

Раздел третий
**ФИЗИКА РАДИАЦИОННЫХ
И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**
**ВАКУУМНО-ДУГОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
И ТЕХНОЛОГИИ ПОКРЫТИЙ В ХФТИ**

И.И. Аксёнов, В.А. Белоус, В.Е. Стрельницкий, Д.С. Аксёнов
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Рассмотрены основные этапы развития вакуумно-дуговых технологий формирования функциональных покрытий на инструменты, детали машин и приборов, изделия из пластика, металла, стекла, на природные и искусственные алмазы, созданные в Харьковском физико-техническом институте. Описаны конструкторские особенности и технологические возможности установок для реализации этих технологий, плазменных генераторов для оснащения установок, примеры некоторых концептуальных разработок технологического оборудования.

PACS: 52.50 Dg. 52.77. Dq

Вакуумно-дуговое осаждение функциональных покрытий получило широкое распространение во многих отраслях машиностроения. Уникальные возможности метода обусловлены особенностями используемой в нем вакуумной дуги как основного технологического инструмента. Разряд в парах металла (или графита), из которого изготовлен катод, генерирует потоки высокоионизированной плазмы с энергией ионов в десятки килоэВ. Плазма эмитируется катодным пятном микрометровых размеров, в котором развивается температура, достаточная для испарения и обращения в плазму любых металлов, в том числе и тугоплавких. Ионный поток, который может быть извлечен из плазмы разряда, составляет (в зависимости от катодного материала) 4...19% от разрядного тока. При контакте потока с подложкой на ее поверхности конденсируется слой катодного материала. Толщина слоя (пленки, покрытия) пропорциональна плотности ионного потока на подложку и времени экспозиции. В присутствии реакционного газа (азота, кислорода, углеродсодержащего) в процессе конденсации металлической плазмы синтезируется слой соединений металла с данным газом (нитридов, окислов, карбидов). Высокая степень ионизации плазмы, достигающая для некоторых материалов почти 100%, позволяет с помощью магнитных полей управлять движением плазменных потоков (фокусировать, транспортировать, отклонять), а с помощью электрического поля, прикладывая отрицательный потенциал к подложке, – регулировать в широких пределах энергию конденсируемых ионов. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность синтезировать покрытия с заданными физико-механическими, химическими и служебными характеристиками, в ряде случаев – уникальными. Вакуумно-дуговой метод обеспечивает отличное сцепление покрытий с поверхностью подложки. Это достигается тем, что перед осаждением покрытия поверхность подложки подвергают очистке ионной бомбардировкой. Для

этого на подложку подают высокое отрицательное напряжение (порядка 1000 В), ускоряющее ионы до энергий, достаточных для распыления поверхностного слоя подложки вместе с загрязнениями. Поверхность становится не только идеально чистой, но и активированной, что и обуславливает необычайно прочное сцепление покрытия с основой.

В 1970 г. сотрудники ХФТИ А.А. Романов и А.А. Андреев сообщили, что осаждаемый ими из плазмы вакуумной дуги тончайший, всего в несколько микрометров, слой нитрида молибдена повышает стойкость токарных резцов в несколько раз. Мнения ученых института разделились: одни сочли это результатом некорректности экспериментов, другие – выдумкой склонного к мистификациям Романова, третьи посчитали это просто шарлатанством («быть этого не может, потому что этого не может быть никогда»). А между тем – то было началом нового направления в институте и в мире. Направления нового, хотя..., как выяснилось десятилетия спустя, имеющего давнюю предысторию. В 1884 г. Томас Эдисон подал в Патентное ведомство США заявку на изобретение «процесса осаждения покрытия из электропроводящего материала с помощью электрической дуги между электродами из этого материала в вакууме...», а в 1877–1878 гг. основные признаки заявляемого им технического решения уже были раскрыты в публикациях профессора Йельского университета Артура Райта, который, экспериментируя с вакуумной дугой, рассчитывал с ее помощью очистить вакуум от ртутных паров. Способ осаждения тонких пленок из разных металлов на стеклянную подложку с помощью вакуумной дуги им был описан в деталях. За подробностями тех драматических событий отсылаем читателя к очеркам Р. Боксмана и Мэттокса [1, 2]. А здесь отметим, что изобретение Райта и Эдисона оказалось преждевременным и надолго забытым. На протяжении столетия его не

раз «переизобретали» и снова забывали, пока в ХФТИ не «изобрели» его окончательно.

В начале 1960-х годов по инициативе академика К.Д. Синельникова в отделении физики плазмы (руководитель – член-корреспондент Академии наук УССР В.Т. Толок) института начались исследования электродугового разряда как эффективного средства для распыления геттера (титана) с целью получения высокого безмасляного вакуума. Работы велись в созданном для этих целей секторе вакуумной техники (РВТ) во главе с А.А. Романовым. Реальная почва для развития нового направления возникла после того, как в 1964 г. Л.П. Саблеву с сотрудниками удалось зажечь в вакууме устойчивый дуговой разряд постоянного тока. В 1966 г. была завершена разработка вакуумно-дугового испарителя титана, а еще через год заработал первый вакуумно-дуговой сорбционный насос. За рубежом аналогичное устройство было заявлено лишь год спустя.

Успехи в «насосном» направлении послужили катализатором в развитии другой тематики: с 1967 г. А.А. Романовым и А.А. Андреевым исследуются возможности вакуумной дуги для формирования покрытий из тугоплавких металлов. Вакуумно-дуговой испаритель, позволивший начать систематические исследования в этом направлении, создается ими к 1970 г. С помощью такого испарителя с графитовым катодом авторы впервые синтезируют пленку алмазоподобного углерода. По «режимным» соображениям полученные результаты не публикуются. В том же 1970 г. авторы нового метода синтезируют покрытия на основе нитрида молибдена с микротвердостью 32...36 ГПа. Это более чем в 5–6 раз превышает табличные значения микротвердости массивного материала. Испытания поршневых колец с такими покрытиями для мощных дизелей на заводе им. Малышева показывают почти 10-кратное снижение износа этих колец и работающих в паре с ними цилиндров по сравнению со штатной парой. (По тем же соображениям конфиденциальности опубликование этих результатов задерживается на 10 лет). Покрытия на резаках из быстрорежущих сталей повышают их стойкость в 5–6 раз. Получены высокие результаты по металлизации природных и синтетических алмазов. Руководство отделения физики плазмы выделяет из своего бюджета средства на проектирование и изготовление опытно-промышленной установки.

К концу 1974 г. созданная усилиями специалистов сектора РВТ, конструкторского бюро и опытного производства института установка «Булат-2» (рис. 1), изготовленная в двух экземплярах, передается харьковским заводам. Это была первая промышленная установка, послужившая прототипом для всего семейства вакуумно-дуговых установок, созданных в Советском Союзе и за его пределами. Новая технология получает известность под аббревиатурой КИБ (конденсация с ионной бомбардировкой). Вместе с установкой заводам передается более совершенная технология, обеспечивающая

осаждение покрытий на основе соединений (нитридов) титана – материала, более доступного и дешевого по сравнению с молибденом.

Тем временем развиваются события и на организационно-бюрократическом фронте. В мае 1974 г. выходит Постановление Госкомитета по науке и технике (ГКНТ) при Совете Министров СССР, согласно которому ХФТИ определяется головным предприятием в программе создания и внедрения новой технологии и оборудования для нанесения износостойких покрытий на инструменты и детали машин, для металлизации природных алмазов и синтетических сверхтвердых материалов. К работам привлекаются предприятия девяти Союзных министерств. Постановление сыграло решающую роль в ускорении дальнейших событий. Немногочисленная команда энтузиастов пополняется: в сектор РВТ приходят В.М. Хороших, В.Е. Стрельницкий, И.И. Аксенов, В.А. Белоус. К осени 1974 г. сектор реорганизуется в крупную лабораторию. В ее состав входит большая группа материаловедов во главе с В.В. Кунченко. Руководителем лаборатории назначается В.Г. Падалка.

С учетом производственного опыта эксплуатации установок «Булат-2» институтом создается новая модель установки «Булат-3» (рис. 2), первая партия которой (20 экземпляров) изготавливается харьковскими предприятиями (1977–1978 гг.). С 1979 г. начинается их серийный выпуск заводом «Двигатель» (Таллинн) и Киевским заводом станков-автоматов.

В новой лаборатории разворачиваются исследования, результаты которых легли в основу представлений о физике процессов, определяющих принципиальные возможности нового технологического направления. Важное место в работах занимают исследования вакуумно-дугового разряда постоянного тока как основного инструмента для осуществления нового метода. Наряду с «инструментальной» ориентацией первых разработок совершается переход к решению более широкого круга проблем. Изучаются взаимодействие катодного пятна с магнитными полями, характеристики металлической плазмы и ее взаимодействие с газовой мишенью; разрабатываются надежные методы инициирования и стабилизации разряда; создаются эффективные методы формирования плазменных потоков с заданными параметрами, способы их фокусировки, отклонения и транспортировки. Разрабатываются основы практического материаловедения вакуумно-дуговых покрытий и процессы их нанесения на детали машин, природные алмазы и синтетические сверхтвердые материалы; разрабатываются работы по синтезу пленок из алмазоподобного углерода. Одновременно с научными исследованиями интенсивно ведутся опытно-конструкторские и опытно-технологические разработки. Многие новые технические решения защищаются авторскими свидетельствами на изобретения. Наиболее важные из них патентуются за рубежом в десятках стран мира.

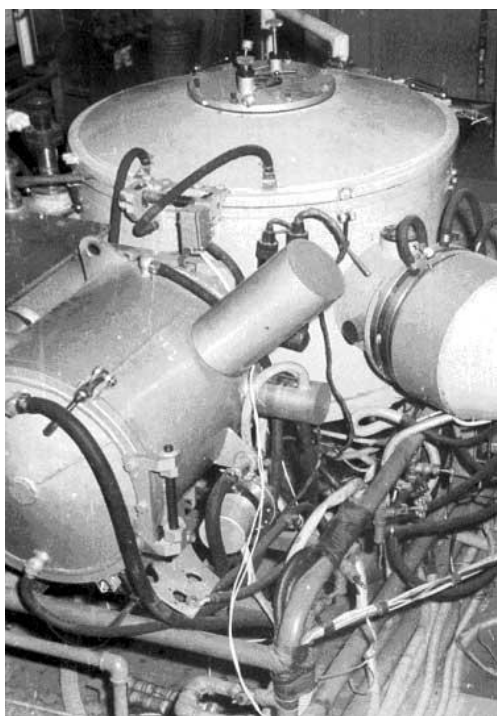


Рис. 1. Внешний вид установки «Булат-2»

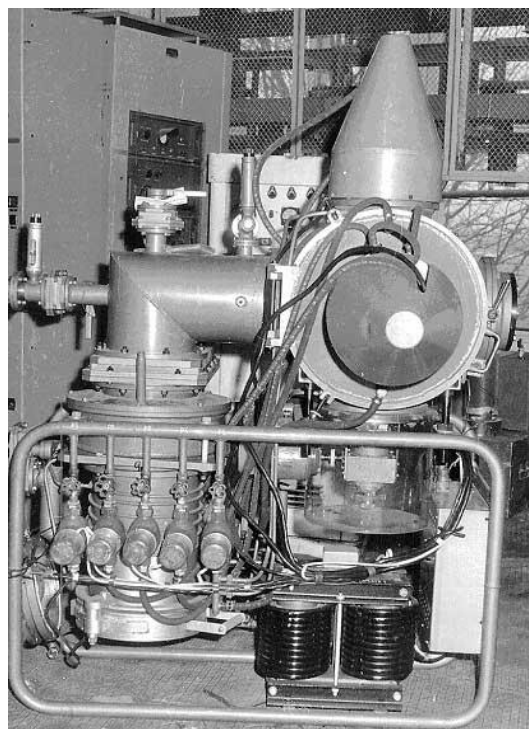


Рис. 2. Внешний вид установки «Булат-3»

В декабре 1979 г. подписывается лицензионное соглашение, согласно которому американской фирме «Noble Field» (после переименования – «Multi Arc Vacuum Systems Inc.» или MAVS) передается технология осаждения TiN-покрытий на инструменты из быстрорежущих сталей и «пилотный» образец установки «Булат-3». С продажей лицензии интерес к новой технологии во всем индустриально развитом мире нарастает по экспоненте. Используя приобретенное исключительное право на технологию, MAVS создает дочерние фирмы во многих местах Североамериканского, Европейского и Азиатского континентов.

В 1982 г. продается лицензия чехословацкому предприятию Nařadí Praga (Жданице).

В это время в ХФТИ продолжают исследования, результаты которых обеспечивают институту лидирующую роль в области вакуумно-дуговой технологии покрытий на инструменты и детали машин. Изучаются свойства металлической плазмы, кинетика физико-химических процессов в реакционном пространстве, исследуется механизм эрозии катода; разрабатываются методы очистки плазменных потоков от капельной фракции; создаются покрытия для антиэрозионной и антикоррозионной защиты изделий, а также биологически индифферентные покрытия для медицинских целей. Разрабатываются уникальные испарительные системы с управляемым движением катодных пятен на поверхности протяженных плоских и цилиндрических катодов, не имеющие принципиальных ограничений на линейные размеры. Создается новый высокоэффективный способ ионного модифицирования поверхностей инструментальных и конструкционных сталей и сплавов в плазме «двухступенчатого» дугового разряда низкого давления. Создание

магнитоэлектрических сепараторов (фильтров) для очистки плазмы от макрочастиц катодного материала обеспечивает решающий прорыв в пионерском направлении – вакуумно-дуговой технологии синтеза пленок аморфного алмаза. Расширяются работы в области поверхностного модифицирования инструментов. Разрабатываются установки, оснащенные фильтрами (рис. 3), в том числе автоматизированная – «Булат-9» (рис. 4), по технологическим возможностям которой нет равной до настоящего времени. Создание фильтров разрешает проблему синтеза «безыносных» алмазоподобных покрытий на деталях газодинамических подвесов (подшипников) (рис. 5) для нового поколения гироскопов навигационного оборудования летающих космических объектов. За разработку технологии алмазоподобных пленок на деталях гироскопов В.Е. Стрельницкому присуждена Государственная премия СССР.

В отделении физики твердого тела и проблем материаловедения (впоследствии Институт физики твердого тела материаловедения и технологий – ИФТТМТ) группой специалистов под руководством В.А. Белоуса с помощью «булатной» технологии разрешается проблема большой важности – защита урана от атмосферной и гидридной коррозии. Необходимость решения проблемы долговременной сохранности изделий из урана и других химически высокоактивных материалов потребовала развития работ в следующих направлениях:

- разработка технологии очистки поверхности изделий перед осаждением покрытия с целью обеспечения адгезии покрытия к основе;

- создание малопористых слабокорродирующих в условиях эксплуатации покрытий, совместимых с интенсивно корродирующими материалами;

– разработка методов снятия покрытий с изделий при сохранении геометрии последних. (Необходимость в такой операции возникает в связи со спецификой производства изделий из рассматриваемых материалов);

– создание оборудования для реализации упомянутых процессов.

С применением этого способа на базе серийной установки «Булат-6» выполнены работы по нанесению защитных металл-нитридных покрытий на рабочие лопатки промежуточных ступеней паровых турбин К-300-240 ОАО «Турбоатом» (см. рис. 5), отработавшие к настоящему времени на двух электростанциях более 150 тыс. ч.

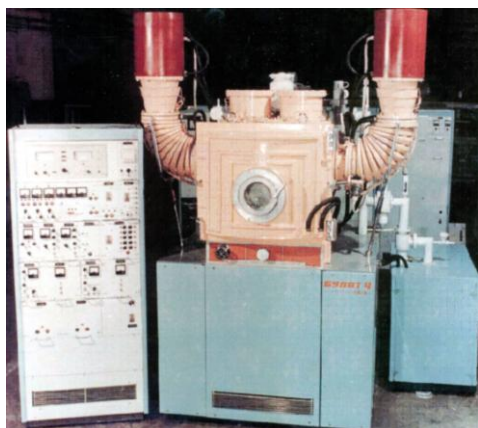


Рис. 3. Внешний вид установки «Булат-4»

с предельно допустимой (по соображениям ядерной безопасности) разовой загрузкой ~ 1 кг.

В рамках программы по решению этих задач разработан метод ионно-плазменной очистки поверхности деталей ионами инертных газов. Создан источник плазмы с использованием несамостоятельного дугового разряда, работающий в стационарном режиме с выходным током ионов до 30 А. Наличие такого источника позволило в дальнейшем развить методы ионного азотирования и достичь скоростей формирования упрочненных слоев порядка 100...150 мкм/ч при температуре обрабатываемых объектов 500...550 °С.

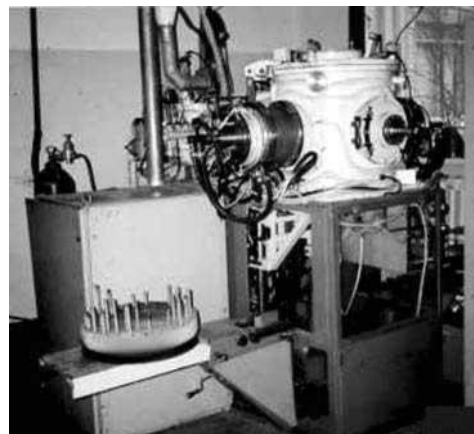


Рис. 4. Внешний вид установки «Булат-9»

Для решения проблемы создания матричного топлива для АЭС будущих поколений разрабатываются технологии нанесения защитного покрытия на микросферы из оксидов, нитридов, карбидов урана (рис. 6). Создается вакуумно-дуговой вариант установки на базе системы АИР-2 для нанесения покрытий на топливные микросферы

Одновременно с работами по азотированию создается и расширяется новое технологическое направление: низкоэнергетичная ионная имплантация погружением в плазму дугового разряда низкого давления (металлическую, газовую или газометаллическую). За рубежом этот метод известен под названием РИИ (plasma immersion ion implantation).



Рис. 5. Инструменты, лопатки турбин и детали газодинамического подшипника гироскопа

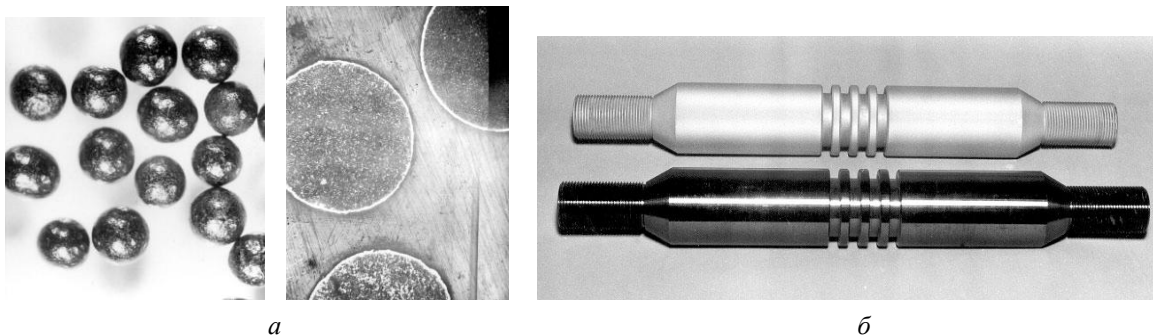


Рис. 6. Изделия с защитными антикоррозионными покрытиями:
а – микровэлы; б – стержни из уранового сплава

Новый метод позволил повысить коррозионную стойкость обработанных материалов в 5–10 раз. Разработанные процессы осуществляются на специально созданном для этой цели оборудовании на базе серийных установок типа «Булат».

С середины 1980-х годов в этом отделении сосредотачиваются практически все работы по покрытиям. Сюда в 1986 г. переводится и коллектив базовой лаборатории, занимающийся «булатной» проблематикой. В 90-е годы вакуумно-дуговые технологии становятся основным направлением деятельности уже двух отделов (руководители В.А. Белоус и Г.Н. Картмазов).

В этот период в условиях «конверсии» и повышенного внимания к ресурсосбережению и экологии вакуумные технологии и оборудование для нанесения защитных и защитно-декоративных покрытий получают предпочтение, в частности, и как альтернатива «мокрому» гальваническому производству, чрезвычайно вредному в отношении загрязнения окружающей среды.

Возвращаясь к 80-м годам, следует еще раз подчеркнуть, что интенсивные физические исследования тех лет шли параллельно с новыми конструкторско-технологическими разработками и «внедрением» их в производство. По мере решения все новых технологических проблем усилиями физиков, конструкторов и специалистов опытного производства института создается целое семейство «Булатов»: серийная установка «Булат-6», сменившая устаревшую модель «Булат-3»; установка универсального назначения «Булат-4», укомплектованная сменными источниками плазмы различных типов, в том числе с тороидальными и прямолинейными магнитными фильтрами; установка специального назначения «Булат-7» для осаждения нитридных (TiN, ZrN) и алмазоподобных углеродных покрытий на поверхности прецизионных элементов узлов трения бортовой навигационной аппаратуры ракет и других космических летательных аппаратов; установка «Булат-9» с автоматическим управлением технологическими процессами; специальные установки для нанесения защитных коррозионно-стойких покрытий на уран; установки «Булат-3А» для металлизации природных алмазов и синтетических сверхтвердых материалов; установки с планарным вакуумно-дуговым испарителем «Булат-3К» для нанесения покрытий на

длинномерные изделия; установка для комплексного упрочнения инструментов (ионно-плазменное азотирование + покрытие); установки серии «Булат-ТНП» (рис. 7) для поверхностной защиты и декорирования изделий из металлов, стекла и керамики в производстве изделий бытового применения («товаров широкого потребления»); для исследовательских целей создается установка «Надежда» (рис. 8). В рамках программы ГКНТ ВНИИЭТО (Москва) в сотрудничестве с ХФТИ создает установку ИЭТ-8. Позже, с учетом новых разработок харьковчан, этим институтом создается серия установок типа ННВ, выпуск которых осуществляют заводы электротермического оборудования в Саратове и Новосибирске.

Важную роль в развитии нового технологического направления и в практическом его освоении сыграло широкое сотрудничество ХФТИ с рядом исследовательских центров Союза: Мосстанкином, НИИТавтопром, ВНИИтракторосельхозмашем, ВНИИЭТО, НПО «Ротор» (Москва), НПО «Азимут» (Ленинград), ЦНИТИ, ХПИ (Харьков) и др. Ряд министерств Союза, используя разработки ХФТИ, создает вакуумно-дуговое оборудование для решения своих специфических технологических задач. Это и установки «Пуск» (НИИТавтопром), и разработанные Харьковским филиалом ЦНИТИ установки серии «Юнион» и ВУ2МБС (Калининградского и Сморгоньского производства), и установки с импульсными источниками углеродной плазмы (Белгородское КБ «Ритм»), и установки для осаждения покрытий на крупногабаритные изделия (Укроргстанкинпром, Харьков), и установка для нанесения покрытий на поршневые кольца (НИИТавтопром) и другие. Вместе с тем, немного нашлось бы в стране крупных машиностроительных предприятий, принявших на вооружение вакуумно-дуговую технологию покрытий с использованием «Булатов» или других аналогичных установок, которые на стадии освоения не воспользовались бы услугами наладчиков или консультантов ХФТИ.

Эффективности производственных участков, оснащенных вакуумно-дуговыми установками, и укреплению растущего авторитета КИБ в значительной, если не в решающей, степени способствовала система подготовки операторов установок. С 1977 г. в Харькове при Доме техники работали курсы обучения оперативного персонала.

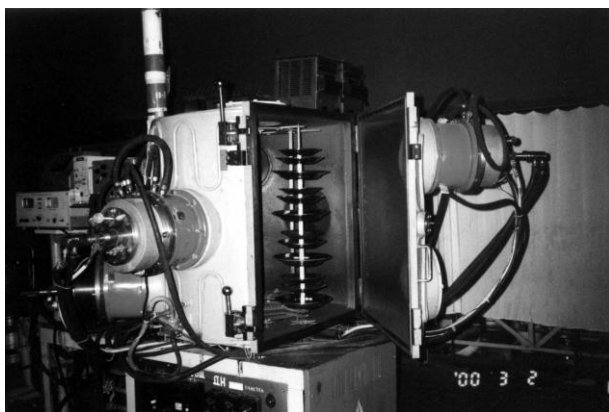


Рис. 7. Внешний вид установки «Булат-ТНП»

В Желтых Водах и в Таллинне с этой же целью ежегодно проводились Школы и Школы-конференции. К сожалению, в кризисной обстановке 90-х годов, когда эта система прекратила свое существование, на смену профессионалам к обслуживанию установок приходят люди случайные, имеющие смутное представление о КИБ, и очень скоро на большинстве предприятий технология упрочнения инструментов «теряется», «Булаты» превращаются в балласт, если их не прибирают к рукам предприимчивые кооператоры или малые предприятия для производства декоративных покрытий или зубного протезирования. Справедливости ради, следует все же отметить, что КИБ и «Булаты» именно малому бизнесу обязаны тем, что в период жесточайшего кризиса 90-х не были погребены под обломками коллапсирующего промышленного производства. Забегая вперед, отметим, что после развала СССР институт переживает критический период. Остро встает вопрос обеспечения института финансированием. Традиционное госбюджетное финансирование практически прекращается. В этой ситуации по инициативе В.Ф. Зеленского и В.А. Гусева отрабатываются новые формы организации труда. Наиболее приемлемой формой выживания оказалось создание малых предприятий (МП), выпускающих различную продукцию для нужд промышленных предприятий и для бытового потребления (так называемых «товаров народного потребления» – «Булат-ТНП») (см. рис. 7). Такой подход позволил в наиболее трудные годы (1992–1998 гг.) обеспечить сотрудников института оплачиваемой работой, использовать часть заработных средств на развитие и совершенствование технологий и оборудование.

Во второй половине 80-х популярность КИБ – в апогее. К тому времени установки типа «Булат» используются всеми инструментальными и большинством машиностроительных заводов СССР. Потребности внутреннего рынка в «Булатах» удовлетворяются установками киевского и таллиннского производства, а также установками ННВ нескольких модификаций, выпускаемыми в Саратове и Новосибирске. Специалисты ХФТИ озабочены созданием нового поколения оборудования, куда намерены заложить новейшие технические решения. Запад очень быстрыми

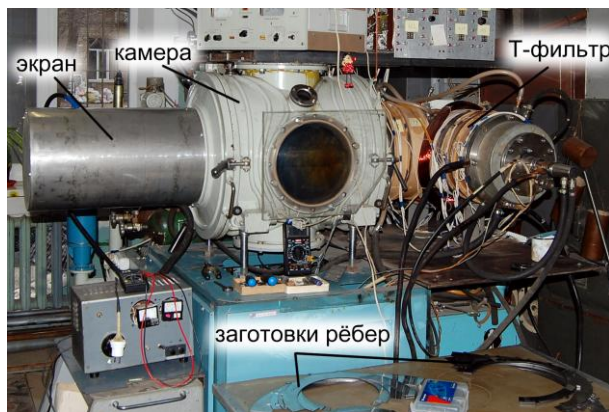


Рис. 8. Внешний вид установки «Булат-Надежда»

темпами также осваивает «технологии века», «технологии будущего». Помимо «Multi Arc» с ее многочисленными филиалами, этим уже занят целый ряд исследовательских центров.

В 1986 г. работы ХФТИ в области вакуумно-дуговых технологий отмечаются премией Совета Министров СССР (лауреаты: И.И. Аксенов, Л.П. Саблев и В.М. Хороших) и Государственной премией СССР (лауреаты: А.А. Романов и А.А. Андреев). В следующем, 1987 г., за работы в области синтеза сверхтвердых пленок алмазоподобного углерода звание Лауреата Государственной премии СССР получает В.Е. Стрельницкий.

Что же касается внешнерыночной политики ХФТИ как владельца достаточно конкурентоспособных разработок в обсуждаемой области, то вряд ли ее можно назвать успешной. Но все это не идет в сравнение с катаклизмами 90-х, когда урон во всех областях жизни страны достигает глобальных масштабов. Что помогло булатному направлению выжить – описано выше. Отметим только, что именно в это нелегкое для отечественной науки время неподдающееся распаду ядро коллектива специалистов–«покрытильщиков» успешно работает над созданием нового метода ионно-плазменного поверхностного модифицирования инструментальных и конструкционных сталей и сплавов. Именно в этот период создаются и исследуются новые фильтрующие системы для формирования бескапельных потоков эрозионной плазмы вакуумной дуги, многократно превосходящие по производительности все другие известные к тому времени системы. Разрабатываются опытно-промышленные образцы длинномерных вакуумно-дуговых испарителей планарного типа. Развертываются работы в новой для Украины области синтеза поликристаллических пленок алмаза. Продолжаются исследования плазмы стационарного дугового разряда постоянного тока низкого давления и процессов формирования нитридных и карбонитридных покрытий, в том числе низкотемпературных процессов. Исследуются процессы дуплексной обработки изделий (азотирование с последующим нанесением покрытий в едином технологическом цикле), а также



Рис. 9. Нью-Йорк (США) 2001 г. (VEECO Instruments, Inc).
Тороидальный фильтр в составе промышленного
оборудования для производства элементов записи
и считывания информации

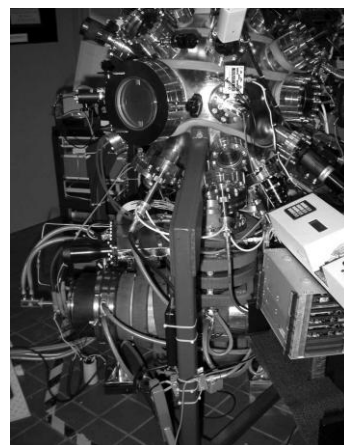


Рис. 10. Авиабазы Райт-Паттерсон
(США). Лабораторная установка
с Т-образным фильтром

закалки изделий с многослойными вакуумно-дуговыми покрытиями. Создаются новые перспективные покрытия – фотокаталитические, антикоррозионные (для защиты первой стенки термоядерной установки ИТЭР от разрушающего воздействия жидкометаллического теплоносителя); разрабатываются процессы ионной имплантации металлов в циркониевые сплавы для улучшения их механических свойств и коррозионного поведения. Изучаются возможности формирования вакуумно-дуговым методом теплоотражающих и защитных покрытий на стекле и пластике. Создаются техноло-

зарубежными фирмами, а также проекты Украинского научно-технологического центра (УНТЦ). Разработки (рис. 9–12) и значительная часть публикаций тех лет в области ионно-плазменных технологий и поверхностного модифицирования материалов в той или иной мере являются результатом сотрудничества ученых института с иностранными партнерами.

Из наиболее значимых результатов последнего десятилетия следует отметить разработку фильтрующих магнитоэлектрических систем (см. рис. 12) для формирования потоков чистой



а



б



в



Рис. 11. Торцевые вакуумно-дуговые источники плазмы: а – для установок типа «Булат-6»;
б – для осаждения толстых покрытий;
в – усовершенствованная конструкция для установок новых моделей

гические устройства для ускорения электронов с использованием плазмы вакуумной дуги. Продолжаются работы по совершенствованию вакуумно-дуговых насосов.

Немаловажную роль в сохранении научного потенциала института в области ионно-плазменных технологий в этот период сыграли контракты с

вакуумно-дуговой эрозионной плазмы. Мотивацией этих разработок, главным образом, было развитие исследований в области сверхтвердых пленок алмазоподобного углерода (diamond like carbon – DLC) или аморфного углерода (amorphous carbon – a-C) [3].

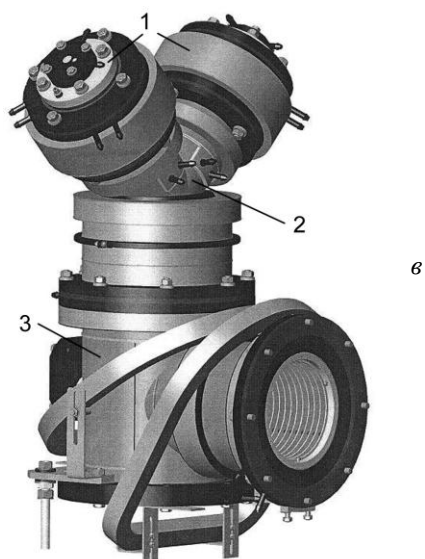
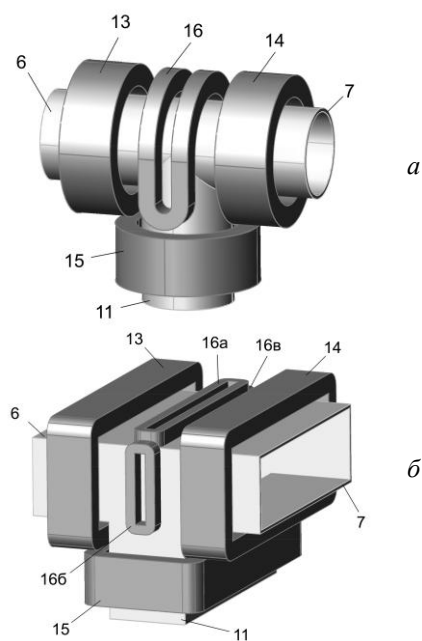


Рис. 12. Плазменные фильтры: а, б – варианты Т-образного фильтра (13, 14, 15, 16 – катушки; 6, 7, 11 – плазмододы); в – источник с (Y + L)-образным двухканальным фильтром (1 – источники плазмы, 2 – Y- и 3 – L-образные плазмододы); з – источник с L-образным фильтром; д – прямолинейный фильтр

Систематические исследования вакуумно-дугового синтеза таких пленок были начаты в ХФТИ Стрельническим с сотрудниками в начале 1970-х годов. Первые же эксперименты продемонстрировали многократные преимущества вакуумно-дугового метода перед другими способами в отношении скорости роста а-С-конденсата, его адгезионных качеств и микротвердости. Однако получаемые этим методом пленки содержали очень большое количество грубых дефектов, обусловленных присутствием в конденсируемых потоках плазмы макрочастиц катодного материала (графита) вакуумной дуги. Плотность дефектов и их размеры были столь велики, что возможности и целесообразность практического применения нового метода представлялись весьма сомнительными. Вскоре, однако, путь к преодолению трудностей, связанных с макрочастицами, был найден. Кардинальное

решение проблемы стало возможным с появлением магнитных фильтров – устройств для удаления макрочастиц из плазмы. Работы по созданию этих устройств были начаты группой И.И. Аксенова в 1974 г. Изобретение плазменного фильтра («сепаратора») с криволинейным плазмододом, изогнутым в виде четверти тора (авторы И.И. Аксенов, В.А. Белоус, В.М. Хороших, В.Г. Падалка) (см. рис. 10), а также с S- и Ω-образными плазмододами зарегистрировано в 1976 г. Применение этого фильтра позволило снять принципиальные ограничения на использование вакуумно-дугового разряда для формирования пленок высокого качества. Открылся путь к применению уникальных возможностей вакуумно-дугового метода в области высоких технологий в качестве инструмента для формирования микро- и наноструктур в оптике, электронике, точной механике.



Рис. 13. Барон Томас фон Арденне (в центре) поздравляет И.И. Аксенова с присуждением премии Манфреда фон Арденне по прикладной физике. Справа – Питер Зимрот

В 2003 г. за работы по плазменным фильтрам И.И. Аксенову присуждена Международная премия Манфреда фон Арденне в области прикладной физики (рис. 13).

Результаты экспериментов по синтезу DLC высокого качества с применением источника чистой углеродной плазмы дугового разряда в вакууме были опубликованы в 1989 г., что в немалой степени способствовало началу широкомасштабных исследований в области а-С-покрытий в лабораториях мира. Создание источников чистой эрозивной плазмы позволило продвинуть вакуумно-дуговые методы синтеза покрытий с их уникальными возможностями в область высоких технологий, в частности, для формирования сверхтонких ($20...30 \text{ \AA}$) защитных пленок

алмазоподобного углерода в производстве систем хранения информации в компьютерной технике. Вакуумно-дуговые источники углеродной плазмы с магнитными фильтрами, разработанные в ХФТИ в рамках партнерских проектов УНТЦ, входят составной частью в технологическое оборудование для производства систем магнитной записи и считывания информации, выпускаемое компанией VEECO Instruments Inc., США (см. рис. 9). Пользователями этого оборудования являются такие известные компании США, как IBM, SeaGate, а также ряд производителей электронной аппаратуры и компьютерной техники в Мексике, Филиппинах, Малайзии, Отрытой экономической зоне Южного Китая (рис. 14). Установки для нанесения а-С-покрытий проданы также в КНР, Южную Корею (рис. 15), Армению.

Специалистами института разработана концепция широкоапертурных криволинейных магнитоэлектрических фильтров с малым аспектовым отношением (внутреннего радиуса плазмоведа к его радиусу кривизны). Плодотворность концепции подтвердилась результатами разработки высокоэффективных источников вакуумно-дуговой плазмы с L- и T-образными фильтрами (см. рис. 12). Пропускная способность фильтров свыше 50% против 25...30%, характерных для лучших современных моделей других известных разработок. Системный коэффициент эффективности (отношение выходного ионного тока к току дуги) новых источников более 5% против ~0,5%, характерных для первых плазменных источников с криволинейным фильтром. Скорость осаждения покрытий при использовании L- и T-образных фильтров до 4 мкм/ч в пятне конденсации диаметром до 20 см. Эта же концепция использована при создании многоканальных фильтров, позволяющих формировать потоки очищенной от макрочастиц плазмы сложного состава. Поток на выходе такого устройства представляет собой однородную смесь нескольких монокомпонентных потоков, поступающих в смеситель фильтра от нескольких дуговых генераторов с катодами из разных материалов.



Рис. 14. Пекинский государственный университет (Китай). Установка для осаждения покрытий из алмазоподобного углерода. Слева направо: В.А. Белоус, Ян Юй Ши, В.В. Васильев, В.Е. Стрельницкий, Ван Ли

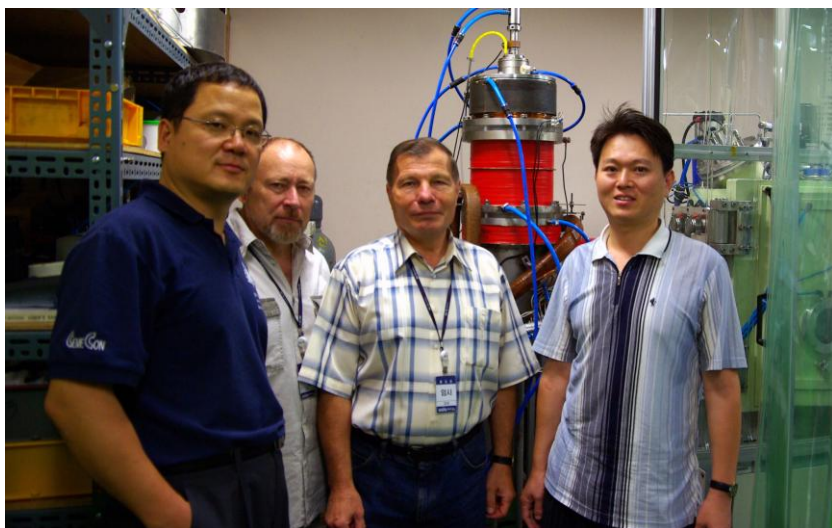


Рис. 15. Криволинейный фильтр на лабораторной установке (на заднем плане) в Корейском институте материаловедения. На снимке В.В. Васильев и В.Е. Стрельницкий (в центре) с корейскими специалистами

Разработки многоканальных фильтров представляют особый интерес в связи с быстро развивающимся направлением исследований в области нанотехнологий, наноструктурных и нанослойных композитных покрытий.

Успехи в создании источников фильтрованной плазмы позволили также решать проблемы осаждения прозрачных защитных покрытий на пластиковые материалы, в частности на полиакрил, материал, используемый для изготовления элементов солнечных батарей. Покрытия из нитрида алюминия с подслоем из а-С выполняют функцию защиты основы от разрушительного воздействия ультрафиолетовой компоненты солнечного излучения и атмосферной эрозии. Работы в данном направлении приобретают важное значение в связи с исследованиями и разработками в области использования энергии солнечной радиации.

С начала 1990-х годов в лаборатории В.Е. Стрельницкого начинаются систематические исследования в новом для Украины направлении – синтеза поликристаллических алмазов осаждением

из плазмы электрических разрядов различных типов: дуги в плазматроне с газовыхровой стабилизацией, в СВЧ-плазматроне, в устройстве с сильноточным тлеющим разрядом в поперечном магнитном поле. Перспективу этого направления трудно переоценить: по прогнозам японских специалистов третье тысячелетие будет «алмазным тысячелетием». К настоящему времени наиболее высокие результаты получены с применением последнего из названных выше способов, основанного на синтезе в плазме сильноточного тлеющего разряда в смеси водорода с метаном. Скорость роста алмазного слоя на молибденовой подложке в пятне диаметром около 60 мм составляет ~ 3 мкм/ч. Разработана методика наращивания слоя поликристаллического алмаза на грани кристаллов природных и синтетических алмазов с размерами от нескольких микрометров до нескольких миллиметров (рис. 16).

Методика может быть использована для «залечивания» поверхностных дефектов таких алмазов.



Рис. 16. Установка для синтеза алмазных пленок (а); грань синтетического монокристалла с нарощенным поликристаллическим алмазом (б, в)

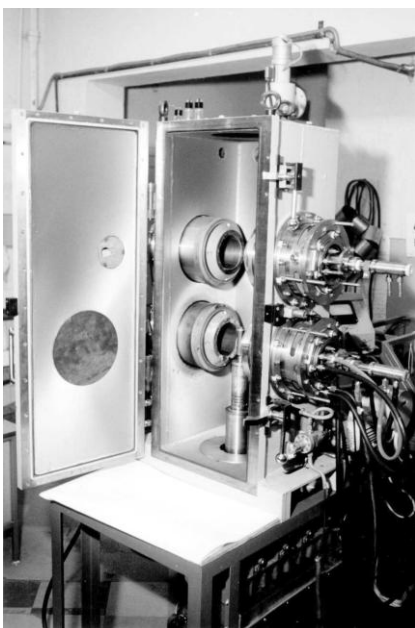


Рис. 17. Установка для формирования толстых (самонесущих) пленок



Рис. 18. Национальная академия наук Украины. Академик-секретарь отделения механики НАНУ А.Ф. Булат вручает диплом о научном открытии заместителю директора ИФТТМТ д.т.н. В.А. Белоусу

При залечивании крупных дефектов с размерами, соизмеримыми с размерами граней, массу кристалла наращивают до величины, превышающей исходную вдвое. Интерес к такого рода работам связан как с возможностью залечивания дефектов и улучшения качества кристаллов синтетического и природного алмаза, так и с возможностью гомоэпитаксиального нанесения алмазных слоев и получения монокристаллических алмазных покрытий с предельно высокими характеристиками, в том числе

и для использования в качестве детекторов ядерных излучений.

В последние годы успешно исследуются возможности осаждения пленок наноструктурированных и нанослойных материалов. Разработана методика формирования таких пленок с применением одно- и двухканальных фильтрующих систем с одним катодом сложного состава или с двумя катодами из разных материалов соответственно.

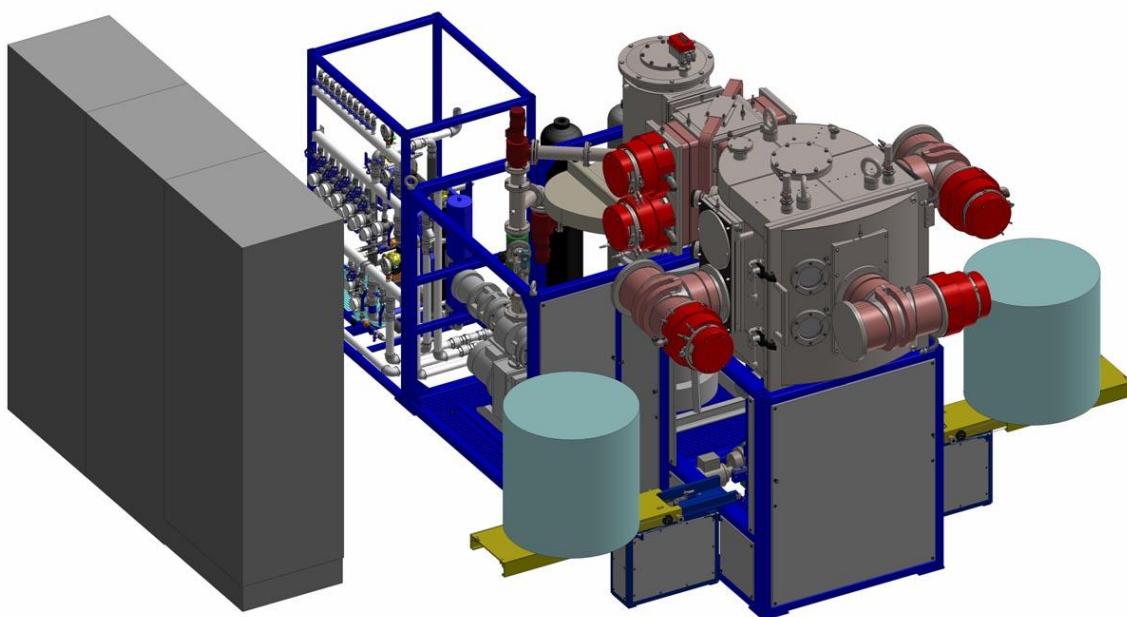


Рис. 19. Концептуальная модель установки универсального назначения со сменными источниками плазмы, фильтрами и их комбинациями. Установка позволяет формировать однослойные, многослойные, композиционные покрытия, в том числе наноструктурированные, осаждением из фильтрованной и нефилтрованной плазмы

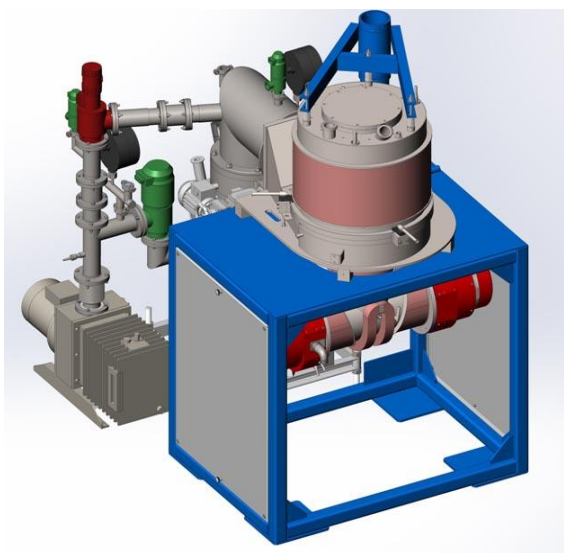


Рис. 20. Концептуальная модель установки для нанесения защитных антиэрозионных покрытий на лопатки турбин и компрессоров газотурбинных двигателей

Получены наноструктурные и нанослоистые пленки с высокими термостабильностью, стойкостью к износу трением, эрозионной и коррозионной стойкостями и высокой оптической прозрачностью [TiN, (Ti,Al)N, (Ti,Si)N, (Ti,Si,Al)N, (Ti_{0,92}Al_{0,07}Mo_{0,01})N, (Ti_{0,88}Al_{0,06}Mg_{0,06})N, TiN/CrN/TiN-CrN, a-C, a-CN, a-(CH)N, a-CMe].

Исследованы особенности нового типа разряда на основе вакуумной дуги – сжатого вакуумно-дугового (СВДР). На базе этого разряда разработаны принципы технологических процессов и оборудования для комплексной обработки конструкционных материалов (азотирование + осаждение покрытия). Создана установка для нанесения износостойких покрытий на внутренние поверхности труб длиной до 8 м и диаметром от 80 мм и более.

К особым достижениям следует также отнести разработки процесса и оборудования для

формирования вакуумно-дуговым методом толстых слоев. Получены многослойные структуры (чередующиеся слои Mo и Nb) толщиной до 1,5...2 мм (рис. 17). Разработанную технологию предполагается использовать в производстве сопел ракетных двигателей малой тяги. Данный метод совершенно уникален: до этого считалось, что с помощью вакуумной дуги можно получать только тонкие пленки и покрытия, а непригодность метода для формирования слоев миллиметровых толщин представлялась настолько очевидной, что возможность использования его в этих целях даже не обсуждалась.

Специалисты института внесли определенный вклад в исследования украинских ученых в области взаимодействия гамма-излучения с материалами в контексте поисков повышения защиты от этого излучения при контейнерном хранении ядерных отходов атомных электростанций и других объектов, связанных с применением радиоактивных материалов. В отделе ионно-плазменной обработки материалов ХФТИ проводились эксперименты по вакуумно-дуговому формированию многослойных структур на основе тяжелых и легких металлов с последующим изучением особенностей прохождения через них потоков гамма-квантов. В 2012 г. зарегистрировано научное открытие «Закономерная связь между интенсивностью потока гамма-квантов излучения, прошедшего слой многофазного материала, и его физико-химическими характеристиками». В авторский коллектив открытия вошли академик НАНУ генеральный директор ННЦ ХФТИ И.М. Неклюдов и доктор технических наук заместитель директора ИФТТМТ ННЦ ХФТИ В.А. Белоус (рис. 18).

К последним разработкам относится высокопроизводительный источник плазмы с прямолинейным фильтром, созданный с применением принципов, изложенных в ранних работах И.И. Аксенова с сотрудниками.

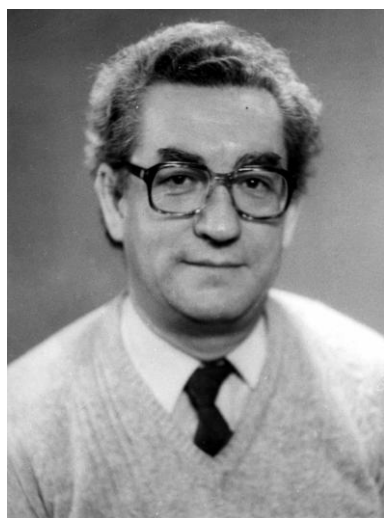


Рис. 21. Лауреаты Государственной премии СССР 1986 г.: А.А. Романов и А.А. Андреев



Рис. 22. Лауреат Государственной премии СССР 1987 г. В.Е. Стрельницкий



Рис. 23. Лауреат премии Совета Министров СССР 1986 г. и Международной премии Манфреда фон Арденне 2003 г. по прикладной физике И.И. Аксенов

Следует также отметить разработанное Д.С. Аксеновым программное обеспечение для моделирования поведения потоков макрочастиц в плазмоведущих каналах фильтров, позволяющее уже на стадии проектирования оптимизировать конфигурацию внутренней поверхности плазмовода с целью минимизации прохождения макрочастиц через фильтр. Оптимизация же геометрии фильтра в

отношении его эффективности транспортировки ионной составляющей фильтруемого потока плазмы осуществляется созданным для этого программно-аппаратным комплексом, включающим в себя многоканальный матричный зонд и программу управления им.

В последнее время производится проектирование концептуальных моделей установок (рис. 19, 20), в которых будут применены все новейшие технические решения, обеспечивающие кардинальное повышение их производительности, качества осаждаемых покрытий, гибкость в перестройке на тот или иной технологический процесс, автоматическое управление заранее запрограммированным процессом от загрузки обрабатываемых изделий до их выгрузки. Проектом предусматривается возможность оснащения установок плазменными фильтрами для использования их при синтезе композитных микро- и наноструктурированных покрытий.

Как уже отмечалось, работы ученых института были оценены Государственными премиями и премиями Совета Министров СССР в 1986–1987 гг. (рис. 21–24).

Подводя итог приведенной информации, авторы рассчитывают на то, что данной статьей им удалось в какой-то мере развеять распространенный стереотип: разработанный в ХФТИ «булатный» метод ограничен техникой нанесения покрытий «под золото» на зубные протезы, а оборудование – установками «Булат-3». Приведенный обзор, даже притом, что он имеет характер «перечислений», показывает, насколько широк охват направлений исследований и разработок института в области обсуждаемых технологий.



Рис. 24. На вручении дипломов лауреата премии Советов Министров СССР. Слева направо: Л.П. Саблев, И.И. Аксенов, Н.В. Белан (ХАИ), И.Н. Ворона, В.М. Хороших, Е.Г. Гольдинер

Журнальная статья не позволяет привести полного отражения направлений даже в обзоре «перечислительного» характера. Так, в статье не нашлось места для технологий защитных покрытий на элементах оптики видимого и инфракрасного спектров; на технику нанесения биологически индифферентных покрытий в области хирургического инструментария и протезирования, на исследования возможности осаждения защитных покрытий на твэлы. Более полную информацию можно получить в монографиях [3–7]. Из всего объема информации, содержащейся в них, следует отметить материалы нескольких направлений работ, представляющих собой стержень всех экспериментальных и теоретических исследований, а также инженерно-технических разработок института в обсуждаемой области. Описаны методы формирования потоков металлической плазмы, генерируемой катодными пятнами дугового разряда в вакууме и газовой среде низкого давления. Приведены результаты исследования физических процессов, составляющих основу методов осаждения покрытий и модифицирования поверхностей. Рассмотрены процессы в межэлектродной вакуумно-дуговой плазме, способы зажигания и стабилизации вакуумно-дугового разряда в технологических плазменных источниках, физика и техника формирования потоков плазмы с заданными параметрами и управления этими потоками. Приведен обширный материал по созданию и исследованию магнитоэлектрических фильтров, в том числе двухканальных для осаждения композиционных одно- и многослойных покрытий. Приведены данные об исследованиях синтеза микро- и наноструктурированных покрытий, в том числе нанослойных. Рассмотрен обширный экспериментальный и теоретический

материал по физике и технологии синтеза тонких и сверхтонких пленок алмазоподобного углерода, примеры коммерческого использования вакуумно-дуговых методов осаждения алмазоподобных покрытий, потенциальные возможности расширения областей их практического применения. Впервые в систематизированном виде описаны вакуумно-дуговые процессы осаждения коррозионно-стойких покрытий и поверхностного модифицирования для защиты урана и других материалов ядерной энергетики от атмосферной и гидридной коррозии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. R.L. Voxman. Vacuum arc deposition: early history and recent developments // *Proc. XIXth ISDEIV*. Xi'an, China, Sept. 2000, p. 1.
2. D.M. Mattox. *The History of Vacuum Coating Technology* // Albuquerque, NM, USA, 2002, 48 p.
3. И.И. Аксенов. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, 212 с.
4. В.Е. Стрельницкий, И.И. Аксенов. *Пленки алмазоподобного углерода*. Харьков: ИПП «Контраст», 2006, 344 с.
5. И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус, В.Е. Стрельницкий, В.М. Хороших. *Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование*. Киев: «Наукова думка», 2011, 724 с.
6. И.И. Аксенов, Д.С. Аксенов, В.А. Белоус. *Техника осаждения вакуумно-дуговых покрытий*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2014, 280 с.
7. И.И. Аксенов, Д.С. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус, В.А. Соболев. *Вакуумно-дуговые покрытия: технологии, материалы, структура, свойства*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2015, 370 с.

Статья поступила в редакцию 08.06.2016 г.

ВАКУУМНО-ДУГОВЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПОКРИТТІВ У ХФТІ

І.І. Аксенов, В.А. Білоус, В.Є. Стрельницький, Д.С. Аксенов

Розглянуто основні етапи розвитку вакуумно-дугових технологій формування функціональних покриттів на інструменти, деталі машин і приладів, вироби з пластика, металів, скла, природні та штучні алмази, створені у Харківському фізико-технічному інституті. Описані конструкторські особливості і технологічні можливості установок для реалізації цих технологій, плазмових генераторів для оснащення установок, приклади деяких концептуальних розробок технологічного обладнання.

VACUUM-ARC EQUIPMENT AND COATING TECHNOLOGIES IN KIPT

I.I. Aksenov, V.A. Belous, V.E. Strel'nitskij, D.S. Aksyonov

Basic development stages of vacuum-arc functional coatings formation of on tools, machine and device parts, plastic metal, glass products, natural and artificial diamonds, which have been created at Kharkiv institute of physics and technology are reviewed. Design features and technological capabilities of installations to implement these technologies, plasma generators for the installations and examples of some conceptual developments of technological equipment are also described.