструдера;
- двухстороннее облучение листов электронным пучком;

- вспенивание листов в термокамере при нагревании до высокой температуры;
- охлаждение листов и упаковка.

Производительность технологической линии – до 900 тонн в год.

В составе технологического оборудования используется высоковольтный ускоритель «Аврора-5», облучающий ленту одновременно с двух сторон. Ускоритель снабжен индивидуальной защитой.

Основные характеристики ускорителя: энергия электронов 750 кэВ; мощность пучка до 50 кВт.

Промышленное изготовление вспененного полиэтилена организовано на Ижевском заводе пластмасс.

Производство полимерной ленты с адгезивным слоем с использованием высоковольтного ускорителя

Разработана технология изготовления полимерной ленты с адгезивным слоем (изолянта и скотч). В качестве лент-подложек используются полимерные плёнки промышленного производства на основе ПВХ (для изолянта) и полиолефинов (для скотчей).

В рецептуре адгезивной композиции используются полимер-олигомерные связующие, высококипящие мономеры и добавки целевого назначения, которые не содержат растворителей, отвердителей, других токсичных и летучих веществ.

Самоклеящаяся плёнка образуется в результате полимеризации нанесённой на ленту композиции при облучении последней электронным пучком. Коэффициент использования адгезивов близок к единице.

Для генерации электронного пучка используется высоковольтный ускоритель с регулируемой от 200 до 300 кэВ энергией электронов и мощностью в пучке до 10 кВт. Ускоритель обеспечен индивидуальной радиационной защитой. Производственная площадь технологической линии – 4 м × 10 м.

Преимущества производства самоклеящихся материалов с электронно-пучковой обработкой по сравнению с производством по традиционной технологии (термическая сушка):

- повышение производительности в 1,5 раза;
- снижение энергопотребления в 2 раза;
- экологическая чистота;
- отсутствие растворителей в технологическом процессе.

1.4. Радиационно-технологические процессы с использованием линейных ускорителей электронов

Для реализации радиационно-технологических процессов с использованием пучков электронов и тормозного излучения в НИИЭФА разработаны линейные ускорители на энергию электронов 5...15 МэВ, мощность пучка 5...30 кВт.

Области использования ускорителей:

- электронно-лучевая стерилизация изделий медицинского назначения и лекарственных препаратов;

- электронно-лучевая обработка изделий сложной формы из пластмасс для улучшения свойств изделий;
- радиационная вулканизация резинотехнических изделий, в том числе изделий из силиконовых резин, используемых в космической промышленности;
- производство термоусаживающихся трубок и кабельной продукции;
- очистка дымовых выбросов электростанций и промышленных предприятий от окислов азота и серы;
- стерилизация отходов больничных комплексов перед захоронением отходов;
- стерилизация органических удобрений для агрокомплексов;
- стерилизация древесины.

Излучатели этих ускорителей могут быть установлены как в горизонтальном, так и в вертикальном положениях.

Ускорители снабжены устройствами для сканирования пучка электронов в полосу. Вместо скани-

рующего устройства (или совместно с ним) ускоритель может быть снабжен мишенями для генерирования мощных потоков тормозного излучения. В этом варианте он, в частности, может эффективно использоваться для фотоактивационного анализа рудных проб на золото и сопутствующие элементы.

Ускорители эксплуатируются в комплексе с соответствующим процессу технологическим оборудованием и снабжены компьютерным управлением.

1.5. Модификация поверхности материалов ионной имплантацией

Инжектор тяжелых ионов Т-5010

Инжектор тяжелых ионов применяется:

- для сепарации изотопов;
- для модификации поверхности материалов;
- в установках ионной имплантации;
- для исследований в области физики и техники ионных пучков;
- в материаловедении.

Технические характеристики

Энергия ионов (однозарядные ионы), кэВ	40...50
Максимальный ток пучка, мА	10
Рабочие вещества для ионного источника	газообразные, жидкие, твердые
Нестабильность энергии, %	0,1

Установка "КВАРЦ" для имплантации ионов кислорода

Высокодозная ионная имплантация – это наиболее эффективный способ создания КНД-структур (кремний на диэлектрике), который заключается в формировании скрытого слоя оксида или нитрида в полупроводниках. Ионная имплантация позволяет

получить лучшее кристаллографическое строение приповерхностного слоя, высокую чистоту и однородность состава диэлектрика.

Установка "КВАРЦ" предназначена для создания КНД-структур, которые применяются при изготовлении интегральных схем с высоким быстродействием и повышенной радиационной стойкостью.

Технические характеристики

Рабочее вещество	кислород, азот
Диапазон энергии ускоренных ионов, кэВ	100...250
Ток пучка атомарных ионов на мишени, мА	30
Немоноэнергетичность пучка ионов, %	2
Максимальный диаметр кремниевых пластин, мм	150

Установка "КВАРЦ" состоит из высоковольтного ускорителя ионов кислорода или азота и технологической станции. Пучок ионов из микроволнового источника ускоряется в секционированной ускорительной трубке до энергии 200...250 кэВ, разделяется по массам в электромагнитном сепараторе и фокусируется электромагнитными квадрупольными линзами. В составе технологической станции используется устройство электромагнитной развертки, позволяющее облучать одновременно несколько кремниевых пластин диаметром до 150 мм. Равномерность распределения дозы облучения по площади пластин достигается развёрткой пучка. Нагрев пластины в процессе облучения предотвращает аморфизацию поверхностного слоя пластины.

2. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

С 1970 г. для неразрушающего контроля в НИИ-ЭФА изготовлено более 25-ти линейных ускорителей электронов на энергию 5...16 МэВ. Ускорители используются на заводах атомного энергомашиностроения (Ижорский завод, "Атоммаш"), атомного судостроения (Северодвинск, Комсомольск-на-Амуре), на машиностроительных заводах (Сумы и др.).

На Ижорском заводе с использованием ускорителей проконтролировано более 50-ти комплектов оборудования для блоков атомных и химических реакторов.

В настоящее время внедряются более эффективные, чем радиография, методы контроля. Это интроскопия и томография. На интроскопе, созданном в

НИИЭФА, с детекторной линейкой на кристаллах из вольфрамата кадмия (размером $3 \times 3 \text{ мм}^2$) при соответствующей компьютерной обработке сигналов достигается детальное разрешение контрастных объектов - до 1 мм, а разрешение по плотности - не хуже 1% (сталь толщиной 200 мм, энергия 8 МэВ). Методы томографии используются при контроле валов турбин и электрогенераторов, твердотопливных космических ракет.

По сравнению с радиографией производительность радиометрического контроля увеличивается в десятки раз, так как осуществляется практически в режиме реального времени.

Промышленный радиационный комплекс неразрушающего контроля качества крупногабаритной стальной продукции

Промышленный радиационный комплекс на базе ускорителей электронов УЭЛВ-6-1Д-15, УЭЛВ-10-2Д-40, УЭЛВ-15-2Д-80 предназначен для обнаружения внутренних дефектов в стальных крупногабаритных изделиях (сварных швах, отливках, поковках, прокате и т.д.) толщиной 40...600 мм просвечиванием пучком тормозного излучения. Высокая стабильность параметров и воспроизводимость характеристик пучка позволяет использовать данные

ускорители в промышленной томографии и интроскопии. (Табл. 2).

Комплекс применяется для неразрушающего контроля изделий атомного энергомашиностроения, химической промышленности, в судостроении и в других отраслях промышленности.

На выходе ускорителя установлена мишень для генерирования тормозного излучения, коллиматор, определяющий угол расхождения пучка фотонов от мишени, и ионизационная камера контроля мощности тормозного излучения. Излучатель смонтирован на подвеске, позволяющей изменять положение излучателя относительно контролируемого изделия. Для наведения излучателя на контролируемый участок изделия используется луч лазера.

Управление ускорителем ручное или автоматизированное. Ручное управление производится с пульта управления, автоматизированное – с использованием компьютера, который обрабатывает и архивирует результаты контроля.

Размеры радиационно-защищенного зала зависят от размеров контролируемых изделий. Для обеспечения маневренности относительно изделия излучатель ускорителя может быть установлен на мостовом кране или на электрокаре.

Таблица 2

Радиационные характеристики

Модель ускорителя	Энергия электронов, МэВ	Средняя мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени, Гр/мин	Диаметр поля облучения на расстоянии 1 м от мишени, мм
УЭЛВ-6-1Д-15	6	15	450
УЭЛВ-10-2Д-40	9	40	300
УЭЛВ-15-2Д-80	15	80	210

В настоящее время разрабатываются линейные ускорители нового поколения с использованием современных комплектующих изделий, конструктивных элементов и технологий.

3. АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

В НИИЭФА накоплен большой опыт использования линейных ускорителей электронов для активационного анализа на основе фотоядерных реакций. С 1979 г. несколько ускорителей эксплуатируются на месторождении Мурунтау в Узбекистане для анализа рудных проб на содержание золота и сопутствующих золоту элементов. Аналогичные установки работают в Якутии (Багагай) и в Магадане.

Этот метод, впервые разработанный в России, превосходит по экспрессности и чувствительности ранее использовавшиеся для этой цели промышленные методы анализа:

- порог определения золота в руде 0,4 г/т;
- точность $\pm 10\%$;
- производительность 1200 анализов в сутки.

Если для получения результатов анализа пробирным методом требовалось двое суток, то фотоактивационный метод даёт результат через 1 минуту. Штат лаборантов при этом сократился в 10 раз.

Сравнительно низкая граничная энергия фотонов тормозного излучения (около 8 МэВ) оптимальна для возбуждения изомера золота, излучение которого регистрируется. Для фотоактивационного и нейтроноактивационного анализа на другие элементы используются ускорители электронов на энергию до 30 МэВ, а также ускорители ионов.

Линейный ускоритель ионов УИЛ-2-433

Ускоритель ионов УИЛ-2-433 является главной частью комплекса активационного экспресс-анализа элементного состава материалов. В процессе анализа измеряется либо вторичное излучение (гамма-излучение) или характеристическое рентгеновское излучение вещества, облученного ионами H^+ , либо излучение, активированное нейтронами, испускаемыми мишенью в результате реакции ${}^7_3\text{Li}(p,n){}_4\text{Be}^7$.

В состав комплекса активационного экспресс-анализа входят также камера взаимодействия, быстросрабатывающая измерительная система и система обработки данных.

Технические характеристики ускорителя

Энергия ионов H^+ на выходе ускорителя, МэВ	2
Максимальный средний ток, мА	1
Максимальная средняя мощность в пучке, кВт	2
Масса ускорителя, т	2
Потребляемая мощность (3x380/220 В, 50 Гц), кВт	20

Генераторы нейтронов

Генераторы предназначены в основном для нейтроноактивационного анализа, с помощью которого определяются более 50-ти элементов с чувствительностью до 10^{-5} %.

Генераторы представляют собой ускоритель ионов дейтерия с металло-тритиевой мишенью. Нейтроны генерируются вследствие реакции $T(d,n)He^4$ при взаимодействии ускоренных ионов дейтерия с ядрами трития мишени. При сравнительно низком ускоряющем напряжении (150...300 кВ) генераторы позволяют получать интенсивные потоки нейтронов с энергией 14 МэВ. (Табл. 3).

Таблица 3

Технические характеристики

НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА	Тип генератора		
	НГП-11	НГП-11М	НГ-12-1
Максимальный поток нейтронов, 1/с	2×10^{11}	5×10^{11}	1×10^{12}
Ускоряющее напряжение, кВ	150	175	250
Ток пучка атомарных ионов на мишени, мА	2	5	10
Диаметр пучка на мишени, мм	20	20	30
Диаметр титано-тритиевой мишени, мм	90	90	230
Скорость вращения мишени, об/мин	60	100	500

4. ПРОИЗВОДСТВО КОРОТКОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ

Линейные ускорители электронов и ионов и циклотроны используются для наработки короткоживущих радионуклидов, применяемых в медицине (диагностика и терапия) и в материаловедении.

Многоцелевой циклотрон МГЦ-20

Циклотрон МГЦ-20 предназначен, в частности, для производства радионуклидов и для активационного анализа.

Циклотрон рассчитан на ускорение ионов изотопов водорода и гелия с возможностью регулирования их конечной энергии. При работе на бериллиевую мишень циклотрон становится генератором быстрых нейтронов.

МГЦ-20 позволяет работать как с внутренним, так и с внешним пучком ускоренных ионов. (Табл.4).

Таблица 4

Технические характеристики МГЦ-20

Ускоряемые частицы	Энергия частиц, МэВ (внешний/внутренний пучок)	Ток пучка, мкА (внешний/внутренний пучок)
Протоны	5 - 18 / 2 - 20	50 / 200
Дейтроны	3 - 10 / 1 - 11	50 / 200
Ионы гелия-3	8 - 24 / 4 - 27	25 / 50
Ионы гелия-4	6 - 20 / 2 - 22	25 / 50

Масса электромагнита циклотрона, т	24
Потребляемая мощность (3x380/220 В, 50 Гц) без системы транспортировки пучков, кВт	170

Циклотроны МГЦ-20 для производства радионуклидов используются в С.-Петербурге (РИ АН им. В. Г.Хлопина, НПО "Позитрон", ЦНИРРИ), в Москве, Финляндии, Венгрии, Северной Корее.

Для наработки изотопа йода-123 и позитронно-активных изотопов для позитронно-эмиссионной томографии во всем мире с наибольшей эффективностью используются компактные циклотроны.

В Обнинске и Твери для производства радионуклидов в коммерческих целях используются специализированные циклотроны на 14 и 30 МэВ.

Многоцелевой циклотрон МГЦ-30

Циклотрон на 30 МэВ предназначен для коммерческого производства радионуклидов (модель РИЦ-30).

ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1. Плазменные технологии нанесения покрытий

Установка «УНВП» для напыления на поверхность изделия пленок металлов, сплавов и диэлектриков

Напыление на поверхность изделия пленок металлов, сплавов и диэлектриков производится на магнетронной установке «УНВП», построенной по принципу аксиально-симметричного диодного магнетрона. Покрытие наносится на поверхность изделия в вакууме при распылении материала катода-мишени ионами плазмы магнетронного разряда.

Отработана технология нанесения высокопроводящего и антиэмиссионного покрытия.

Высокопроводящее покрытие (Cu или Ag) наносится на внутреннюю поверхность резонаторов ускоряющей структуры ионных ускорителей, изготовленных из алюминиевого сплава.

Защитное антиэмиссионное покрытие (TiN, ZrC или ZrN) наносится на поверхность электродов ускоряющей структуры в области модуляции, где напряженность электрических ВЧ полей при эксплуатации ускорителя превышает 150 кВ/см.

Изделия с нанесенными покрытиями могут использоваться в производстве:

- оборудования газо- и нефтеперерабатывающего комплекса, продукции машиностроения, приборостроения, микроэлектроники;
- оптических устройств;
- медицинской техники и инструментов;
- элементов ускоряющих структур линейных ускорителей и циклотронов.

Параметры магнетронного разряда:

- режим работы – импульсный;
- частота следования импульсов – 150 Гц;
- скважность – 2;
- амплитуда тока разряда – до 120 А;
- амплитуда напряжения разряда – до 1,2 кВ.

Допустимые габариты изделия для нанесения покрытия – 0,2 м x 0,6 м x 1, 7 м.

Толщина покрытия от 0,1 до 30 мкм, неоднородность по толщине – не более 10%.

Двухкамерная вакуумно-дуговая установка «ДЕКОР»

Установка «ДЕКОР» предназначена для промышленного нанесения на поверхность изделий различного назначения износостойких, антикоррозионных, термостойких, декоративных с широкой цветовой гаммой и защитных покрытий. Возможно нанесение покрытий чистыми металлами, а также их нитридами, карбидами и оксидами.

Таблица 5

Технические характеристики

Максимальная потребляемая мощность		100 кВт
Фоновое давление		$6.7 \cdot 10^{-4}$ Па ($5 \cdot 10^{-6}$ Торр)
Мощность внутрикамерного нагрева		40 кВт
Источник ионной очистки	Ток	150 мА
	Напряжение	5 кВ
Электродуговой источник	Ток	60 А
	Напряжение	30 В

Электродуговые источники металлической плазмы

Электродуговые источники металлической плазмы являются эффективным технологическим инструментом для модификации рабочих поверхностей изделий различного назначения. (Табл.5).

Плазмооптический сепаратор

Плазмооптический сепаратор предназначен для сепарации (очистки) плазменного потока, генерируемого электродуговым источником, от макрокапель и микрочастиц. Принцип его действия заключается в плазмооптической транспортировке заряженной

компоненты плазмы по криволинейному каналу, являющемуся оптически непрозрачным для макрокапель и микрочастиц.

Плазмооптический сепаратор с электродуговым источником разработки НИИЭФА используется на плазменной технологической установке "PETRA" в Институте физики плазмы им. М. Планка (г. Гархинг, Германия). С использованием плазмооптического сепаратора разработана технология осаждения Al_2O_3 покрытий, используемых в качестве барьерных для снижения высокотемпературной коррозии конструкционных материалов.

2 Плазменные технологии очистки воды

Установка комплексной обработки воды (УКОВ)

Установка предназначена для очистки воды из загрязнённых источников до соответствия требованиям ГОСТ Р 51232-98.

Обеззараживание воды (снижение общего микробного числа, индекса ЛКП и индекса колифаги до допустимого стандартом значения) обеспечивается одновременной обработкой в УКОВ загрязнённой воды ультрафиолетовыми лучами и озоном. Механическая фильтрация воды осуществляется на входе и выходе УКОВ. Питьевое качество воды на выходе УКОВ гарантируется при показателях воды на входе

по мутности — до 100 мг/дм³;

по цветности — до 72 град.

Установка может использоваться в местах с недостатком питьевой воды необходимого качества, в том числе в полевых условиях и при возникновении чрезвычайных ситуаций, а также для оператив-

ной обработки воды, забираемой из открытых водоемов, подземных источников, повреждённых водопроводов.

При необходимости УКОВ дополнительно комплектуется трёхступенчатым фильтром физико-химической очистки воды для удаления радионуклидов и солей тяжёлых металлов.

УКОВ поставляется в двух вариантах: базовый (стационарный) и автономный (мобильный), размещаемый на транспортном средстве грузоподъёмностью 700 кг.

Производительность по очистке воды — 3,0 м³/час, потребляемая мощность — 220 В, 50 Гц; базовый вариант — 1,5 кВт, автономный вариант — 4,0 кВт

Генератор озона на базе несамостоятельного объёмного газового разряда

Разработан новый тип генератора озона, в котором синтез озона происходит в поле объёмного несамостоятельного разряда, контролируемого электронным пучком. Генератор проходит натурные исследования и испытания.

Технические характеристики

Производительность по очистке воды, м³/сутки 15000

Энергозатраты на синтез озона, кВт·ч/кг О₃ 15

Преимущества генератора озона нового типа: для синтеза озона используется воздух; подготовка питьевой воды без хлорирования; прост в управлении и эксплуатации; малые габариты и масса.

Таким образом, проведенные в НИИЭФА совместно с другими российскими и зарубежными организациями исследования позволили определить перспективные направления пучковых технологий модификаций технологий. К ним относятся:

- модификация поверхности металлов и сплавов мощными импульсными электронными пучками;

- радиационно-химическая модификация полимерных материалов;
- модификация поверхности материалов ионной имплантацией.

Ионно-плазменные технологии нанесения покрытий на поверхность изделий могут использоваться при производстве оборудования газо- и нефтеперерабатывающего комплекса, продукции машиностроения, приборостроения, микроэлектроники; оптических устройств; медицинской техники и инструментов; элементов ускоряющих структур линейных ускорителей и циклотронов.