

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

¹Государственный научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр
МВД Украины, г. Киев

ВСТУПЛЕНИЕ

Научно-технический прогресс в авиастроении и других областях техники во многом определяется успехами материаловедения и, в первую очередь, достижениями в формировании рабочих поверхностей ответственных деталей. Это вполне закономерно, так как работоспособность материалов в конструкции в основном определяется физико-химическим состоянием поверхности. Уровень знаний о структуре, составе и свойствах свободных поверхностей и поверхностей раздела, о процессах и явлениях, протекающих на этих поверхностях, обуславливает возможность успешного развития прикладных исследований по разработке новых материалов и технологических процессов, что в свою очередь, оказывает решающее влияние на развитие машиностроения. Практически любое воздействие технологического и эксплуатационного характера осуществляется через поверхность, поэтому поверхностные слои в большинстве случаев определяют свойства всего объема материала.

Обеспечение надежности, долговечности агрегатов авиационной техники, как и других деталей машин, технологической оснастки и инструмента является важнейшей задачей, позволяющей не только повысить производительность труда, но и значительно сократить потери дорогостоящих материалов, энергии, трудовых ресурсов.

Эта задача на практике может решаться как путем совершенствования конструкции, применением новых материалов [1-5], так и путем внедрения новых видов поверхностной обработки, включающих нанесение упрочняющих покрытий [6-15].

Традиционные способы повышения работоспособности поверхности деталей и инструмента (поверхностная термообработка, различные диффузионные и другие химико-термические способы обработки, нанесение электролитических покрытий, наплавка и др.) в ряде случаев не обеспечивают получения заданного комплекса эксплуатационных свойств. Поэтому, все большее распространение получают методы поверхностного упрочнения, основанные на использовании достижений физики плазмы и вакуумной техники. Являясь экологически чистыми, эти методы позволяют синтезировать покрытия широкой гаммы: от чистых металлов до твердых соединений.

Среди методов упрочнения поверхностных слоев деталей и инструментов в последние годы все большее внимание привлекают вакуумные ионно-плазменные методы нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев [9-15].

Как известно [11], техника данных методов предусматривает создание потока частиц (атомов, молекул, ионов, кластеров) и взаимодействие этого потока с поверхностью. В результате этого взаимодействия происходит, в зависимости от рода частиц и их энергии, либо травление поверхности, либо конденсация вещества на поверхности, либо насыщение поверхностных слоев бомбардирующими частицами.

В основе всех методов вакуумного ионно-плазменного напыления лежит принцип создания потоков частиц высоких энергий. При нанесении покрытия основной вклад дают ионы и возбужденные атомы и молекулы, энергия которых в десятки и сотни раз превосходит энергию тепловых атомов и молекул. Кроме того, поток, в общем случае, содержит паровую, капельную фазы и твердые микрочастицы вещества с размерами от единиц нанометров до сотен микрометров. Основная энергия, вкладываемая в разряд, содержится в возбужденной и ионизованной компонентах.

Процесс взаимодействия такого сложного по составу и энергетическому спектру потока вещества с твердой поверхностью сводится к протеканию взаимосвязанных конструирующих физических явлений: конденсации, распыления, внедрения. Анализ характерных физических явлений, имеющих место при взаимодействии каждой компоненты потока в отдельности с поверхностью, позволяет предложить в качестве основных параметров, определяющих физику взаимодействия, кинетическую энергию и плотность потока частиц.

Из вакуумных ионно-плазменных методов основное развитие получили метод магнетронно-ионного распыления (МИР) и метод конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ). Их основное различие состоит в способе генерации конденсирующегося плазменного потока. Использование аномального тлеющего разряда для генерации плазмы конденсата в методе МИР дает значительно меньшую плотность частиц по сравнению с генерацией плазмы в катодных микропенках вакуумной дуги (КИБ). Но в последнем случае поток плазмы содержит капельную и паровую компоненты. В обоих случаях доускорение частиц происходит за счет ускорения на потенциале, приложенном к подложке, и, соответственно, кинетическая энергия частиц для этих методов имеет величины одного порядка.

Процессы генерации плазмы в установках магнетронного распыления более стабильны, легко управляемы и имеют большее число степеней независимого управления по сравнению с установками, реализующими метод КИБ. Но существенно более высокая производительность при меньших размерах, возможность использования стандартных источников питания плазменных испарителей (сварочные аппараты, низковольтные мощные тиристорные источники тока) и простота привели к более широкому использованию в машиностроении установок, реализующих метод КИБ.

Широкомасштабное внедрение технологии упрочнения режущих инструментов, деталей и технологической оснастки с помощью покрытий на предприятиях машиностроения и других отраслей опирается в настоящее время на использование серийных вакуумных установок класса «Булат» и «Мир», отличающихся по физическим принципам преобразования пленкообразующих веществ в паровую фазу. Однако практика использования данных установок на большинстве предприятий показала низкую эффективность как оборудования, так и покрытий, обусловленную высоким уровнем брака, связанного с одной стороны с отпуском инструмента или ломкостью его режущих кромок, с другой стороны с низким качеством нанесенного покрытия, не обеспечивающего необходимого повышения стойкости инструмента.

Для получения положительного эффекта от покрытия необходимо подобрать материалы пленкообразующих веществ и композиций их оптимального сочетания в покрытии и обеспечить технологию его нанесения, определяемые материалом и геометрией инструмента детали и конкретными условиями их эксплуатации. В настоящее время разработано значительное количество отличающихся по составу и структуре покрытий, перспективных для использования на металлорежущих инструментах и деталях. Однако их реализация тормозится крайне ограниченными возможностями выпускаемого оборудования. Установки «Булат» и «Мир» не имеют средств автоматизации и программного управления технологическим процессом. Поэтому качество покрытия полностью определяется квалификацией оператора и лиц, ответственных за подготовку инструмента под покрытие.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Последние годы работы по совершенствованию технологии и оборудования для нанесения покрытий, несмотря на определенные успехи, не дали ожидаемых результатов, так как модернизация оборудования осуществлялась скорее в направлении эстетики, чем в совершенствовании управления техпроцессом. Причиной тому служат слабая изученность физических явлений, происходящих при нанесении покрытий и влияния различных технологических параметров на состав, структуру и свойства получаемых покрытий, а также отсутствие надежных средств контроля технологических параметров. Решение этих задач позволит приступить к разработке высокопроизводительного оборудования по нанесению покрытий с высокой степенью автоматизации.

Указанные трудности делают практически невозможным разработку единого техпроцесса упрочнения инструмента и деталей на существующем оборудовании, соблюдение которого обеспечивало бы гарантированное повышение стойкости покрытого инструмента, так как любые изменения в его геометрии, массе, материале и объеме загрузки требуют соответствующих изменений параметров процесса нанесения покрытия. Анализ патентной литературы показывает, что в России широкое развитие получили электродуговые испарители [6-15], совершенствование которых осуществляется по пути снижения капельной фракции и применения многокатодных устройств, однако практически не рассматриваются такие важнейшие вопросы как средства контроля этапов технологического процесса. Пониженный интерес к вопросам качества покрытий приводит к низкой воспроизводимости технологического цикла и высокому проценту брака.

На установках типа «Булат» формирование покрытий происходит осаждением ионов, формируемых с помощью генератора плазмы на основе вакуумной дуги, выполненного в виде

торцевого стационарного холловского плазменного ускорителя. Локальная эрозия расходуемого катода обусловлена высокой плотностью мощности дуги в микропятнах ($T_{дуги} = 3000^\circ\text{C}$ или $10^{11} \dots 10^{12} \text{ Вт/м}^2$). Величина эрозии катода может регулироваться и обеспечивать скорость осаждения $V = 150 \text{ нм/с}$ ($0,1 \text{ мкм/мин}$) [16].

Процесс формирования покрытий состоит из трех основных этапов.

Первый этап – промывка и обезжиривание моющими растворами с последующей химической или физической сушкой, а также обезжиривание в расплаве щелочей.

Второй этап – обработка поверхности высокоэнергетическим потоком металлической плазмы при потенциале смещения $U_{см} = 1,0 \text{ кВ}$ или средней энергией ионов $W_1 = 2 \text{ кэВ}$, при остаточном давлении не ниже 10^{-3} Па . Под воздействием высокоэнергетического потока металлической плазмы происходит не только активация, но и интенсивный нагрев поверхности основы, так как энергия частицы, находящейся в потоке, эквивалента температуре $n * 10^6$ (1эВ эквивалентен температуре $11609,9 \text{ К}$), при этом энергия падающих частиц распределяется на нагрев поверхности – 95 %, разрыхление и удаление оксидных пленок – 5 %.

Количество теплоты dQ , необходимое для нагревания тела, эквивалентно средней энергии ионов на локальной площади подложки S_i в единицу времени dt :

$$dQ \approx W_i S_i dt . \quad (1)$$

В свою очередь средняя энергия ионов равна

$$W_1 = W_{10} + e\bar{z}U_e , \quad (2)$$

где W_{10} – средняя кинетическая энергия частицы (иона) на выходе ускорителя; $e\bar{z}$ – средний заряд частицы (иона) в потоке; U_e – потенциал смещения подложки.

Как известно [17]

$$dQ = C m dT , \quad (3)$$

где C – удельная теплоемкость вещества; m – масса материала подложки.

Масса

$$m = S_i h_i \rho , \quad (4)$$

где S_i – локальная площадь подложки; h_i – глубина слоя применяемого воздействия частицы (иона); ρ – плотность материала подложки.

Подставив массу материала подложки m из (4) в (3), затем dQ из (1), получим

$$C \rho S_i h_i dT \approx W_1 S_i dt . \quad (5)$$

Из (5) следует, что

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{W_1}{C \rho h_i} . \quad (6)$$

Таким образом, приращение температуры dT на локальной площади подложки S_i глубиной слоя ($h_i = 0,1 \dots 10 \text{ нм}$) в микрообъеме поверхности подложки ($U = n * 10^{-3} \text{ нм}^3$) происходит от воздействия частицы (иона) за время $1 \dots 10$ пикосекунда ($10^{-12} \dots 10^{-14}$ секунды) и приводит к изменению химического и фазового состава в поверхностном слое подложки.

Третий этап – формирование покрытия имеет отличительную особенность – уменьшение значения средней энергии W_1 частиц (ионов) в потоке за счет снижения потенциала смещения U_e .

Скорость роста покрытия можно представить в виде

$$V = \frac{\mu}{\rho N_A} \sum_i \left[\alpha_{ki} i j_i - \alpha_{pi} i j - A_i T^{0.5} \exp\left(-\frac{A_2 i}{T}\right) \right], \quad (7)$$

где μ – молекулярная масса покрытия; N_A – число Авогадро; $i j_i$ – плотность потока ионов; A_1, A_2 – коэффициенты в уравнении испарения Кнутсена–Ленгмюра; T – температура поверхности; α_{ki} – коэффициент конденсации; α_{pi} – коэффициент распыления.

Коэффициент α_k зависит от рода металла и энергии частиц (ионов) и фазовый состав покрытия может не совпадать с фазовым составом материала катода. С уменьшением W_i коэффициент конденсации α_{ki} увеличивается, а коэффициент распыления α_{pi} уменьшается.

Следует отметить, что процесс ионного травления должен в последующем плавно переходить в процесс нанесения покрытия, так как время образования адсорбционного монослоя из частиц остаточного газа даже при давлении $p = 0,0133$ Па (10^{-5} мм рт. ст) не превышает $0,1 \dots 0,01$ с. Такой переход от режима травления к режиму напыления практически может быть осуществлен на одном ускорителе плавным уменьшением потенциала смещения U_c , что, в конечном счете, приводит к формированию покрытия на почти ювенильной поверхности.

Исследования [30] указывают на возможность получения заданных эксплуатационных свойств путем управления кинетическими параметрами процесса формирования покрытия.

В связи с применением покрытий в качестве конструкционных к ним необходимо предъявить следующие требования: износостойкость, коррозионная стойкость, фреттингостойкость, сопротивляемость характеристикам разрушения (рис. 1).

Износостойкость полностью определяется параметрами процесса и только регламентированную шероховатость поверхности покрытия можно получить либо путем подготовки исходной поверхности, либо последующей обработкой покрытия. Стабильность свойств во времени можно добиться последующим нагревом материала с покрытием при температурах $300 \dots 400$ °С.

Коррозионная стойкость – свойство трудно осуществимое для этого типа покрытий при данных малых толщинах. По мнению ряда авторов [18-21] для таких покрытий беспористое относительно подложки покрытие получается при его толщине не менее 20 мкм. Вследствие этого для устранения пористости при малых толщинах (7...9 мкм) необходимо применять специальные меры. Одним из направлений решения этого вопроса является увеличение плотности концентрации центров зарождения покрытия, – чем больше плотность центров, тем больше плотность покрытия. Второй путь повышения плотности покрытия – это импульсное повышение отрицательного напряжения на деталях в процессе конденсации. И третий путь – это заполнение пор специальными составами. Остальные параметры обеспечиваются процессом напыления и подготовкой поверхности перед процессом.

Фреттингостойкость можно обеспечить, заканчивая процесс напыления в двухфазной области или около нее, где значения твердости минимальные или же наполняя поры специальными составами. При ведении процесса в двух или более катодной установке можно напылять на твердые покрытия, например TiN, мягкое покрытие типа Al.

Конструкционная прочность и надежность обеспечивается наличием на границе металл-покрытие мягкого буферного слоя. Это свойство формируется в процессе нанесения покрытия. Для получения эксплуатационных свойств покрытия необходимо комплексное воздействие на материал. Сюда относится воздействие на исходную поверхность, на энергетические параметры процесса, а также на готовую структуру покрытия (рис. 2).

Основная задача при подготовке исходной поверхности заключается в создании оптимальных геометрических, энергетических и структурных параметров, формирующих наибольшую плотность и равномерность покрытия. Особое внимание должно уделяться окончательной очистке структуры.

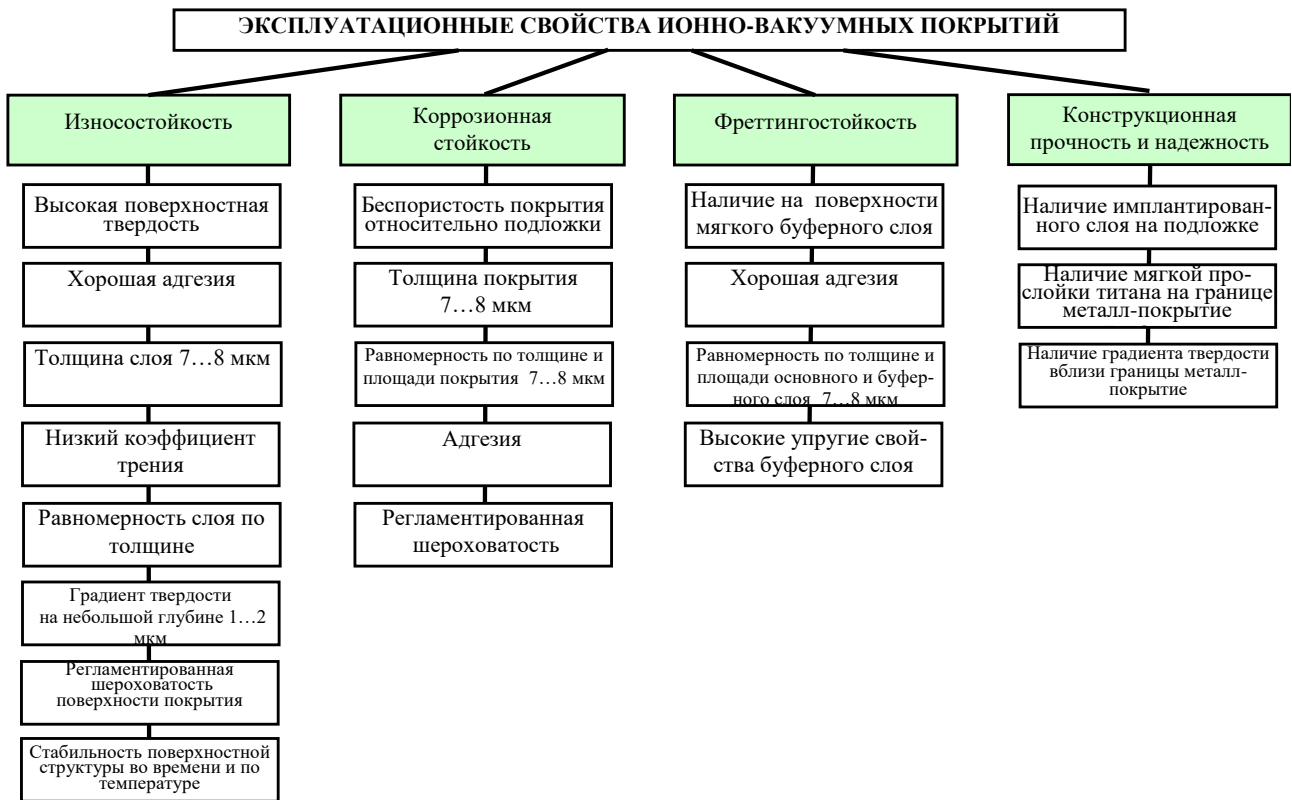


Рисунок 1 – Схема формирования эксплуатационных свойств ионно-плазменных покрытий различного функционального назначения

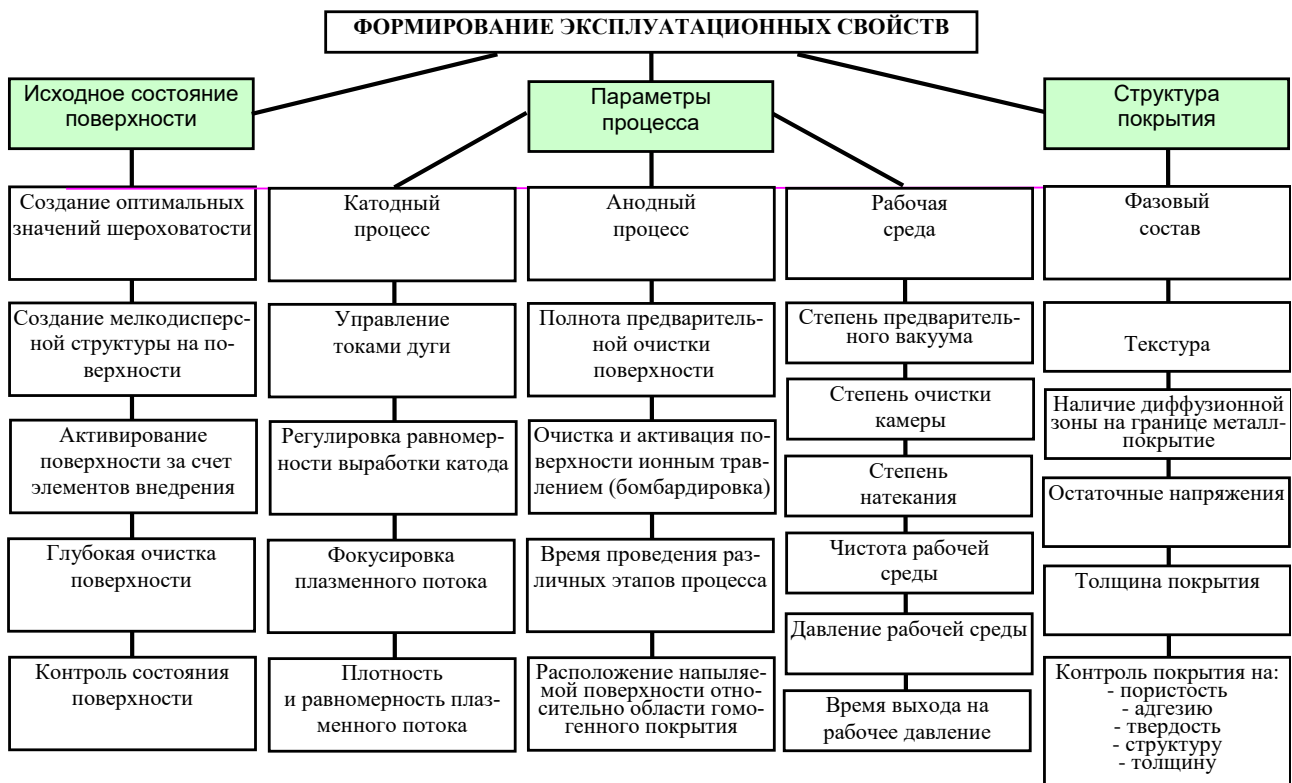


Рисунок 2 – Схема процесса формирования ионно-плазменных покрытий с заданным уровнем эксплуатационных свойств

Многие технологические процессы очистки поверхности включают ультразвуковую обработку как наиболее перспективную. Контроль качества очистки поверхности пока остался открытым.

Вторая большая группа воздействия – это параметры процесса. Наиболее подробно эти процессы изучены для напыления TiN на инструмент. Однако и здесь нельзя сказать о высоком уровне оптимизации параметров процесса, так как существует пока еще большая нестабильность получаемых свойств. Относительно же эксплуатационных свойств, данные по оптимизации параметров процесса отсутствуют, поэтому необходимо продолжить поиск взаимосвязи эксплуатационных свойств с параметрами процесса.

Некоторые эксплуатационные свойства покрытия, такие как стабильность, коррозионная стойкость и фреттингостойкость можно обеспечить обработкой уже полученного покрытия (рис. 2). Такая обработка, по всей видимости, должна улучшить свойства покрытия и избавить его от некоторых недостатков. Однако наиболее перспективным способом улучшения эксплуатационных характеристик все же является вторая группа, то есть параметры процесса.

Для всестороннего исследования взаимосвязи параметров процесса с эксплуатационными свойствами необходимо, прежде всего, единый подход к оптимизации рабочего пространства камеры используемых установок для напыления, с целью получения стабильных и воспроизводимых результатов.

На основе своих исследований и изучения опыта применения ионно-вакуумных установок на ряде предприятий можно предложить следующий подход к данному вопросу. Так как определяющими факторами таких эксплуатационных свойств, как износостойкость и коррозионная стойкость являются поверхностная микротвердость и пористость, то вначале необходимо установить взаимосвязь параметров процесса с этими факторами. Микротвердость необходимо исследовать не только на поверхности, но также и на глубине покрытия на «косых» шлифах под углом 3° , что позволит определить не только толщину покрытия, но и износостойкость его во времени.

Пористость покрытия на подложке из нержавеющей стали типа 13X11H2B2MФ можно определять по ГОСТ 9.302-79, раствор № 44, на других материалах с помощью замеров электрохимических потенциалов. При этом необходимо учитывать, что значения микротвердости, толщины и пористости могут меняться в зависимости от места расположения и угла наклона подложки относительно источника напыления. Поэтому нужно установить области изменения значения этих факторов как по горизонтали, так и по вертикали загрузочного стола при различных параметрах процесса напыления. Проведя такие замеры, можно установить область нанесения однородного покрытия, гарантирующего заданный уровень эксплуатационных свойств. Однако надо помнить, что только сочетание трех факторов – микротвердости, толщины и пористости – обеспечат заданный уровень свойств.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ основных закономерностей изменения свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий элементов конструкций от технологических параметров их формирования.
2. Показаны преимущества создания поверхностей упрочнения деталей вакуумными ионно-плазменными методами магнетронно-ионного распыления и конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ), проведено их сравнение по стабильности процессов, производительности и простоте реализации технологий.
3. Синтезирована схема формирования эксплуатационных свойств ионно-плазменных покрытий различного функционального назначения в соответствии с критериями износостойкости, коррозионной стойкости, фреттингустойчивости и конструкционной прочности и проанализированы возможности реализации этих критериев.
4. Разработана схема процесса формирования ионно-плазменных покрытий с заданным уровнем их эксплуатационных свойств, определяющих три основные группы факторов воздействия на качество покрытия: исходное состояние поверхности детали, параметры процесса и структура покрытия. Комплексный учет этих факторов и их оптимальное сочетание обеспечивают заданный уровень свойств покрытия и их стабильность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструкционные материалы в самолетостроении / А. Г. Моляра, А. А. Коцюба, А. С. Бычков и др. – К. : КВИЦ, 2015. – 400 с.

2. Кива Д.С. Этапы становления и начала развернутого применения полимерных композиционных материалов в авиаконструкциях отечественного назначения / Д.С. Кива // *Авиационно-космическая техника и технология*, 2014. – № 6 (113). – С. 5 – 16.
3. Астанін В.В. Композитні матеріали в конструкціях сучасних літальних апаратів / В. В. Астанін, А. В. Хоменко, О. А. Шевченко // *Вісник НАУ*. – 2004. – № 3. – С. 46 – 52.
4. Андреев А. В. Эксплуатационная несущая способность конструкций отечественных и зарубежных воздушных судов транспортной категории из полимерных композиционных материалов. Часть 1. Общая постановка задачи / А. В. Андреев, А. С. Бычков, А. В. Кондратьев // *Вестник Одесского национального морского университета*. – 2016. – № 45. – С. 23 – 34.
5. Андреев А. В. Эксплуатационная несущая способность конструкций отечественных и зарубежных воздушных судов транспортной категории из полимерных композиционных материалов. Часть 2. Анализ видов, характера и частоты эксплуатационных повреждений / А. В. Андреев, А. С. Бычков, А. В. Кондратьев // *Вестник Одесского национального морского университета*. – 2016. – № 46. – С. 55 – 72.
6. Бычков А. С. Основные причины разрушения конструктивных элементов воздушных судов транспортной категории из алюминиевых сплавов / А. С. Бычков, А. Г. Моляр, И. Р. Игнатович // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»*. – Х. : НАКУ «ХАИ», 2015. – Вып. 70. – С.136 – 151.
7. Бычков А. С. Основные виды и причины разрушения стальных деталей агрегатов отечественных воздушных судов транспортной категории / А. С. Бычков, А. Г. Моляр // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»*. – Х. : НАКУ «ХАИ», 2016. – Вып. 1(85). – С. 47 – 61.
8. Бычков А. С. Эксплуатационная несущая способность деталей конструкций отечественных воздушных судов транспортной категории из титановых сплавов / А. С. Бычков, А. Г. Моляр // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»*. – Х. : НАКУ «ХАИ», 2016. – Вып. 71. – С. 18 – 29.
9. Механіка руйнування і міцність матеріалів : дов. посібник : у тт. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій // О. П. Остащ, В. М. Федірко, В. М. Учанін та ін. ; за ред. О. П. Остащ, В. М. Федірко. – Л. : Сколом, 2007. – 1068 с.
10. Защитная способность ионно-плазменных покрытий / И. Е. Полищук, А. А. Ильин, А. Г. Моляр и др. // *Перспективные методы восстановления деталей и узлов авиационной техники*. – К. : КИИГА, 1989. – С. 15 – 19.
11. Кудинов В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. – М. : Машиностроение, 1981. – 192 с.
12. Закономерности формирования покрытий в вакууме / В. А. Барвинок, В. М. Богданович, Б. С. Митик и др. // *Физика и химия обработки материалов*. – 1985. – № 5. – С. 92 – 97.
13. Нестерова И. И. Эксплуатационные свойства деталей с ионно-плазменными покрытиями / И. И. Нестерова // *Фрикционный контакт деталей машин*. – Калинин : КПИ, 1989. – С. 136 – 140.
14. Моляр А. Г. Многослойные коррозионно-стойкие ионно-плазменные покрытия / А. Г. Моляр, Л. М. Петров, О. Ю. Нечипоренко // *Вопросы авиационной науки и техники*. – М., 1993. – Вып. 2(27). – С. 39 – 48.
15. Петров Л. М. Современные тенденции развития оборудования для ионно-плазменного напыления / Л.М. Петров, И.В. Милосердов // *Покрытия, упрочнение, очистка, экологически безопасные технологии и оборудование : тезисы докладов межотраслевой научной конференции*. – М., 1995. – С. 4.
16. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В. А. Барвинок. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
17. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М. : Мир, 1985. – 520 с.
18. Исследование влияния газонасыщения на структуру и свойства листов из титановых сплавов / Л. М. Петров, С. И. Чертов, А. А. Ильин и др. // *Тезисы докладов научно-методической конференции 25-летия СФМАТИ*. – Ступино, 1982. – С. 2.

19. Исследование влияния содержания алюминия на газонасыщение титанового сплава ВТ23 / Л. М. Петров, С. И. Чертов, А. А. Ильин и др. // Тезисы докладов научно-методической конференции, посвященной 125-летию со дня рождения К. Э. Циолковского. – М., 1982. – С. 1.

20. Изменение поверхностного потенциала титановых сплавов в процессе технологических нагревов / Л. М. Петров, С. И. Чертов, А. А. Ильин и др. // Современные металлические материалы и прогрессивные способы их получения и обработки : тезисы докладов конференции. – М., 1985. – С. 20.

21. Исследование методов очистки деталей под вакуумную обработку / А. Г. Моляр, В. Н. Мних, Д. А. Ткаленко и др. // Прогрессивные технологические процессы и оборудование для термообработки : тезисы докладов отраслевой конференции. – Тбилиси, 1988. – С. 11.

REFERENCES

1. Konstrukcy`onnye matery`aly v samoletostroeny`y / A. G. Molyar, A. A. Kocyuba, A. S. Bichkov y` dr. – K. : KVY`Cz, 2015. – 400 s.

2. Ky`va D. S. Etapy stanovleny`ya y` nachala razvernutoho pry`meneny`ya poly`mnykh kompozy`cy`onnykh matery`alov v avy`akonstrukcy`yax otechestvennogo naznacheny`ya / D. S. Ky`va // Avy`acy`onno-kosmy`cheskaya texny`ka y` technology`ya, 2014. – # 6 (113). – S. 5 – 16.

3. Astanin V.V. Kompozy`tni materialy` v konstrukciyax suchasny`x lital`ny`x aparativ / V. V. Astanin, A. V. Xomenko, O. A. Shevchenko // BychHK NAU. – 2004. – # 3. – S. 46 – 52.

4. Andreev A. V. Ekspluatacy`onnaya nesushhaya sposobnost` konstrukcy`j otechestvennykh y` zarubezhnykh vozdushnykh sudov transportnoj kategoriy` y`z poly`mnykh kompozy`cy`onnykh matery`alov. Chast` 1. Obshhaya postanovka zadachy` / A. V. Andreev, A. S. Bychkov, A. V. Kondrat`ev // Vestny`k Odesskogo nacy`onal`nogo morskogo uny`versy`teta. – 2016. – # 45. – S. 23 – 34.

5. Andreev A. V. Ekspluatacy`onnaya nesushhaya sposobnost` konstrukcy`j otechestvennykh y` zarubezhnykh vozdushnykh sudov transportnoj kategoriy` y`z poly`mnykh kompozy`cy`onnykh matery`alov. Chast` 2. Analy`z vy`dov, karaktera y` chastoty ekspluatacy`onnykh povrezhdeny`j / A. V. Andreev, A. S. Bychkov, A. V. Kondrat`ev // Vestny`k Odesskogo nacy`onal`nogo morskogo uny`versy`teta. – 2016. – # 46. – S. 55 – 72.

6. Bychkov A. S. Osnovnye pry`chy`ny razrusheny`ya konstrukty`vnykh elementov vozdushnykh sudov transportnoj kategoriy` y`z alyumy`ny`evykh splavov / A. S. Bychkov, A. G. Molyar, Y`. R. Y`gnatovy`ch // Otkrytye y`nformacy`onnye y` komp`yuternye y`ntegry`rovannye technology`y` : sb. nauch. tr. Nacz. aerokosmy`ch. un-ta y`m. N.E. Zhukovskogo «Xar`kovsky`j avy`acy`onnyj y`nsty`tut». – X. : NAKU «XAY», 2015. – Выр. 70. – S.136 – 151.

7. Bychkov A. S. Osnovnye vy`dy y` pry`chy`ny razrusheny`ya stal`nykh detalej agregatov otechestvennykh vozdushnykh sudov transportnoj kategoriy` / A. S. Bychkov, A. G. Molyar // Voprosy proekty`rovany`ya y` proy`zvodstva konstrukcy`j letatel`nykh apparatov : sb. nauch. tr. Nacz. aerokosmy`ch. un-ta y`m. N. E. Zhukovskogo «Xar`kovsky`j avy`acy`onnyj y`nsty`tut». – X. : NAKU «XAY», 2016. – Vup. 1(85). – S. 47 – 61.

8. Bychkov A. S. Ekspluatacy`onnaya nesushhaya sposobnost` detalej konstrukcy`j otechestvennykh vozdushnykh sudov transportnoj kategoriy` y`z ty`tanovykh splavov / A. S. Bychkov, A. G. Molyar // Otkrytye y`nformacy`onnye y` komp`yuternye y`ntegry`rovannye technology`y` : sb. nauch. tr. Nacz. aerokosmy`ch. un-ta y`m. N. E. Zhukovskogo «Xar`kovsky`j avy`acy`onnyj y`nsty`tut». – X. : NAKU «XAY», 2016. – Vup. 71. – S. 18 – 29.

9. Mexanika rujnuvannya i micznist` materialiv : dov. posibny`k : u tt. T. 9: Micznist` i dovgovichnist` aviacijny`x materialiv ta elementiv konstrukcij // O. P. Ostash, V. M. Fedirko, V. M. Uchanin ta in. ; za red. O. P. Ostash, V. M. Fedirko. – L. : Skolom, 2007. – 1068 s.

10. Zashhy`tnaya sposobnost` y`onno-plazmennyyh pokryty`j / Y`. E. Poly`shhuk, A. A. Y`ly`n, A. G. Molyar y` dr. // Perspektivnye metody vosstanovleny`ya detalej y` uzlov avy`acy`onnoj texny`ky`. – K. : KY`Y`GA, 1989. – S. 15 – 19.

11. Kudy`nov V. V. Naneseny`e plazmoj tugoplavky`x pokryty`j / V. V. Kudy`nov, V. M. Y`vanov. – M. : Mashy`nostroeny`e, 1981. – 192 s.

12. Zakonomernosty` formy`rovany`ya pokryty`j v vakuume / V. A. Barvy`nok, V. M. Bogdanovy`ch, B. S. My`ty`k y` dr. // Fy`zy`ka y` xy`my`ya obrabotky` matery`alov. – 1985. – # 5. – S. 92 – 97.

13. Nesterova Y`. Y`. Ekspluatacy`onnye svoystva detalej s y`onno-plazmennymy` pokryty`yamy` / Y`. Y`. Nesterova // Fry`kcy`onnyj kontakt detalej mashy`n. – Kaly`ny`n : KPY`, 1989. – S. 136 – 140.

14. Molyar A. G. Mnogoslojnye korrozy`onno-stojky`e y`onno-plazmennye pokryty`ya / A. G. Molyar, L. M. Petrov, O. Yu. Nechy`porenko // Voprosy avy`acy`onnoj nauky` y` texny`ky`. – M., 1993. – Vyp. 2(27). – S. 39 – 48.
15. Petrov L. M. Sovremennye tendency`y` razvy`ty`ya oborudovany`ya dlya y`onnno-plazmennogo napyleny`ya / L.M. Petrov, Y`.V. My`loserdov // Pokryty`ya, uprochneny`e, ochy`stka, ekology`chesky` bezopasnye technology`y` y` oborudovany`e : tezy`sy dokladov mezhotraslevoj nauchnoj konferency`y`. – M., 1995. – S. 4.
16. Barvy`nok V. A. Upravleny`e napryazhennym sostoyany`em y` svojstva plazmennyx pokryty`j / V. A. Barvy`nok. – M. : Mashy`nostroeny`e, 1990. – 384 s.
17. Kuxly`ng X. Spravochny`k po fy`zy`ke / X. Kuxly`ng. – M. : My`r, 1985. – 520 s.
18. Y`ssledovany`e vly`yany`ya gazonasyshheny`ya na strukturu y` svojstva ly`stov y`z ty`tanovyx splavov / L. M. Petrov, S. Y`. Chertov, A. A. Y`I`y`n y` dr. // Tezy`sy dokladov nauchno-metody`cheskoj konferency`y` 25-lety`ya SFMATY`. – Stupy`no, 1982. – S. 2.
19. Y`ssledovany`e vly`yany`ya sodержany`ya alyumny`ya na gazonasyshheny`e ty`tanovogo splava VT23 / L. M. Petrov, S. Y`. Chertov, A. A. Y`I`y`n y` dr. // Tezy`sy dokladov nauchno-metody`cheskoj konferency`y`, posvyashhennoj 125-lety`yu so dnya rozhdeny`ya K. Э. Cy`olkovskogo. – M., 1982. – S. 1.
20. Y`zmeneny`e poverxnostnogo poteny`ala ty`tanovyx splavov v processe technology`chesky`x nagrevov / L. M. Petrov, S. Y`. Chertov, A. A. Y`I`y`n y` dr. // Sovremennye metally`chesky`e matery`aly y` progressy`vnye sposoby`y`x polucheny`ya y` obrabotky` : tezy`sy dokladov konferency`y`. – M., 1985. – S. 20.
21. Y`ssledovany`e metodov ochy`stky` detalej pod vakuumnyyu obrabotku / A. G. Molyar, V. N. Mny`x, D. A. Tkalenko y` dr. // Progressy`vnye technology`chesky`e processy`y` oborudovany`e dlya termoobrabotky` : tezy`sy dokladov otraslevoj konferency`y`. – Tby`ly`sy`, 1988. – S 11.

А. С. Бичков¹

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВАКУУМНИХ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ВІД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЇХ ФОРМУВАННЯ

¹Державний науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, м. Київ

Об'єкт дослідження- закономірності зміни властивостей вакуумних іонно-плазмових покриттів елементів конструкцій.

Мета роботи-розробка схеми процесу формування іонно-плазмових покриттів із заданим рівнем їх експлуатаційних властивостей.

Проведено аналіз основних закономірностей зміни властивостей вакуумних іонно-плазмових покриттів елементів конструкцій від технологічних параметрів їх формування. Показано переваги створення поверхневого зміцнення деталей вакуумними іонно-плазмовими методами: магнетронно-іонного розпилення і конденсації з іонним бомбардуванням, синтезовані схеми формування експлуатаційних властивостей іонно-плазмових покриттів різного функціонального призначення і схема процесу їх формування із заданим рівнем експлуатаційних властивостей.

Ключові слова: вакуумі іонно-плазмові покриття; закономірності зміни властивостей; технологічні параметри формування.

Бичков Андрій Сергійович, кандидат юридичних наук, заступник завідувача лабораторією інженерних, економічних, товарознавських досліджень та оцінювальної діяльності, Державний науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, м. Київ, e-mail: abuc@mail.ru

ANALYSIS OF THE BASIC CHANGE PROPERTIES OF VACUUM ION-PLASMA COATINGS DESIGN ELEMENTS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF FORMATION

¹State research center forensic Mia of Ukraine, Kyiv

The object of research is changing patterns of properties of vacuum ion-plasma coating structural elements.

The purpose of work-development scheme of the formation of ion-plasma coatings with a given level of performance properties.

The analysis of the basic laws of changing the properties of vacuum ion-plasma coating structural elements of the technological parameters of their formation. The advantages of creating a surface hardening of parts by vacuum ion-plasma methods: magnetron sputtering and condensation with ion bombardment, synthesized generating circuit performance properties of ion-plasma coatings of various functional purpose and scheme of the process of their formation with a given performance level.

Key words: vacuum ion-plasma coating patterns; change in the properties; the technological parameters of the formation.

Bychkov Andrey, PhD, Deputy Head Laboratory engineering, economic, commodity research and assessment activities, National Research Center Forensic MIA of Ukraine, c. Kyiv, e-mail: abyc@mail.ru

A. С. Бычков¹

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

¹Государственный научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр
МВД Украины, г. Киев

Объект исследования – закономерности изменения свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий элементов конструкций.

Цель работы – разработка схемы процесса формирования ионно-плазменных покрытий с заданным уровнем их эксплуатационных свойств.

Проведен анализ основных закономерностей изменения свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий элементов конструкций от технологических параметров их формирования. Показаны преимущества создания поверхностного упрочнения деталей вакуумными ионно-плазменными методами: магнетронно-ионного распыления и конденсации с ионной бомбардировкой, синтезированы схемы формирования эксплуатационных свойств ионно-плазменных покрытий различного функционального назначения и схема процесса их формирования с заданным уровнем эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: вакуумные ионно-плазменные покрытия; закономерности изменения свойств; технологические параметры формирования.

Бычков Андрей Сергеевич, кандидат юридических наук, заместитель заведующего лабораторией инженерных, экономических, товароведческих исследований и оценочной деятельности, Государственный научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр МВД Украины, г. Киев, e-mail: abyc@mail.ru