

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.793

КОМАРОВСКАЯ
Виктория Маратовна

**ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ И НАНЕСЕНИЯ
ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ TiN ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯ ИЗ СТЕКЛА
В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2010

Работа выполнена на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» Белорусского национального технического университета

Научный руководитель – **Иващенко Сергей Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, декан Инженерно-педагогического факультета, Белорусский национальный технический университет

Официальные оппоненты: **Девойно Олег Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, зам. декана Машиностроительного факультета по НИР, главный научный сотрудник НИИЛ ПилТ, Белорусский национальный технический университет;

Андреев Михаил Анатольевич, кандидат физико-математических наук, директор ОХП «Институт сварки и защитных покрытий», ГНУ «Институт порошковой металлургии»

Оппонирующая организация – Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «Оптическое станкостроение и вакуумная техника»

Защита состоится «10» декабря 2010 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 Белорусского национального технического университета по адресу: 220013, Республика Беларусь, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «10» ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций Д.02.05.03,
доктор технических наук, профессор _____

Девойно О.Г.

© Комаровская В.М., 2010
© БНТУ, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой при эксплуатации изделий из стекла является ухудшение эксплуатационных характеристик под воздействием вредных факторов окружающей среды. В настоящее время наиболее эффективным путем решения данной проблемы является нанесение на рабочие поверхности изделий из стекла защитно-декоративных покрытий.

Наиболее приемлемым методом формирования защитно-декоративных покрытий на изделиях из стекла с точки зрения экономичности и технологичности является метод конденсации покрытий из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности (метод КИБ). К его достоинствам можно отнести высокую скорость нанесения и хорошую воспроизводимость физико-механических свойств покрытий, возможность получения многослойных, полосчатых и мультислойных покрытий, высокую адгезию и равномерность покрытия по толщине, надежность работы оборудования.

Разработке научных и технологических основ формирования вакуумно-плазменных покрытий посвящены работы ряда отечественных и зарубежных исследователей: Т.М. Андроновой, В.М. Анищика, А.В. Белого, А.С. Верещаки, А.К. Вершины, И.С. Гайнутдинова, А. Goldnez, В.П. Гольцева, В.К. Гриките, А.П. Достанко, И.А. Иванова, С.А. Иващенко, Н. Kersten, Н.И. Минько, Ж.А. Мрочка, А.Ф. Первеева, И.В. Сватковского, Л.А. Черезовой.

Однако в подавляющем большинстве работ рассматриваются вопросы технологии формирования покрытий на изделия из металлических материалов. Поскольку эксплуатационные и качественные характеристики изделий с вакуумно-плазменными покрытиями во многом определяются состоянием и физико-механическими свойствами материала основы, то результаты исследований, полученные для металлических материалов, нельзя автоматически перенести на неметаллические материалы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами

Тема научных исследований соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 годы (Перечень утвержден Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17 мая 2005 года № 512) (3.4. новые высокоэнергетические технологии обработки материалов; 7.3. физические и химические про-

цессы в полупроводниках, тонких слоях и пленках твердого тела и на границах раздела фаз).

Научные исследования по теме диссертации проводились в рамках:

– ГПОФИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии», задание ВЭТ 1.40 «Разработка теоретических и технологических основ формирования многослойных вакуумно-плазменных покрытий на неметаллических материалах», ГБ 07-29 № ГР 20072303 от 17.08.2007 г., 03.01.2007 г. – 31.12.2010 г.;

– Республиканской межвузовской программы фундаментальных исследований «Машиностроение – 01» ГБ 01-130.1.5 «Разработка теоретических и технологических основ формирования газотермических и вакуумно-плазменных покрытий для прецизионных деталей узлов трения», № ГР 20014449 от 21.11.2001 г., 01.01.2001 г. – 31.12.2005 г.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является повышение качественных и эксплуатационных характеристик изделий из стекла формированием TiN вакуумно-плазменных электродуговых покрытий.

В соответствии с целью работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать физико-математические модели процессов теплофизического взаимодействия:

– ионов инертного газа Ar^+ с поверхностью основы конечных размеров для расчета распределения температуры в объеме изделия из стекла в процессе ионной обработки;

– частиц TiN вакуумно-плазменного покрытия с поверхностью изделий из стекла для определения оптимального количества монослоев при формировании покрытия.

2. Установить механизм формирования TiN вакуумно-плазменных покрытий на диэлектрических материалах, что позволит повысить производительность процесса нанесения покрытий.

3. Исследовать влияние технологических параметров процесса предварительной (внекамерной) и окончательной (внутрикамерной) подготовки поверхности изделий из стекла на качество очистки и шероховатость поверхности.

4. Исследовать влияние технологических параметров процесса нанесения TiN покрытий на качественные (шероховатость, микроструктура и микротвердость) и эксплуатационные (износостойкость и адгезия) характеристики изделий из стекла с вакуумно-плазменными покрытиями.

5. Разработать и освоить в производстве технологический процесс формирования TiN вакуумно-плазменных электродуговых покрытий на изделиях из стекла.

Объектом исследования являются изделия из стекла с TiN вакуумно-плазменными электродуговыми покрытиями.

Предметом исследований являются качественные (шероховатость, микроструктура и микротвердость) и эксплуатационные (износостойкость и адгезия) характеристики изделий с TiN покрытиями.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты расчетов распределения температуры в объеме изделия конечных размеров в процессе ионной обработки поверхности, полученные с использованием математической модели теплофизического взаимодействия ионного потока инертного газа (Ar^+) с поверхностью изделия из стекла, учитывающей передачу тепла за счет сосредоточенного удара ионов при упругом столкновении и теплового излучения дугового разряда и потерю тепла за счет ослабления падающего потока ионов отраженным, теплового излучения и распыления ионов обрабатываемого материала, что позволяет прогнозировать температуру поверхности основы для получения качественных покрытий.

2. Физико-математическая модель процесса теплофизического взаимодействия частиц покрытия с поверхностью изделий из стекла и друг с другом, с учетом строения материалов и квантово-механических представлений о характере ковалентной, ионной и диполь-дипольной связей между частицами, позволившая предложить принципы формирования мультислойных вакуумно-плазменных покрытий, а также определить оптимальное количество монослоев и предельную толщину одного слоя в мультислойном покрытии, что обеспечивает получение покрытий с высокими микротвердостью, адгезией и износостойкостью.

3. Механизм взаимодействия ионов Ti и молекул TiN с поверхностью диэлектрических материалов при формировании вакуумно-плазменных покрытий методом КИБ, заключающийся в том, что на поверхности формируется положительно заряженный монослой ионов Ti, препятствующий дальнейшему осаждению материала покрытия, нейтрализация которого может осуществляться за счет потенциальной ионно-электронной эмиссии инициированной бомбардировкой металлической оснастки ионами Ti. Расчет коэффициента потенциальной ионно-электронной эмиссии позволяет определить время нейтрализации положительно заряженных частиц покрытия на поверхности изделий из стекла и предложить научно обоснованные схемы загрузки рабочего пространства вакуумной камеры для получения качественных покрытий при максимальной производительности процесса.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса подготовки поверхности изделий из стекла (плотность ионного потока, время ионной обработки, угол установки образцов относительно направления ионного потока, давление в вакуумной камере, энергия

ионов) на качество очистки и шероховатость поверхности, которые позволили оптимизировать технологию подготовки поверхности для получения покрытий с прогнозируемыми качественными и эксплуатационными характеристиками.

5. Результаты экспериментальных исследований по оценке влияния технологических параметров процесса формирования покрытий (время формирования покрытия, расположение образцов в вакуумной камере, ток дугового разряда, давление в вакуумной камере) на качественные и эксплуатационные характеристики изделий с покрытиями и определенные на их основе режимы формирования покрытия, обеспечивающие оптимальную топографию, повышение микротвердости, адгезии и износостойкости TiN вакуумно-плазменных покрытий на изделиях из стекла.

Личный вклад соискателя

Основные научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем. Соискателю принадлежит разработка методик исследований, непосредственное их проведение, анализ и интерпретация результатов исследований, оптимизация технологических режимов процессов подготовки поверхности основы и нанесения покрытий.

С.А. Иващенко сформулировал цель и задачи исследования, оказывал консультации и практическую помощь на всех этапах выполнения настоящей работы. Работы, связанные с построением модели формирования вакуумно-плазменного покрытия на неметаллических материалах, выполнялись совместно с д-ром физ.-мат. наук Л.И. Гречихиным. Работы, связанные с определением качественных и количественных характеристик загрязнений на поверхности стекла, выполнялись совместно с д-ром хим. наук А.Л. Перцовским.

Апробация результатов диссертации

Результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах: Республ. студ. научно-практ. конференция «Студенческая наука на пороге III тысячелетия» (Мозырь, 2002 г.); VIII Республ. научно-техническая конференция студентов и аспирантов «НИРС 2003» (Минск, 2003 г.); 59-й, 60-й и 61-й научно-практ. конференциях студентов и аспирантов БНТУ «Инженерно-педагогическое образование в XXI веке» (Минск, 2004 г., 2005 г.); Республ. научно-практ. конференции «Машиностроение» (Минск, 2004 г.); I, II и III Междунар. научно-практ. конференциях «Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь» (Минск, 2004 г., 2006 г., 2008 г.); Междунар. НТК «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2006 г.); 3-й и 6-й Междунар. научно-техн. конференциях «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2006 г., 2008 г.); 8-м Всероссийском совещание-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники» (Москва, 2006 г.); 3-й и 4-й Республиканских научно-

практ. конференциях молодых ученых и студентов БНТУ «Инженерно-педагогическое образование в XXI веке» (Минск, 2007 г., 2008 г.); Первой международной научной конференции: «Наноструктурные материалы – 2008: Беларусь – Россия – Украина» (Минск, 2008).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 24 научных работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых журналах (всего 1,94 авторских листа), а также в 17 статьях и тезисах докладов на конференциях и семинарах и 2 патентах Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации 189 страниц. Работа содержит 104 страницы машинописного текста, 62 рисунка на 29 страницах, 9 таблиц на 5 страницах, список используемых источников в количестве 178 наименований на 16 страницах, включая 24 авторские работы и 13 приложений на 35 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации. Отмечены проблемы, возникающие при формировании вакуумно-плазменных защитно-декоративных покрытий на изделиях из стекла. Обоснована необходимость оптимизации операций подготовки поверхности и нанесения покрытий для получения качественных изделий с покрытием.

В **первой главе** рассмотрены функциональные параметры и области использования защитно-декоративных покрытий на изделиях из стекла. Показано, что наиболее перспективным методом формирования покрытий защитно-декоративного назначения на изделиях из стекла является вакуумно-плазменный электродуговой (метод КИБ).

Применение вакуумно-плазменных электродуговых покрытий для повышения эксплуатационных характеристик изделий из неметаллических материалов, в частности стекла, сдерживается нерешенностью ряда задач, обусловленных новизной и сложностью проблемы: недостаточно изучено влияние операций предварительной внекамерной и окончательной внутрикамерной подготовки поверхности на качественные и эксплуатационные характеристики формируемых покрытий; недостаточно изучены теплофизические процессы, происходящие при подготовке поверхности и формировании покрытий; существующая технология не позволяет получать прогнозируемые качественные и эксплуатационные характеристики покрытий.

Сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй главе** приводятся результаты теоретических исследований теплофизических процессов, происходящих при ионной обработке и формировании покрытий из нитрида титана на изделиях из стекла.

При ионной обработке необходимо контролировать температуру изделия. Перегрев поверхности приводит к изменению свойств материала основы, при низкой температуре поверхности ухудшается адгезия покрытия.

Для определения влияния процесса ионной обработки поверхности стекла на изменение температуры основы решалась нестационарная теплопроводная задача с учетом следующих допущений:

увеличение температуры основы происходит за счет:

- энергии, передаваемой поверхности ионами инертного газа (Ar^+), при сосредоточенном ударе с учетом упругого столкновения;
- энергии, подводимой за счет теплового излучения дугового разряда.

При этом потери энергии обусловлены:

- ослаблением падающего потока отраженным;
- тепловым излучением;
- распылением частиц обрабатываемого материала.

Полученные результаты показывают, что при ионной бомбардировке стекла температура основы линейно возрастает с увеличением времени обработки, что позволяет прогнозировать температурный режим ионной очистки.

Одной из основных причин, ограничивающих широкое использование вакуумно-плазменного электродугового метода для формирования покрытий на изделиях из стекла, является низкая производительность процесса нанесения покрытий и недостаточная адгезия. Это обусловлено тем, что положительные ионы материала катода, конденсируясь на обрабатываемой поверхности, не нейтрализуются, а создают равномерно заряженный слой некомпенсированных зарядов, препятствующий осаждению последующих слоев покрытия. В процессе бомбардировки металлической оснастки ионами титана возникнет потенциальная ионно-электронная эмиссия. Образовавшиеся в результате протекания такого процесса электроны будут захватываться положительно заряженной поверхностью основы и произойдет нейтрализация сформированного монослоя ионов титана.

Потенциальная ионно-электронная эмиссия характеризуется коэффициентом γ . Предложена методика расчета коэффициента потенциальной ионно-электронной эмиссии, позволяющая определить время нейтрализации положительно заряженных частиц покрытия на поверхности диэлектрического материала и предельно допустимое расстояние между изделиями в вакуумной камере.

Установлены принципы формирования мультислойных TiN вакуумно-плазменных покрытий на изделиях из стекла, которые заключаются в следующем:

- нанесение покрытий осуществляется в импульсном режиме, обеспечивающем формирование квазиаморфной структуры мультислойного покрытия;
- продолжительность импульса ограничивается предельной суммарной толщиной монослоев i -го слоя мультислойного покрытия (количеством атомарных монослоев покрытия), при которой нагрев поверхности не приводит к образованию столбчатой структуры покрытия;
- длительность паузы должна быть достаточной для охлаждения сформированного за время импульса слоя покрытия.

Для определения предельной толщины i -го слоя (количества атомарных монослоев) мультислойного покрытия рассмотрена динамика подвода тепла к обрабатываемой поверхности и его отвода в материал основы и предложена физико-математическая модель процесса теплофизического взаимодействия монослоев мультислойного покрытия с основой.

В процессе образования 1-го слоя Ti на поверхности основы плотность теплового потока определяется передачей энергии при упругом ударе ионов титана и физической адгезией атомов титана. При формировании 1-го слоя TiN плотность теплового потока определяется передачей части энергии при упругом ударе ионов титана и молекул азота, физической адгезией атомов титана, а также латеральным взаимодействием молекул нитрида титана друг с другом.

Зная величину плотности теплового потока, время образования одного монослоя и площадь одного места адсорбции на поверхности, можно определить результирующую температуру в i -м монослое упрочняющего покрытия, °К:

$$T_i = T_{\text{эфф}i} - \Delta T_i = \frac{\dot{Q}_{n_i} \cdot \tau_1 \cdot S_1 \cdot [(C_{\text{осн}} \cdot M_{\text{осн}} + C_{\text{Ti}} \cdot M_{\text{Ti}} + C_{\text{N}} \cdot M_{\text{N}}) - 3 \cdot k_{\text{Б}}]}{3 \cdot k_{\text{Б}} \cdot (C_{\text{осн}} \cdot M_{\text{осн}} + C_{\text{Ti}} \cdot M_{\text{Ti}} + C_{\text{N}} \cdot M_{\text{N}})}, \quad (1)$$

где i – номер атомарного слоя материала покрытия;

$T_{\text{эфф}i}$ – эффективная температура i -го монослоя, °К;

ΔT_i – падение температуры одного монослоя покрытия за время образования следующего, °К;

$k_{\text{Б}}$ – постоянная Больцмана, Дж/°К;

\dot{Q}_{n_i} – плотность теплового потока, поступающего на поверхность основы, Вт/м²;

τ_1 – время формирования одного монослоя покрытия, с;

S_1 – площадь одного места адсорбции, м²;

$C_{\text{осн}}$, C_{Ti} , C_{N} – удельная теплоемкость материала основы, титана и азота соответственно, Дж/кг·°К;

$M_{\text{осн}}$, M_{Ti} , M_{N} – масса частиц основы, атома титана и азота соответственно, кг.

Таким образом, можно рассчитать температуру поверхности покрытия и оптимальное количество монослоев i -го слоя мультислойного покрытия (рисунок 1).

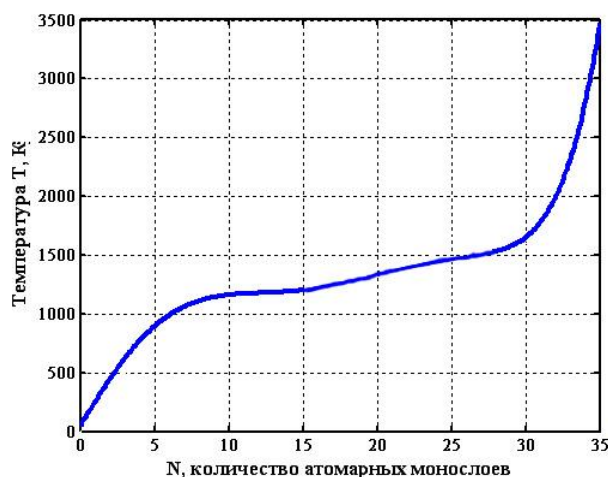


Рисунок 1 – Зависимость температуры покрытия от количества монослоев

Третья глава посвящена исследованию технологии подготовки поверхности изделий из стекла перед нанесением TiN покрытий.

Подготовка поверхности основы состоит из двух основных этапов: предварительная (внекамерная) и окончательная (внутрикамерная) обработка.

Для оценки эффективности методов внекамерной обработки поверхности изделий из стекла проведены экспериментальные исследования состава и количества загрязнений исходной поверхности изделий. Состав и количество

загрязнений устанавливали методом газовой хроматографии, а контроль чистоты поверхности – определением краевого угла смачивания.

Изучалось также влияние режимов ионной обработки (внутрикамерная обработка) на изменение исходной шероховатости поверхности и качество очистки изделий из стекла.

Установлено, что при малых значениях плотности ионного потока (0,2–0,5 мА/см²) наблюдается незначительное повышение шероховатости поверхности по сравнению с исходной. Дальнейшее увеличение плотности ионного потока (до 1,5 мА/см²) приводит к существенному снижению шероховатости поверхности.

Исследование зависимости шероховатости поверхности от угла установки образцов относительно направления ионного потока показало, что при установке образцов параллельно направлению ионного потока ($\alpha = 0^\circ$), шероховатость поверхности снижается незначительно по сравнению с исходной (рисунок 2). Это можно объяснить тем, что большинство ионов отражается от поверхности, не проникая вглубь материала. При угле $\alpha = 25^\circ$ достигается минимальная шероховатость поверхности. Это связано с тем, что ионы инертного газа, проникая в поверхность образца на небольшую глубину, вызывают каскад столкновений

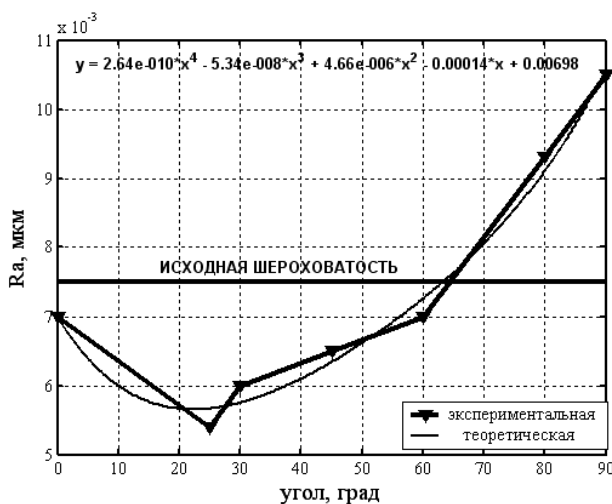


Рисунок 2 – Зависимость шероховатости поверхности от угла установки образцов относительно направления ионного потока

установки образцов, превышающих $\alpha = 60^\circ$, и максимальное значение соответствует $\alpha = 90^\circ$.

С увеличением времени ионной обработки характер зависимости шероховатости поверхности от угла установки образцов не меняется. Начиная с 20-й минуты бомбардировки наблюдается интенсификация процесса распыления впадин поверхности. Это связано со значительным разогревом поверхности основы бомбардирующими ионами (более 90 % энергии иона расходуется на разогрев поверхности – тепловые колебания атомов).

Установлено, что с увеличением давления в вакуумной камере шероховатость поверхности возрастает по сравнению с исходной. Уменьшение давления также не является благоприятным для данного вида обработки, поскольку в этом случае поверхность бомбардирует малое количество ионов аргона, что значительно снижает производительность процесса.

Для оптимизации технологического процесса ионной обработки определялась зависимость шероховатости образцов ($Ra = y$, мкм) от времени ионной обработки ($t = x_2$, мин) и угла установки образцов относительно направления ионного потока ($\alpha = x_1$, град).

После обработки результатов экспериментов получено следующее уравнение регрессии в нормированном виде:

$$y_1 = 66.6 + 17.2 \cdot x_1 + 4.7 \cdot x_2 + 22.5 \cdot x_1^2. \quad (2)$$

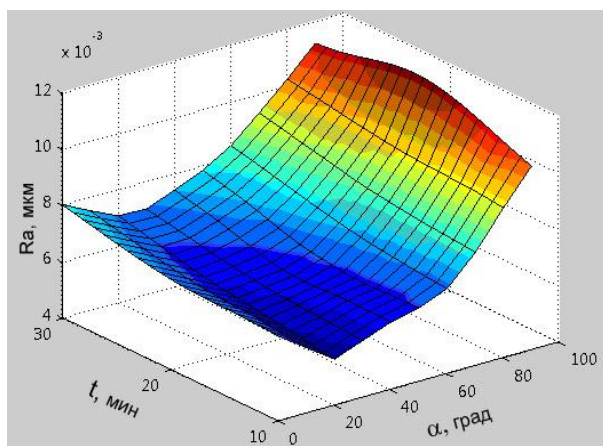


Рисунок 3 – Графическая поверхность отклика влияния α и t на шероховатость поверхности R_a

На рисунке 3 показана зависимость шероховатости поверхности от режимов ионной обработки. Наибольшее влияние на величину шероховатости поверхности при ионной обработке оказывает угол установки образцов относительно направления ионного потока (α). Влияние времени ионной обработки (t) сказывается в меньшей степени, хотя с ростом времени обработки величина шероховатости R_a также увеличивается. Минимальная величина шероховатости $R_a = 56 \cdot 10^{-4}$ мкм получена при угле установки 25° и времени обработки 10 минут.

Вторым немаловажным фактором, влияющим на качественные и эксплуатационные характеристики вакуумно-плазменных покрытий, является степень очистки поверхности основы. Минимальные значения краевого угла смачивания получены при следующих режимах ионной обработки: плотность ионного потока $j = 1,0\text{--}1,4$ мА/см²; давление в вакуумной камере $p = (2,7\text{--}3,2) \cdot 10^{-2}$ Па; время ионной обработки $t = 7\text{--}10$ мин.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния основных технологических параметров процесса формирования TiN вакуумно-плазменных покрытий (ток дугового разряда, давление в вакуумной камере, время формирования рабочего слоя) на качественные и эксплуатационные характеристики покрытий (шероховатость, микротвердость, микроструктуру, адгезию, износостойкость).

При увеличении тока дуги более 90 А и уменьшении давления в вакуумной камере ниже $2,7 \cdot 10^{-2}$ Па в плазменном потоке повышается процент содержания капельной фазы (рисунок 4), а поскольку капли являются своеобразными островками для роста пиков микронеровностей, то наблюдается заметный рост шероховатости поверхностного слоя покрытия. При увеличении времени формирования рабочего слоя покрытия более 3 минут шероховатость покрытия резко возрастает ($R_a > 0,025$ мкм), что связано с ростом количества дефектов и рыхлостью поверхностного слоя покрытия.

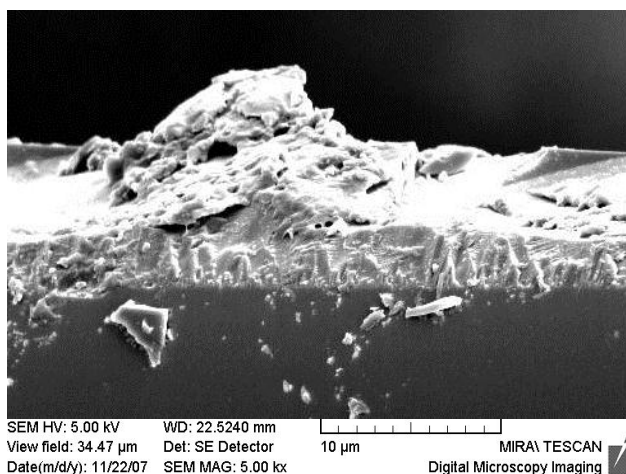


Рисунок 4 – Фотография капли на изломе образца с TiN покрытием (x 5000)

При значениях давления $p \leq 1,6 \cdot 10^{-2}$ Па покрытие формируется как за счет образования молекул TiN, так и за счет α -Ti, что существенно снижает микротвердость покрытия. По мере увеличения давления ($p = (3,2-4,6) \cdot 10^{-2}$ Па) возрастает процентное содержание азота, что приводит к росту микротвердости покрытия.

Увеличение времени формирования рабочего слоя покрытия влечет за собой рост микротвердости покрытия, поскольку снижается влияние относительно пластичного присоединительного слоя титана. Однако при времени обработки более 5 минут наблюдается отслаивание покрытия, связанное с ростом напряжений в пленке.

С увеличением времени ионной обработки до 4 минут прочность сцепления покрытия с основой растет. Дальнейшее увеличение времени обработки практически не влияет на адгезионную прочность покрытия.

При значениях тока дугового разряда более 90 А прочность сцепления покрытия с основой уменьшается за счет возрастания капельной фазы в плазменном потоке. Низкое давление в вакуумной камере способствует образованию рыхлого покрытия с низкой адгезией к основе (значительная часть ионов металла конденсируется в свободном виде). Максимальная величина адгезии ($\sigma = 22$ МПа) получена при давлении в вакуумной камере $p = (3,2-4,2) \cdot 10^{-2}$ Па, что соответствует структуре нитрида титана стехиометрического состава. При дальнейшем увеличении давления в вакуумной камере наблюдается снижение адгезии покрытия с основой. Это связано как с уменьшением энергии ионов Ti, так и с объемной конденсацией TiN, возникающей из-за избытка реакционного газа в вакуумной камере. Установлено, что покрытие, полученное без окончательной внутрикамерной подготовки поверхности основы, имеет минимальное значение адгезии (7,0 МПа).

Максимальная микротвердость покрытия получена при токе дугового разряда $I = 75$ А. При уменьшении I до 50 А наблюдается снижение микротвердости покрытия из-за уменьшения толщины рабочего слоя TiN. С увеличением тока дугового разряда ($I \geq 90$ А) микротвердость покрытия также снижается. Это связано с тем, что при больших значениях I в плазменном потоке преобладают капельная фаза и макроблоки материала катода, которые имеют низкую микротвердость.

Исследования износостойкости TiN вакуумно-плазменных электродуговых покрытий на изделиях из стекла проводились по схеме периферия круга – плоскость при трении без смазочного материала.

Установлено, что у образцов без присоединительного слоя титана полное разрушение покрытия наблюдается при времени испытаний порядка 60–90 мин. У монослойных покрытий с присоединительным слоем титана имеется ярко выраженный участок приработки. Уменьшение исходной шероховатости основы от $Ra = 0,05$ мкм до $Ra = 0,0056$ мкм увеличивает износостойкость покрытия в 3,6 раза, снижает величину износа за период приработки.

Исследовались адгезия, микротвердость и износостойкость мультислойных TiN вакуумно-плазменных покрытий на изделиях из стекла. При импульсном режиме формирования были получены покрытия с общей толщиной $1 \pm 0,1$ мкм.

Анализ результатов экспериментальных исследований качественных и эксплуатационных характеристик мультислойных TiN вакуумно-плазменных покрытий на изделиях из стекла показал, что по сравнению с монослойными покрытиями обеспечивается повышение износостойкости в 2,2 раза, микротвердости – в 1,8 раза и адгезии – в 1,3 раза. Это объясняется формированием в покрытии слоистой квазиаморфной структуры с неупорядочено-ориентированными зернами.

В **пятой главе** приведены практические рекомендации по разработке технологических процессов подготовки поверхности и нанесения TiN покрытия на изделия из стекла. Приведены результаты промышленных испытаний.

Окончательная (внутрикамерная) подготовка изделий из стекла производится ионами инертного газа Ar^+ при следующих режимах: давление в вакуумной камере $p = (2,7-3,2) \cdot 10^{-2}$ Па; плотность ионного потока $j = 1,2-1,5$ мА/см²; ток разряда $I = 0,2$ А; энергия ионов $E = 2$ кэВ; продолжительность обработки $t = 5-10$ мин; угол установки образцов относительно направления ионного потока $\alpha = 25^\circ \pm 10^\circ$.

Формирование покрытия состоит из двух основных этапов: формирования подслоя Ti и формирования рабочего слоя TiN. Давление в камере при нанесении подслоя Ti – $p = (2,7-3,2) \cdot 10^{-2}$ Па, рабочего слоя TiN $p = (3,2-4,2) \cdot 10^{-2}$ Па. Ток дуги $I_d = 90$ А. Время формирования подслоя $t_{Ti} = 1-2$ мин, а рабочего слоя – $t_{TiN} = 1-3$ мин.

Для определения оптимального количества изделий из стекла марки М1 ГОСТ 111, загружаемых в вакуумную камеру, рассчитан коэффициент потенциальной ионно-электронной эмиссии ($\gamma = 0,143$). Это позволило предложить научно обоснованные схемы загрузки рабочего пространства вакуумной камеры изделиями из стекла, для достижения максимальной производительности процесса и повышения качества покрытий.

По результатам промышленных испытаний рабочих поверхностей кристаллов «Александрит» $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ и окуляров приборов ночного видения установлено, что разработанная технология ионной полировки позволяет повысить ресурс работы кристаллов до 50 % по сравнению с механической полировкой за счет удаления поверхностного дефектного слоя. Фактический экономический эффект от внедрения технологии ионной обработки рабочих поверхностей кристаллов составил: 8586,569 тысяч рублей.

Производственные испытания TiN вакуумно-плазменных защитно-декоративных покрытий, нанесенных на партию стеклоизделий, предназначенных для установки в однокамерные стеклопакеты ОП 5,0-5,0 СП1 СТБ 1108–98 (размерами 0,3 x 0,4 м), показали, что покрытия соответствуют цвету палитры С-19, устойчивы к истиранию, являются химически стойкими, не имеют флуктуаций толщины, на поверхности покрытия отсутствуют затемненные полосы и царапины. Адгезия покрытия с основой составила – 20–22 МПа.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются при чтении лекций и проведении лабораторных и практических работ по дисциплинам «Вакуумные технологии и оборудование», «Основы инженерного творчества и научных исследований» и «Компьютерное моделирование процессов» на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» Белорусского национального технического университета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основании физико-математической модели процесса теплофизического взаимодействия ионов инертного газа аргона с поверхностью изделий из стекла, учитывающей количество энергии, передаваемой поверхности при сосредоточенном ударе ионов и тепловое излучение дугового разряда, а также тепловые потери, обусловленные распылением ионов обрабатываемого материала, тепловым излучением материала основы и ослаблением падающего потока ионов отраженным, установлена зависимость изменения температуры изделий от параметров и условий реализации процесса (материал основы, условия теплоотвода, продолжительность обработки, энергия ионов, плотность ионного потока). На основании проведенных расчетов установлено, что для достижения оптимальной температуры поверхности ($100^\circ \pm 10^\circ \text{C}$), обеспечивающей получение качественных покрытий, время ионной бомбардировки должно находиться в пределах 7–10 мин [1, 10, 22].

2. На основе разработанной физико-математической модели процесса теплофизического взаимодействия частиц покрытия с основой при вакуумно-плазменном формировании покрытия на изделия из стекла рассчитана результирующая энергия связи атомов титана с основой 5,823 эВ, молекул TiN с атомами титана – 3,292 эВ, молекул TiN с основой – 0,036 эВ, латеральное взаимодействие молекул TiN в мономолекулярном слое – 0,143 эВ, энергия связи между молекулами TiN в вертикальном направлении – 0,978 эВ, что позволило, предложить конструктивное построение мультислойных покрытий. Установлены принципы формирования мультислойных покрытий, заключающиеся в том, что покрытие формируется в импульсном режиме работы катодных узлов, причем продолжительность импульса ограничивается предельной суммарной толщиной монослоев i -го слоя мультислойного покрытия (количеством монослоев покрытия $N = 30\text{--}33$ монослоя) при которой нагрев поверхности не приводит к образованию столбчатой структуры покрытия, а время паузы должно быть достаточным для охлаждения сформированного за время импульса слоя покрытия, что обеспечивает получение адгезии до 27 МПа, микротвердости до 21 ГПа [1, 5, 14, 17, 23].

3. Установлен механизм взаимодействия положительно заряженных ионов Ti и молекул TiN с поверхностью диэлектрического материала при формировании вакуумно-плазменного покрытия, заключающийся в том, что положительные ионы материала катода на обрабатываемой поверхности не нейтрализуются, а создают равномерно заряженный слой некомпенсированных зарядов, который препятствует осаждению последующих слоев. Нейтрализация

данного слоя может осуществляться за счет потенциальной ионно-электронной эмиссии при бомбардировке металлической оснастки ионами Ti.

На основе разработанных методики и алгоритма расчета коэффициента потенциальной ионно-электронной эмиссии (для изделий из стекла марки М1 $\gamma = 0,143$) установлено оптимальное соотношение суммарной площади изделий, загружаемых в вакуумную камеру и технологической оснастки, обеспечивающее повышение производительности процесса в 2,5 раза при высоком качестве покрытия [3, 13, 24].

4. Установлено, что для обеспечения полного удаления всех видов загрязнений с поверхности изделий из стекла (хроматограмма представляла собой практически прямую линию, краевой угол смачивания составлял $\approx 2^\circ$) и получения минимальной шероховатости поверхности ($Ra = 0,0050-0,0070$ мкм) технологические параметры процесса подготовки поверхности должны быть следующими: плотность ионного потока $j = 0,8-1,2$ мА/см²; угол установки образцов относительно направления ионного потока $\alpha = 25^\circ \pm 10^\circ$; давление в вакуумной камере $p = (2,7-3,2) \cdot 10^{-2}$ Па; время обработки поверхности ионами инертного газа не менее 5 минут [4, 6, 11, 12, 15, 16, 20-22].

5. Показано, что шероховатость вакуумно-плазменных покрытий защитно-декоративного назначения определяется исходной шероховатостью поверхности изделий из стекла. Установлено, что определяющее влияние на величину микротвердости покрытия оказывает ток дугового разряда. Максимальная микротвердость ($H = 12-13$ ГПа, для мультислойных – $H = 21-23$ ГПа) покрытия получена при токе дугового разряда 70-90 А. Для формирования покрытий с высокими адгезионными свойствами продолжительность внутрикамерной подготовки поверхности должна быть более 4 минут, время формирования покрытия от 3 до 5 минут, ток дуги 90 А, давление в вакуумной камере $(2,0-4,2) \cdot 10^{-2}$ Па, исходная шероховатость поверхности не грубее $Ra = 0,0075$ мкм. Показано, что при трении без смазочного материала характер изнашивания изделий с покрытием зависит от конструкции покрытия, исходной шероховатости и толщины покрытия. Установлено, что уменьшение исходной шероховатости основы от $Ra = 0,05$ мкм до $Ra = 0,0056$ мкм увеличивает износостойкость покрытия в 3,6 раза и снижает величину износа за период приработки.

Установлено, что мультислойные TiN вакуумно-плазменные покрытия на изделиях из стекла по сравнению с монослойными покрытиями обеспечивают повышение износостойкости в 2,2 раза, микротвердости – в 1,8 раза и адгезии – в 1,3 раза за счет формирования в покрытии слоистой квазиаморфной структуры с неупорядоченно-ориентированными зернами [2, 3, 7, 8, 9, 13, 17-19, 23, 24].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан технологический процесс формирования TiN вакуумно-плазменных покрытий на изделиях из стекла (АТЮФ01071.056), позволивший получить покрытия на стеклоизделиях, предназначенных для установки в однокамерные стеклопакеты ОП 5,0-5,0 СП1 СТБ 1108–98 размерами 0,3 х 0,4 м (г. Светлогорск). Производственные испытания показали, что покрытия соответствуют цвету палитры С-19, устойчивы к истиранию, являются химически устойчивыми, не имеют флуктуаций толщины, на поверхности покрытия отсутствуют затемненные полосы и царапины. Адгезия покрытия с основой составила 20–22 МПа.

2. Спроектированы, изготовлены и эксплуатируются приспособления для определения влияния плотности ионного потока и угла атаки ионов на изменение шероховатости поверхности и качество очистки изделий из стекла.

3. В соответствии с рассчитанным коэффициентом потенциальной ионно-электронной эмиссии предложены научно обоснованные схемы загрузки рабочего пространства вакуумной камеры изделиями из стекла, позволяющие повысить производительность процесса нанесения покрытий без снижения качества.

4. Использование разработанной технологии внутрикамерной подготовки поверхности изделий из стекла позволило: увеличить ресурс работы кристаллов александрита $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ на 50 %, увеличить лучевую стойкость в 2 раза и получить фактический годовой экономический эффект в 8586,569 тыс. руб.; повысить химическую устойчивость рабочих поверхностей линз приборов ночного видения.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс подготовки инженерных кадров по специальности 1-36 20 04 «Вакуумная и компрессорная техника».

6. Результаты исследований позволили осуществить новые инженерные решения, выполненные на уровне патентов: способ получения мультислойного вакуумно-плазменного покрытия (пат. 11698 Респ. Беларусь, МПК С 23С 14/00) и способ вакуумно-плазменного нанесения защитно-декоративного покрытия на изделия из стекла и / или керамики (пат. 12760 Респ. Беларусь, МПК С 03С 17/06; С 23С 14/00; С 23С 14/14).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Мрочек, Ж.А. Формирование наноструктурных металл-силикатных материалов вакуумно-плазменным методом / Ж.А. Мрочек, Л.И. Гречихин, С.А. Иващенко, И.С. Фролов, В.М. Голушко // Вестник Полоцкого государственного университета, Серия С, Полоцк. – 2006. – № 4. – С. 2–6.

2. Иващенко, С.А. Разработка программного модуля для расчета скорости осаждения титановой плазмы в среде технологического газа / С.А. Иващенко, И.А. Иванов, С.А. Султан, В.М. Голушко // Вестник Белорусского национального технического университета, научно-технический журнал. – 2006. – № 5. – С. 25–28.

3. Гречихин, Л.И. Кинетика формирования вакуумно-плазменных покрытий на диэлектрических материалах / Л.И. Гречихин, С.А. Иващенко, В.М. Голушко // Упрочняющие технологии и покрытия, Москва. – 2006. – № 8(20). – С. 15–19.

4. Перцовский, А.Л. Оптимизация технологии внекамерной подготовки изделий перед нанесением вакуумно-плазменных покрытий / А.Л. Перцовский, С.А. Иващенко, В.М. Голушко // Вестник Белорусского национального технического университета, научно-технический журнал. – 2007. – № 1. – С. 18–21.

5. Гречихин, Л.И. Упрочнение конструкционных материалов наноразмерными многослойными покрытиями / Л.И. Гречихин, С.А. Иващенко, В.М. Голушко, С.Г. Койда // Упрочняющие технологии и покрытия, Москва. – 2010. – № 9. – С. 7–11.

Материалы конференций

6. Иващенко, С.А. Подготовка поверхности подложки для нанесения вакуумно-плазменных покрытий / С.А. Иващенко, А.М. Самаль, В.М. Голушко // Машиностроение: Республиканский межведомственный сборник научных трудов: в 2 т. – Вып.20 / УП «Технопринт», редкол.: И.П. Филонов (гл. редактор) [и др.]. – Минск, 2004. – Т. 1. – С. 108–112.

7. Голушко, В.М. Технологические особенности методов ионно-плазменного осаждения покрытий в вакууме / В.М. Голушко // Студенческая наука на пороге III тысячелетия: материалы Республиканской студенческой научно-практической конф., Мозырь, 17-18 апреля 2002 г. / Мозырский гос. пед. ин-т; редкол.: Н.Н. Егоров [и др.]. – Мозырь, 2002. – С. 74–76.

8. Голушко, В.М. Влияние технологических параметров на равномерность толщины вакуумно-плазменных покрытий / В.М. Голушко // Инженерно-

педагогическое образование в XXI веке: материалы 59-й научно-практической конференции студентов и аспирантов БНТУ, Минск, 10-11 апреля, 2003 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: С.А. Иващенко [и др.]. – Минск, 2004. – С. 8–10.

9. Голушко, В.М. Упрочняющие и защитно-декоративные свойства вакуумно-плазменных покрытий / В.М. Голушко // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке: материалы 59-й научно-практической конференции студентов и аспирантов БНТУ, Минск, 10-11 апреля, 2003 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: С.А. Иващенко [и др.]. – Минск, 2004. – С. 10–12.

10. Голушко, В.М. Ионная обработка поверхности стеклянных изделий / В.М. Голушко // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке: материалы 60-й студенческой научно-технической конференции БНТУ, Минск, 23–26 апреля, 2004 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: С.А. Иващенко [и др.]. – Минск, 2004. – С. 6–7.

11. Иващенко, С.А. Подготовка поверхности подложки для формирования вакуумно-плазменных покрытий / С.А. Иващенко, В.М. Голушко // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь: материалы международной научно-практической конференции, Минск 20–22 октября, 2004 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2004. – С. 263–266.

12. Голушко, В.М. Вакуумно-плазменные покрытия защитно-декоративного назначения / В.М. Голушко, А.С. Ионова // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке: материалы 61-й республиканской научно-практической конференции, Минск, 28-29 апреля, 2005 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: С.А. Иващенко [и др.]. – Минск, 2005. – С. 192–193.

13. Иващенко, С.А. Особенности формирования вакуумно-плазменных покрытий на стекле и керамике / С.А. Иващенко, В.М. Голушко, А.М. Самаль // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Третьей международной научно-технической конференции, Минск, 2006 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2006. – Т. 2. – С. 249–252.

14. Голушко, В.М. Компьютерное моделирование теплофизических процессов взаимодействия нанослоев вакуумно-плазменных покрытий с неметаллической основой / В.М. Голушко // 8-е Всероссийское совещание-семинар «Инженерно-физические проблемы новой техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана 24–26 октября 2006 г. / изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва – 2006. – С. 11–12.

15. Иващенко, С.А. Методика определения плотности ионного потока и устройство для ее реализации / С.А. Иващенко, В.М. Голушко, А.И. Султан,

Х.Т.Е. Кармажи // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь: материалы II Международной научно-практической конференции, Минск, 19–21 октября 2006 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2007. – С. 205–208.

16. Голушко, В.М. Контроль качества очистки изделий перед формированием покрытий / В.М. Голушко // III Республиканская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов БНТУ: «Инженерно-педагогическое образование в XXI веке», Минск, 26–27 апреля 2007 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: С.А. Иващенко [и др.]. – Минск, 2007. – С. 296–299.

17. Голушко, В.М. Упрочнение конструкционных материалов многослойными покрытиями / В.М. Голушко, Л.И. Гречихин, С.А. Иващенко // Первая международная научная конференция: «Наноструктурные материалы – 2008: Беларусь – Россия – Украина», Минск, 22–25 апреля 2008 г.: Белорус. наука, 2008. – С. 321–322.

18. Иващенко, С.А. Характеристика методов формирования защитно-декоративных покрытий на изделиях из стекла / С.А. Иващенко, В.М. Комаровская // III Международная научно-практическая конференция «Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь», Минск, 23–24 октября 2008 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2009. – С. 323–326.

19. Голушко, В.М. Функциональные параметры и области использования защитно-декоративных покрытий на изделиях из стекла / В.М. Голушко, О.В. Царук // 4-я Республиканская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов БНТУ: «Инженерно-педагогическое образование в XXI веке», Минск, 17–18 апреля 2008 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: С.А. Иващенко [и др.]. – Минск, 2009. – С. 38–40.

Тезисы докладов

20. Голушко, В.М. Сравнительный анализ методов подготовки поверхности для формирования вакуумно-плазменных покрытий / В.М. Голушко // НИРС – 2003: материалы VIII Республиканской научно-технической конф. студентов и аспирантов, Минск, 9-10 декабря 2003 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2003. – Ч. 6. – С. 60.

21. Голушко, В.М. Влияние угла установки образцов при ионной полировке на шероховатость поверхности / В.М. Голушко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф., Могилев, 26 января, 2006 г. / Бел.-Рос. ун-т; редкол. И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – С. 37.

22. Иващенко, С.А. Оптимизация технологии внутрикамерной обработки изделий из стекла / С.А. Иващенко, В.М. Голушко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 6-й Международной научно-технической конференции, Минск, 2008 г. / Белорусский национальный технический ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2008. – Т. 3. – С. 206.

Патенты

23. Способ получения мультислойного вакуумно-плазменного покрытия: пат. 11698 Респ. Беларусь, МПК С 23С 14/00 / И.С. Фролов, Л.И. Гречихин, С.А. Иващенко, В.М. Голушко; заявитель Белорусский национальный технический университет. - № а20061353; заявл. 28.12.2006; опубл. 30.04.2009 / Национальный центр интеллектуальной собственности. – 2009. – 6 с.

24. Способ вакуумно-плазменного нанесения защитно-декоративного покрытия на изделия из стекла и / или керамики: пат. 12760 Респ. Беларусь, МПК С 03С 17/06; С 23С 14/00; С 23С 14/14 / И.С. Фролов, Л.И. Гречихин, С.А. Иващенко, В.М. Голушко; заявитель Белорусский национальный технический университет. - № а20071625; заявл. 27.12.2007; опубл. 30.08.2009 / Национальный центр интеллектуальной собственности. – 2009. – 4 с.

РЭЗІЮМЭ

Камароўская Вікторыя Маратаўна

Тэхналогіі падрыхтоўкі паверхні і нанясення электрадугавых TiN пакрыццяў на вырабы са шкла ў імпульсным рэжыме

Ключавыя словы: вырабы са шкла, падрыхтоўка паверхні, іонная апрацоўка, забруджванні, пакрыццё, шурпатасць, адгезія, зносастойкасць, мікрацверасць, мікраструктура, тэхналогія.

Мэта працы: павышэнне якасных і эксплуатацыйных характарыстык вырабаў са шкла фарміраваннем TiN вакуумна-плазменных электрадугавых пакрыццяў.

Метады даследавання і апаратура: састаў і колькасць забруджванняў вызначаліся метадам газавай хроматаграфіі, параметры шурпатасці паверхні вызначаліся кантактным метадам, працэсы іоннай апрацоўкі і фарміраванне пакрыцця здзейсніліся на ўстаноўцы мадэлі УРМ 3.279.079, структура асновы і пакрыцця вывучаліся з дапамогай сканіруемай электроннай мікраскапіі, адгезію TiN пакрыццяў вымяралі па метадзе Ц. Вівера, даследаванне зносастойкасці пакрыццяў праводзілася па схеме выпрабаванняў – перыферыя круга – плоскасць пры трэнні без змазачнага матэрыялу.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны фізіка-матэматычныя мадэлі працэсаў цеплафізічнага ўзаемадзеяння іонаў інертнага газу Ar^+ з паверхняй асновы і часціц мультыслойнага TiN вакуумна-плазменнага пакрыцця з паверхняй вырабаў са шкла. Вызначаны механізм фарміравання TiN вакуумна-плазменных пакрыццяў на дыэлектрычных матэрыялах, што дазволіла прапанаваць навукова абгрунтаваныя схемы загрузкі працоўнай прасторы вакуумнай камеры для атрымання якасных пакрыццяў пры аптымальнай прадукцыйнасці працэсу.

Даследавана залежнасць якасных і эксплуатацыйных характарыстык пакрыццяў ад тэхналагічных параметраў працэсаў падрыхтоўкі паверхні і нанясення пакрыццяў.

Прапанаваны прынцыпы фарміравання і канструкцыя мультыслойных TiN вакуумна-плазменных пакрыццяў на вырабах са шкла, якія дазволілі атрымаваць пакрыцці з высокімі мікрацвёрдасцю, адгезіяй і зносастойкасцю.

Ступень выкарыстання. Вынікі працы ўкаранёныя ў вытворчасць і навучальны працэс.

Вобласць прымянення: машынабудаванне, оптыка, мікраэлектроніка.

РЕЗЮМЕ

Комаровская Виктория Маратовна

Технологии подготовки поверхности и нанесения электродуговых TiN покрытий на изделия из стекла в импульсном режиме

Ключевые слова: изделия из стекла, подготовка поверхности, ионная обработка, загрязнения, покрытие, шероховатость, адгезия, износостойкость, микротвердость, микроструктура, технология.

Цель работы: повышение качественных и эксплуатационных характеристик изделий из стекла формированием TiN вакуумно-плазменных электродуговых покрытий.

Методы исследования и аппаратура: состав и количество загрязнений определялись методом газовой хроматографии, параметры шероховатости поверхности определялись контактным методом, процессы ионной обработки и формирования покрытия осуществлялись на установке модели УРМ 3.279.079, структура основы и покрытия изучалась с помощью сканирующей электронной микроскопии, адгезию TiN покрытий измеряли по методу Ц. Вивера, исследование износостойкости покрытий проводилось по схеме испытаний – периферия круга – плоскость при трении без смазочного материала.

Полученные результаты и их новизна. Разработаны физико-математические модели процессов теплофизического взаимодействия ионов инертного газа Ar^+ с поверхностью основы и частиц мультислойного TiN вакуумно-плазменного покрытия с поверхностью изделий из стекла. Установлен механизм формирования TiN вакуумно-плазменных покрытий на диэлектрических материалах, что позволило предложить научно обоснованные схемы загрузки рабочего пространства вакуумной камеры для получения качественных покрытий при оптимальной производительности процесса.

Исследована зависимость качественных и эксплуатационных характеристик покрытий от технологических параметров процессов подготовки поверхности и нанесения покрытий.

Предложены принципы формирования и конструкция мультислойных TiN вакуумно-плазменных покрытий на изделиях из стекла, позволившие получать покрытия с высокими микротвердостью, адгезией и износостойкостью.

Степень использования. Результаты работы внедрены в производство и учебный процесс.

Область применения: машиностроение, оптика, микроэлектроника.

THE RESUME

Komarovskaya Victoriya Maratovna

Technologies of preparation of glass products surface and deposition their TiN coating on them by using the electric-arc method in pulsed mode

Key words: glass products, preparation of surface, ionic treatment, contamination, coating, roughness, adhesion, wear resistance, microhardness, microstructure, technology.

The objective of the work providing the enhancement of the qualitative and operating characteristics of the products of glass deposition TiN of vacuum-plasma the electric-arc coatings.

Research methods and equipment: the composition and the amount of contamination were determined using gas chromatography method. Surface roughness parameters were determined using contact method. Ionic treatment and surface preparation processes were put into effect on type URM 3.279.079 plant. The structure of the base and that of the coating were studied through scanning electron microscopy. TiN coatings adhesion was measured with Ts.Viver method. Surface wear resistance research was carried out according to the test pattern – circle periphery – flat surface at friction without lubricant.

Gained results and their novelty. Physical and mathematical models of the thermophysical interaction of ions of inert gas Ar^+ with the surface of the base and that of the particles of a multilayer TiN vacuum-plasma coating with the surface of a glass product have been developed. The mechanism of formation of TiN vacuum-plasma coatings on dielectric materials has been determined, which enables us to propose scientifically substantiated schemes of loading of the workspace of a vacuum chamber to obtain high quality coatings at an optimum production rate of the process.

The dependence of the qualitative and operating characteristics of the coatings on the technological parameters of the process of the preparation of the surface of glass products and the deposition of coatings on them has been investigated.

Principles of formation of multilayer TiN vacuum-plasma coatings on glass products and then structure, making possible the obtaining of coatings with high microhardness, adhesion, and wear resistance, have been proposed.

The degree of practical usage. The results of our theoretical and experimental research have been applied in the production of the indicated coatings and in the educational process.

The sphere of application: machine building, optics, microelectronics.

Научное издание

КОМАРОВСКАЯ
Виктория Маратовна

ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ И НАНЕСЕНИЯ
ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ TiN ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯ ИЗ СТЕКЛА
В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Подписано в печать 03.11.2010.

Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 60. Заказ 1305.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.