

РАЗВИТИЕ «БУЛАТНОЙ» ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ (АНАЛИЗ ТРЕХ МЕЖДУНАРОДНЫХ БАЗ ДАННЫХ)

О. В. Кривченко, О. В. Немашкало, А. Г. Шепелев

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Украина*

Поступила в редакцию 17. 04. 2014

Обсуждается начальный период создания в ХФТИ вакуумно-дуговой технологии нанесения покрытий, распространившейся по всему миру. Рассмотрены также актуальные работы по ионной имплантации при подаче отрицательных высоковольтных импульсов на подложку в процессе осаждения покрытий. Анализ трех Международных Баз Данных позволил изучить динамику соответствующего информационного потока, определить страны, ученые которых принимают участие в этих исследованиях, виды информационных документов и языки публикаций. Сделан вывод о перспективности указанных исследований.

Ключевые слова: вакуумная дуга, высоковольтные импульсы, нанокристаллические покрытия.

РОЗВИТОК «БУЛАТНОЇ» ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ПОКРИТТІВ (АНАЛІЗ ТРЬОХ МІЖНАРОДНИХ БАЗ ДАНИХ)

О. В. Кривченко, О. В. Немашкало, А. Г. Шепелев

Обговорюється початковий період створення в ХФТІ вакуумно-дугової технології нанесення покриттів, що розповсюдилася по всьому світу. Розглянуто також актуальні роботи з іонної імплантації при поданні від'ємних високовольтних імпульсів на підложку в процесі осадження покриттів. Аналіз трьох Міжнародних Баз Даних дозволив вивчити динаміку відповідного інформаційного потоку, визначити країни, вчені яких беруть участь в цих дослідженнях, види інформаційних документів і мови публікацій. Зроблено висновок про перспективність зазначених досліджень.

Ключові слова: вакуумна дуга, високовольтні імпульси, нанокристалічні покриття.

DEVELOPMENT «BULAT» PRODUCTION TECHNOLOGY COATINGS (ANALYSIS OF THREE INTERNATIONAL DATABASES)

O. V. Krivchenko, O. V. Nemashkalo, A. G. Shepeliev

The early stage of the vacuum-arc coating production technology, created at the Kharkov Institute of Physics & Technology and distributed world-wide, is discussed in the survey. Consideration is also given to topical works on ion implantation with negative high-voltage pulses fed to the substrate in the process of coating deposition. The analysis of three International DataBases has made it possible to study the dynamics of the corresponding data flow, to identify the countries whose scientists participate in the investigations under discussion, to group the information documents according to their types and publication languages. Conclusion is drawn on the prospects for the mentioned investigations.

Keywords: vacuum arc, high-voltage impulses, nanocrystalline coatings.

В связи с широким распространением во всем мире «Булатной» технологии получения покрытий ряд наших предыдущих публикаций (см., например, [1—4]) был посвящен этой проблематике. Представляет интерес более полно отразить ход развития этих исследований и разработок, зародившихся в ХФТИ [5], уделив особое внимание начальному периоду этих работ и

актуальной вакуумно-дуговой технологии нанесения покрытий с использованием ионной имплантации, тем более, что в последнее время появились некоторые мифы (см., например, [6]), имеющие весьма малое отношение к реальной действительности.

Как известно, инициатором исследований плазмы в СССР и, в частности в ХФТИ, являлся И. В. Курчатов. В соответствующих

плазменных установках Отделения физики плазмы ХФТИ (руководитель В. Т. Толок) требовалось поддерживать высокий вакуум, для чего было предложено применение электродугового разряда. Л. П. Саблев с сотрудниками в 1964 г. смогли зажечь стационарный дуговой разряд в вакууме, после чего в 1966 г. был создан работающий в режиме постоянного тока вакуумно-дуговой испаритель титана [7], послуживший основой первого в мире вакуумно-дугового сорбционного насоса с высокой быстротой откачки и безмасляным вакуумом [8], который пригоден для откачки установок с большим объемом и большим газоотделением.

Родоначальниками применения вакуумной дуги для формирования покрытий с 1967 г. являются А. А. Романов и А. А. Андреев [9, 10]. Ими к 1970 г. был создан и запатентован вакуумно-дуговой испаритель [11], с помощью которого, авторы, используя в качестве катода испарителя графит, впервые в 1970 г. синтезировали покрытие из алмазоподобного углерода (к сожалению, этот результат по соображениям «закрытости» тематики не был своевременно опубликован [9, 10]).

В 1970 г. эти же авторы создали покрытия из нитрида молибдена (с примесью 0,18 % Ti и 0,68 % Zr) с микротвердостью 32—36 ГПа, что в 5—6 раз превышает значение для массивного материала. Эти покрытия в настоящее время называются наноструктурными [5, 12, 13]. Поршневые кольца с такими покрытиями для танковых дизелей показали почти 10-кратное снижение их износа и такое же уменьшение износа цилиндров при сопоставлении со стандартным гальваническим хромовым покрытием [14]. Эти Mo_2N покрытия были в 1972—1973 г. г. успешно испытаны на 8 Государственном подшипниковом заводе, где 800 отрезных резцов применялись при резании стали ШХ15, в том числе после двукратной переточки по задней и боковым поверхностям. Испытания режущих инструментов с покрытиями из нитрида молибдена на заводе им. Малышева также показали высокие результаты [15]. Поскольку покрытия характеризовались увеличением стойкости в 5—6 раз, было

принято решение об изготовлении в ХФТИ двух опытнопромышленных установок для ГПЗ-8 и завода им. Малышева. Финансирование их проектирования и изготовления было дальновидно начато в 1974 г. В. Т. Толоком за счет бюджета Отделения физики плазмы ХФТИ.

Отметим, что в 1970 г. А. А. Андреевым был предложен новый метод нанесения покрытий — чередующиеся твердые и мягкие слои из нитридов молибдена и чистого молибдена (см. рис. 1) [16, 17]. Лабораторные испытания многослойных покрытий Mo_2N -Mo, проведенные в НИИ тракторосельхозмаш, показали значительное (более чем в 10 раз) снижение износа по сравнению с закаленной сталью ШХ15 и при этом самую высокую пластичность по сравнению с другими видами износостойких покрытий (нитроцементация, гальваническое хромирование, вакуумно-дуговые Mo_2N и др.) [16, 17].



Рис. 1. Фотография микроструктуры многослойного покрытия, полученного методом КИБ: чередующиеся мягкие слои Mo (темные слои) и твердые слои Mo_2N (светлые). Увеличение: $\times 700$

С 1973 г. устанавливается сотрудничество ХФТИ с Московским станкоинструментальным институтом, ВНИИ инструментом, Укроргстанкинпромом и другими организациями. В 1974 г. в ХФТИ была освоена технология нанесения покрытий из нитрида титана, которая показала несколько худшие

результаты, однако, стоимость титана на порядок дешевле молибдена. Кроме того, поскольку покрытия нитрида титана имели привлекательный золотистый цвет, это было важно для продвижения товара на рынке. Были получены также прекрасные результаты по металлизации природных и синтетических алмазов в сотрудничестве с Томилинским заводом алмазного инструмента.

Значимость описываемых работ была подчеркнута принятием ряда Постановлений Государственного Комитета по науке и технике при Совете Министров СССР (начиная с Постановления № 282 от 22 мая 1974 г.), в соответствии с которыми ХФТИ был определен головным по проблеме создания и внедрения новой технологии «КИБ» (конденсация с ионной бомбардировкой) и оборудования для нанесения износостойких покрытий на инструменты и детали машин, а также для металлизации как естественных алмазов, так и синтетических сверхтвердых материалов. Вышеуказанными Постановлениями к работам были привлечены предприятия девяти Союзных Министерств. Соответствующее централизованное финансирование дало возможность организовать в Отделении физики плазмы ХФТИ крупную лабораторию, руководителем которой был назначен В. Г. Падалка. Эти Постановления способствовали существенному развитию работ: в 1977—1978 г. г. на кооперативных началах была изготовлена партия из 20 установок типа «Булат» для заводов Харькова, куда они были поставлены вместе с технологией получения покрытий на основе нитрида титана. С 1979 г. на заводах Таллина и Киева происходит серийное изготовление «Булата-3» и последующих модификаций; одновременно происходит совместная разработка и выпуск заводами Саратова и Новосибирска аналогичной установки ННВ-6,6-И1 (и ее разновидностей). Вскоре общее количество переданных в промышленность СССР установок превысило несколько тысяч. Для примера можно указать, что на Московском инструментальном заводе было два цеха с общим количеством 22 установки, на Томском заводе фрез — 18 установок, на ХТЗ — 5 установок, на ЧЗТА — 5 установок.

Успешной работе способствовали разработки эффективных методов формирования плазменных потоков с заданными параметрами и способов их фокусировки, отклонения и транспортировки [18]*.

После этого при активном участии Минстанкопрома СССР было запатентовано большинство изобретений ХФТИ (и содействующих организаций) в 20 странах мира, а Лицензторг СССР на основе работ, выполненных в ХФТИ вместе со Станкином, ВНИИ инструментом и другими организациями СССР, в декабре 1979 г. продал в США соответствующую лицензию очень крупного масштаба на технологию нанесения TiN покрытий на инструменты из быстрорежущей стали. Был передан также образец установки «Булат-3», запуск которой в США осуществляла группа советских специалистов под руководством И. И. Аксенова. При покупке лицензии американские специалисты тщательно изучили опыт массового применения «Булатной» технологии на заводах ХТЗ и ЧЗТА. Действие лицензии было запланировано на 10 лет до 1990 г. и СССР должен был получить 50 млн. долларов (за первые два года было реально получено 10 млн. долларов). Однако, вскоре вышестоящая организация наложила гриф ДСП на установки «Булат» и соответствующие технологии (аналогичные установки других ведомств такого грифа не имели!) и дальнейшая продажа зарегистрированных и опубликованных патентов ХФТИ стала невозможной; в ответ платежи американской стороной практически прекратились.

Тем не менее, коллектив ХФТИ продолжал успешные работы — совместно со Станкином был разработан и запатентован планарный испаритель [19], двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд и его применение для нового типа химико-термической обработки стальных изделий [20]. Обе эти разработки были запатентованы в США и Европе за счет Станкина. Отметим, что была также

* Кстати, системы магнитоэлектрических фильтров для очистки плазмы от макрочастиц катодного материала были позже успешно использованы, с привлечением сотрудников ННЦ ХФТИ И. И. Аксенова и В. Е. Стрельниченко, фирмой IBM для нанесения алмазоподобных покрытий для жестких дисков компьютеров.

разработана конструкторская документация на различные типы планарных испарителей, однако, до промышленного внедрения, к сожалению, дело не дошло в связи с развалом СССР. Это же относится к двухступенчатому разряду, с той разницей, что химико-термическая обработка инструментов из стали Р6М5 с последующим нанесением вакуумно-дуговых износостойких покрытий успешно применена МГТУ «Станкин», например, в серийном производстве инструментов в Китае.

Плодотворная деятельность ХФТИ в области вакуумно-дуговых технологий в 1986 и 1987 г. г. была высоко оценена правительством СССР: А. А. Романов, А. А. Андреев, представитель Мосстанкина А. С. Верещака, а также В. Е. Стрельницкий становятся Лауреатами двух Государственных премий СССР, а И. И. Аксенов, Л. П. Саблев, В. М. Хороших, Е. Г. Гольдинер отмечаются премией Совета Министров СССР. Заметим, что в 2003 г. Международной премией им. Манфреда фон Арденне удостоен И. И. Аксенов за вклад в разработку и передачу в промышленность вакуумно-дуговой технологии покрытий и, в особенности, за плазменные фильтры.

Дальнейшие разработки вакуумно-дугового метода привели к созданию сжатого газового вакуумно-дугового разряда [5], который, в частности, мог быть использован для термообработки изделий в вакууме [21]. Это позволило бы создать электрическую вакуумную печь для отжига или азотирования без расходуемых нагревательных элементов и с КПД около 80 %, поскольку нагреваются электронами непосредственно только сами детали. Но разработка и изготовление такой печи, к сожалению, не производились.

С 2006 г. коллективом под руководством А. А. Андреева начались разработки сверхтвердых наноструктурных вакуумно-дуговых покрытий. Как указывалось выше, в конце 80-х годов прошлого столетия начались исследования свойств покрытий, полученных при подаче на подложку в процессе осаждения отрицательных высоковольтных импульсов амплитудой от 0,5 до 40 кВ [22, 23]. Методика заключается в помещении

обрабатываемого изделия в плазму и приложении к нему коротких отрицательных импульсов кВ-диапазона; во время импульсов происходит ускорение ионов, которые бомбардируют поверхность изделия.

Рассматриваемые процессы давно активно исследуются в мировой науке (см. ниже) и получили название метода *plasma based ion immersion implantation with deposition* (РВИ&D) [24]. Одной из целей было получение вакуумно-дуговых покрытий, в частности, нитрида титана, обладающих минимальными внутренними напряжениями (обычные вакуумно-дуговые TiN покрытия имеют внутреннее напряжение 3—6 ГПа). Например, при подаче на подложку постоянного отрицательного потенциала 75 В и отрицательных импульсов амплитудой 5 кВ длительностью 1—3 мкс и частотой следования 1—2 кГц получены TiN покрытия с микротвердостью 21 ГПа и внутренними напряжениями 0,9—2,9 ГПа. При этом температура подложки могла составлять 150 °С, что позволяло наносить эти покрытия на подложки из конструкционных сталей и алюминия [25].

Анализ процессов, происходящих в покрытии при ионной имплантации в процессе его осаждения, показал, что имеются возможности получения более твердых покрытий TiN при температурах подложки в диапазоне 100—500 °С. А. А. Андреевым в 2006 г. были определены режимы обработки подложки в процессе осаждения, при этом длительность импульсов должна быть не менее 10 мкс и частота их следования при технологически удобной амплитуде 2 кВ должна составлять около 7 кГц. Согласно этим данным в ННЦ ХФТИ В. П. Руденко изготовил генератор высоковольтных импульсов с частотой следования 1—7 кГц, длительностью импульсов от 10 мкс до 10 мс и регулируемой амплитудой в пределах 0,3—2 кВ [26]. С использованием этого генератора были впервые созданы сверхтвердые (40—68 ГПа) TiN покрытия [27], а затем сверхтвердые покрытия на основе молибдена (например, [28]). Затем в 2011 г. была изготовлена более совершенная модификация генератора высоковольтных импульсов.

В дальнейшем стало понятно, что выбранные режимы не оптимальны, и, кроме того, они различны для разных металлов. В настоящее время проводится оптимизация режимов обработки подложки в процессе осаждения покрытий на основе титана, хрома, молибдена, многослойных покрытий на их основе, а также исследования нитридов многокомпонентных высокоэнтропийных сплавов, содержащих 5—7 металлов IV—VI групп таблицы Менделеева.

Для изучения динамики публикаций, а также стран, ученые которых принимают участие в разработке и исследовании RVI&D, мы полностью использовали три Международные автоматизированные реферативные Базы Данных: International Nuclear Information System — INIS (1970—2011 г. г.), Materials Science Citation Index — MSCI (1991—2011 г. г.) и Information Service for Physics, Electronics and Computing — INSPEC (1969—2011 г. г.). Первая из них содержит труды, введенные государствами-членами МАГАТЭ, вторая создается Институтом Научной Информации США и содержит журнальные публикации из 500 материаловедческих журналов мира, а третья создается английским Институтом Инженерии и Технологии и содержит журнальные публикации и труды конференций по физике, электронике и компьютерным проблемам.

Автоматизированные исследования всех Баз Данных проведены с помощью анализа ключевых слов и понятий:

- «plasma source ion implantation»;
- «plasma immersion ion implantation»;
- «plasma immersion ion implantation and deposition»;
- «metal plasma immersion ion implantation and deposition».

Нас интересовали динамика информационных потоков по проблеме получения вакуумно-дуговых покрытий при подаче отрицательных высоковольтных импульсов (рис. 2) и страны, ученые которых принимают участие в таких исследованиях (см. рис. 3—5). Кроме основных стран, представленных на рис. 3—5, в соответствующих исследованиях принимали участие: по данным БД INIS —

Бразилия, Мексика, Беларусь, Франция, Казахстан, Словакия, Турция, Украина, Иран, Малайзия; по данным БД MSCI — Венгрия, Канада, Испания, Болгария, Мексика, Турция, Бельгия, Беларусь, Нидерланды, Новая Зеландия, Италия, Египет, Литва, Португалия, Чехия, Ирландия, Юж. Африка, Израиль, Иран, Румыния, Дания, Польша, Швеция, Аргентина, Швейцария, Австрия, Словения; по данным БД INSPEC — Индия, Англия, Венгрия, Канада, Сингапур, Мексика, Польша, Литва, Испания, Бельгия, Болгария, Турция, Иран, Чехия, Украина, Нидерланды, Словакия, Таиланд, Италия, Юж. Африка, Беларусь, Израиль, Румыния, Пакистан, Швеция, Египет, Люксембург, Ирландия, Греция, Новая Зеландия, Португалия, Норвегия, Эстония, Австрия, Ливия, Аргентина, Словения, Чили.

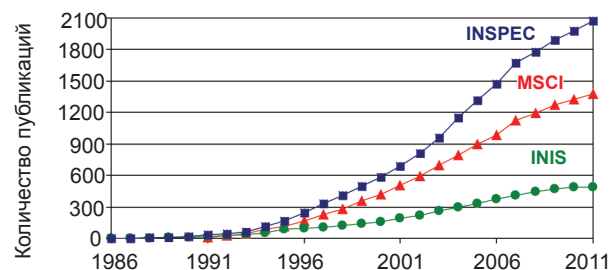


Рис. 2. Кумулятивный рост числа публикаций по проблеме получения покрытий при подаче отрицательных высоковольтных импульсов по анализу указанных Баз Данных

При этом надо заметить, что кооперативная БД INIS, к сожалению, имеет временную задержку введения информации около 2-х лет в среднем, в то время как БД MSCI и БД INSPEC отличаются большой оперативностью ввода информации (в первой — около двух месяцев, во второй обновление происходит еженедельно).

Что касается типов публикаций, то в БД INIS 78,8 % относится к журнальным статьям, 8,6 % — книги, 6,9 % — труды конференций, 5,1 % — отчеты, 0,6 % — диссертации. В БД MSCI 99,5 % — журнальные статьи, 0,5 % — обзоры. В БД INSPEC 67,6 % публикаций относятся к журнальным статьям, а 32,1 % к трудам конференций. В БД INIS основным языком публикаций является английский (93,5 %), есть публикации на китайском (4,7 %), русском (1,6 %) и

испанском (0,2 %) языках. В БД MSCI основной язык публикаций — английский, 1,4 % осуществлено китайским языком и 0,2 % — немецким. В БД INSPEC 96,56 % — английский, 2,53 % — китайский, 0,67 % — японский, 0,19 % — польский и 0,05 % — немецкий.

Анализ динамики информационных потоков (см. рис. 2) по проблеме создания и исследования покрытий с помощью подачи отрицательных высоковольтных импульсов на изделия и наличие значительного количества трудов конференций (см. выше), а также большое число стран, ученые которых ведут такие исследования (рис. 3—5), показывает неослабевающий интерес к данной проблематике. Это позволяет сделать вывод о перспективности дальнейших исследований.

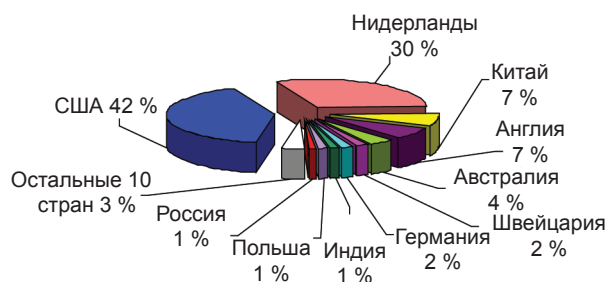


Рис. 3. Распределение публикаций различных стран по данным БД INIS

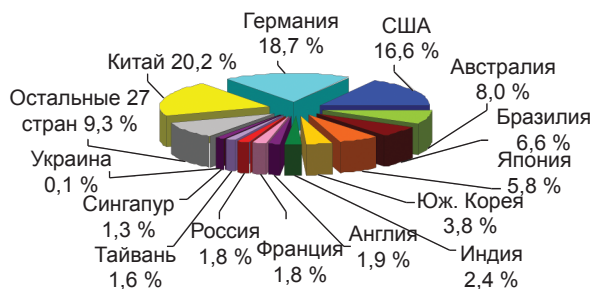


Рис. 4. Распределение публикаций различных стран по данным БД MSCI

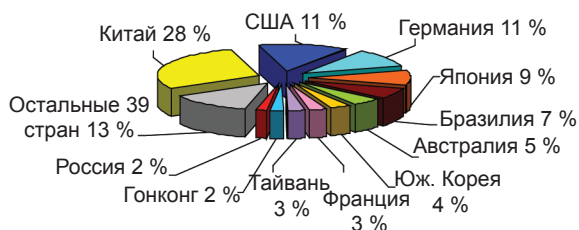


Рис. 5. Распределение публикаций различных стран по данным БД INSPEC

Интересно обратить внимание на то обстоятельство, что, как следует из анализа БД INIS, MSCI, INSPEC (рис. 3—5), не только ученые передовых развитых стран (США, Германия, Япония, Нидерланды), но и ученые развивающихся стран, таких, например, как Китай и Бразилия, очень активно ведут соответствующие исследования.

Авторы признательны И. И. Аксенову и А. А. Андрееву за участие в обсуждении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шепелев А. Г., Манжур Ю. А. Вакуумные технологии в машиностроении (научно-метрический анализ публикаций последнего десятилетия) // Сб. докл. 2 Междунар. симп. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении, ОТТОМ-2», Харьков. — 2001. — С. 68—73.
2. Шепелев А. Г., Андреев А. А., Пантеенко Л. В., Юрченко Л. Д. и др. О развитии вакуумно-дуговой техники и технологий // Сб. докл. 5 Междунар. конф. «Вакуумные технологии и оборудование», Харьков. — 2002. — С. 196—201.
3. Шепелев А. Г., Немашкало О. В., Юрченко Л. Д., Мартыненко Л. И. Вакуумная металлизация керамики и алмазов для последующей пайки // Сб. докл. 5 Междунар. конф. «Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов», Харьков. — 2004. — С. 284—286.
4. Шепелев А. Г., Андреев А. А., Пономаренко Т. А., Юрченко Л. Д. и др. Динамика информационных потоков по наноструктурным PVD покрытиям // Сб. докл. 6-й Междунар. Конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». — 2005. — С. 154—157.
5. Андреев А. А., Саблев Л. П., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые покрытия. — Харьков: ННЦ ХФТИ. — 2010.
6. Тырнов В. Эволюция «Булата» // Украинская техническая газета. — 2012. — № 2 (207). — С. 10.
7. Электродуговой испаритель металла: А. с. 268122 СССР / Л. П. Саблев., В. Н. Атаманский, В. Н. Горбунов, Ю. И. Долотов и др.; Заявлено 1968.
8. Саблев Л. П., Долотов Ю. И., Гольдинер Е. Г., Гетьман Л. И. и др. Электродуговой сорбционный агрегат ВЭД-1 // ВАНТ, сер. Физика и техника высокого вакуума. — 1973. В. 1(1).

- С. 21—29.
9. Аксенов И. И., Андреев А. А. Вакуумно-дуговые ионно-плазменные технологии покрытий в ХФТИ // ВАНТ, сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 1998. — Вып. 2(3), 3(4). — С. 3—11.
 10. Аксенов И. И., Андреев А. А. Вакуумно-дуговой разряд и вакуумные покрытия. Краткий исторический обзор работ ХФТИ // Харьковская научная ассамблея ICVTE-6. — 2003. — С. 306—314.
 11. Электродуговой испаритель: Ас. 284883 СССР / А. А. Романов, А. А. Андреев, В. Н. Козлов; Заявлено 1969.
 12. Андреев А. А., Булатова Л. В., Булатов А. С., Картмазов Г. Н. и др. Структура высокопрочных покрытий на основе молибдена, полученных при конденсации плазмы вакуумно-дугового разряда // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1981. — № 5. — С. 33—35.
 13. Андреев А. А., Булатова Л. В., Картмазов Г. Н., Кострица Т. В. и др. Покрытия из карбида молибдена, полученные методом осаждения плазменных потоков в вакууме (КИБ) // Физика и химия обработки материалов. — 1979. — № 2 — С. 169—170.
 14. Исхаков С. С., Ходакова Т. А., Лаптева И. Г., Андреев А. А. и др. Новый метод упрочнения трущихся деталей // Тракторы и сельхозмашины. — 1978. — № 6. — С. 37—39.
 15. Романов А. А., Андреев А. А., Логинов А. С., Колядинский А. В. и др. Упрочнение режущего инструмента из быстрорежущих сталей методом конденсации с ионной бомбардировкой // Производственно-технический бюллетень. — 1973. — № 8. — С. 26—28.
 16. Аксенов И. И., Андреев А. А., Брень В. Г., Вакула С. И. и др. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме (способ конденсации с ионной бомбардировкой) // УФЖ. — 1979. — Т. 24. — С. 515—525.
 17. Андреев А. А. Разработка способа и оборудования для нанесения покрытий путем осаждения потоков металлической плазмы в вакууме // МАДИ, канд. дис. — 1979.
 18. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы. — Харьков: НИЦ ХФТИ. — 2005.
 19. Electric arc metal evaporator: Pat. USA 5,451,308 / L. P. Sablev, A. A. Andreev, S. M. Grigoriev; 1992.
 20. Method and device for treatment of products in gas-discharge plasma: Pat. USA 5,503,725 / L. P. Sablev, A. A. Andreev, S. M. Grigoriev, A. S. Metel; 1992.
 21. Саблев Л. П., Андреев А. А., Ступак Р. И., Шулаев В. М. Нагрев материалов потоками электронов из плазмы вакуумно-дугового разряда с холодным катодом // Сб. докладов 3-й Межд. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов», Харьков. — 2002. — Ч. 1. — С. 38—44.
 22. Adler R. J., Picraux S. T. Repetitively pulsed metal ion beams for ion implantation // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 1985. — В 6. — P. 123—128.
 23. Conrad J. R., Radtke J. L. Plasma source ion-implantation technique for surface modification of materials // J. Appl. Phys. — 1987. — Vol. 62. — P. 4591—4596.
 24. Anders A. (Ed.) Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition // N. Y. John Wiley & Sons. — 2000.
 25. Perry A. J., Treglio J. R., Tian A. F. Low-temperature deposition of titanium nitride // Surf. Coat. Technol. — 1995. — Vol. 76—77. — P. 815—820.
 26. Шулаев В. М., Андреев А. А., Руденко В. П. Модернизация вакуумно-дуговых установок для синтеза покрытий и азотирования методом ионной имплантации и осаждения // Физическая инженерия поверхности. — 2006. — Т. 4. — № 3—4. — С. 136—142.
 27. Андреев А. А., Шулаев В. М., Горбань В. Ф., Столбовой В. А. Осаждение сверхтвердых вакуумно-дуговых TiN покрытий // Физическая инженерия поверхности. — 2006. — Т. 4. — № 3—4. — С. 201—206.
 28. Андреев А. А., Соболев О. В., Горбань В. Ф., Столбовой В. А. и др. Влияние режимов вакуумно-дугового осаждения в среде азота на фазовый состав, субструктурные характеристики и механические свойства нанокристаллических покрытий системы Mo-N // Физическая инженерия поверхности. — 2010. — Т. 8. — № 3—4. — С. 179—183.

LITERATURA

1. Shepelev A. G., Manzhur Yu. A. Vakuumnye tehnologii v mashinostroenii (naukometricheskij analiz publikacij poslednego desyatiletija) // Sb. dokl. 2 Mezhdunar. simp. «Oborudovanie i tehnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov v mashinostroenii, OTTOM-2», Har'kov. — 2001. — P. 68—73.
2. Shepelev A. G., Andreev A. A., Panteenko L. V., Yurchenko L. D. i dr. O razvitii

- vakuumno-dugovoj tehniki i tehnologij // Sb. dokl. 5 Mezhdunar. konf. «Vakuumnye tehnologii i oborudovanie», Har'kov. — 2002. — P. 196—201.
3. Shepelev A. G., Nemashkalo O. V., Yurchenko L. D., Martynenko L. I. Vakuumnaya metallizaciya keramiki ialmazov dlya posleduyushej pajki // Sb. dokl. 5 Mezhdunar. konf. «Oborudovanie i tehnologiya termicheskoy obrabotki metallov i splavov», Har'kov. — 2004. — P. 284—286.
 4. Shepelev A. G., Andreev A. A., Ponomarenko T. A., Yurchenko L. D. i dr. Dinamika informacionnyh potokov po nanostrukturnym PVD pokrytiyam // Sb. dokl. 6-j Mezhdunar. Konf. «Oborudovanie i tehnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov». — 2005. — P. 154—157.
 5. Andreev A. A., Sablev L. P., Grigor'ev S. N. Vakuumno-dugovye pokrytiya. — Har'kov: NNC HFTI. — 2010.
 6. Tyrnov V. Evolyuciya «Bulata» // Ukrainskaya tehnikeskaya gazeta. — 2012. — No. 2 (207). — P. 10.
 7. Elektrodugovoj isparitel' metalla: A. s. 268122 SSSR / L. P. Sablev., V. N. Atamanskij, V. N. Gorbunov, Yu. I. Dolotov i dr.; Zayavleno 1968.
 8. Sablev L. P., Dolotov Yu. I., Gol'diner E. G., Get'man L. I. i dr. Elektrodugovoj sorbcionnyj agregat VED-1 // VANT, ser. Fizika i tehnika vysokogo vakuuma. — 1973. Vyp. 1(1). — P. 21—29.
 9. Aksenov I. I., Andreev A. A. Vakuumno-dugovye ionno-plazmennye tehnologii pokrytij v HFTI // VANT, ser. Vakuum, chistye materialy, sverhprovodniki. — 1998. — Vyp. 2(3), 3(4). — P. 3—11.
 10. Aksenov I. I., Andreev A. A. Vakuumno-dugovoj razryad i vakuumnye pokrytiya. Kratkij istoricheskij obzor rabot HFTI // Har'kovskaya nauchnaya assambleya ICVTE-6. — 2003. — P. 306—314.
 11. Elektrodugovoj isparitel': As. 284883 SSSR / A. A. Romanov, A. A. Andreev, V. N. Kozlov; Zayavleno 1969.
 12. Andreev A. A., Bulatova L. V., Bulatov A. S., Kartmazov G. N. i dr. Struktura vysokotverdyh pokrytij na osnove molibdena, poluchennyh pri kondensacii plazmy vakuumno-dugovogo razryada // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. — 1981. — No. 5. — P. 33—35.
 13. Andreev A. A., Bulatova L. V., Kartmazov G. N., Kostrica T. V. i dr. Pokrytiya iz karbida molibdena, poluchennye metodom osazhdeniya plazmennyyh potokov v vakuume (KIB) // Fizika i himiya obrabotki materialov. — 1979. — No. 2 — P. 169—170.
 14. Ishakov S. S., Hodakova T. A., Lapteva I. G., Andreev A. A. i dr. Novyj metod uprochneniya truschihsya detalej // Traktory i sel'hozmashiny. — 1978. — No. 6. — P. 37—39.
 15. Romanov A. A., Andreev A. A., Loginov A. S., Kolyadinskij A. V. i dr. Uprochnenie rezhushego instrumenta iz bystrorezhuschih stalej metodom kondensacii s ionnoj bombardirovkoj // Proizvodstvenno-tehnicheskij byulleten'. — 1973. — No. 8. — P. 26—28.
 16. Aksenov I. I., Andreev A. A., Bren' V. G., Vakula S. I. i dr. Pokrytiya, poluchennye kondensaciej plazmennyyh potokov v vakuume (sposob kondensacii s ionnoj bombardirovkoj) // UFZh. — 1979. — Vol. 24. — P. 515—525.
 17. Andreev A. A. Razrabotka sposoba i oborudovaniya dlya naneseniya pokrytij putem osazhdeniya potokov metallicheskoj plazmy v vakuume // MADI, kand. dis. — 1979.
 18. Aksenov I. I. Vakuumnaya duga v erozionnyh istochnikah plazmy. — Har'kov: NNC HFTI. — 2005.
 19. Electric arc metal evaporator: Pat. USA 5, 451, 308 / L. P. Sablev, A. A. Andreev, S. M. Grigoriev; 1992.
 20. Method and device for treatment of products in gas-discharge plasma: Pat. USA 5, 503, 725 / L. P. Sablev, A. A. Andreev, S. M. Grigoriev, A. S. Metel; 1992.
 21. Sablev L. P., Andreev A. A., Stupak R. I., Shulaev V. M. Nagrev materialov potokami elektronov iz plazmy vakuumno-dugovogo razryada s holodnym katodom // Sb. dokladov 3-j Mezhd. konf. «Oborudovanie i tehnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov», Har'kov. — 2002. — Ch. 1. — P. 38—44.
 22. Adler R. J., Picraux S. T. Repetively pulsed metal ion beams for ion implantation // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 1985. — B 6. — P. 123—128.
 23. Conrad J. R., Radtke J. L. Plasma source ion-implantation technique for surface modification of materials // J. Appl. Phys. — 1987. — Vol. 62. — P. 4591—4596.
 24. Anders A. (Ed.) Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition // N. Y. John Wiley & Sons. — 2000.
 25. Perry A. J., Treglio J. R., Tian A. F. Low-temperature deposition of titanium nitride // Surf. Coat. Technol. — 1995. — Vol. 76—77. — P. 815—820.

26. Shulaev V. M., Andreev A. A., Rudenko V. P. Modernizaciya vakuumno-dugovyh ustanovok dlya sinteza pokrytij i azotirovaniya metodom ionnoj implantacii i osazhdeniya // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2006. — Vol. 4. — No. 3—4. — P. 136—142.
27. Andreev A. A., Shulaev V. M., Gorban' V. F., Stolbovoj V. A. Osazhdenie sverhtverdyh vakuumno-dugovyh TiN pokrytij // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2006. — Vol. 4. — No. 3—4. — P. 201—206.
28. Andreev A. A., Sobol' O. V., Gorban' V. F., Stolbovoj V. A. i dr. Vliyanie rezhimov vakuumno-dugovogo osazhdeniya v srede azota na fazovyy sostav, substrukturnye harakteristiki i mehanicheskie svoystva nanokristallicheskih pokrytij sistemy Mo-N // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2010. — Vol. 8. — No. 3—4. — P. 179—183.