УДК 621.002.56

А. Д. ГРИШКЕВИЧ

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: Gryshkevych.O.D@nas.gov.ua

Мета роботи – розробка комбінованого технологічного процесу поліпшення експлуатаційних характеристик вузлів і деталей з рухомими контактуючими поверхнями. В основу технологічного процесу покладено способи модифікації властивостей металевих поверхонь, що використовують фізичні ефекти при взаємодії оброблюваної поверхні з концентрованими потоками енергії. Розглядається можливість використання іонно-променевої й іонно-плазмової технології для обробки робочих поверхонь деталей, виконаних з високоміцного титанового сплаву. До розробки пред'являється вимога відповідності всіх елементів технології критеріям прогресивності. Показано, що вплив факторів, які впливають на втрату функціональності й довговічність від утомленості деталей, може бути суттєво ослаблено або усунуто. Зміцнення досягається шляхом послідовного або одночасного застосування іонно-променевої обробки поверхні, низькоенергетичної високоінтенсивної імплантації азоту і іонно-плазмового нанесення функціонального наноструктурованого покриття. Представлено першу частину роботи, яка має постановочний характер. Остаточна мета роботи досягається після розробки технологічних плазмових пристроїв. Результати розробки технологічних пристроїв і оптимізації їх застосування в технологічній установці будуть представлені в наступній частині роботи.

Цель работы – разработка комбинированного технологического процесса улучшения эксплуатационных характеристик узлов и деталей с подвижными контактирующими поверхностями. В основу технологического процесса положены способы модификации свойств металлических поверхностей, использующие физические эффекты при взаимодействии обрабатываемой поверхности с концентрированными потоками энергии. Рассматривается возможность использования ионно-лучевой и ионно-плазменной технологии для обработки рабочих поверхностей деталей, выполненных из высокопрочного титанового сплава. К разработке предъявляется требование соответствия всех элементов технологии критериям прогрессивности. Показано, что влияние факторов, влияющих на потерю функциональности и усталостную долговечность деталей, может быть существенно ослаблено или устранено. Упрочнение достигается путем последовательного или одновременного применения ионно-лучевой обработки поверхности, низкоэнергетичной высокоинтенсивной имплантации атомов азота и ионно-плазменного нанесения финишного функционального наноструктурированного покрытия. Представлена первая часть работы, имеющая постановочный характер. Окончательная цель работы достигается при создании плазменных технологических устройств. Результаты разработки технологических устройств и оптимизации их применения в технологической установке будут представлены во второй части настоящей работы.

The aim of this work is to develop a combined technological process for improving the performance characteristics of units and parts with moving contacting surfaces. The process is based on metal surface property modification methods that use physical effects in the interaction of the surface under treatment with concentrated energy fluxes. Consideration is given to a possibility to treat the working surfaces of parts made of a high-strength titanium alloy using ion-beam and ion-plasma technology. All the elements of the technological process must meet progressiveness criteria. It is shown that the effect of factors that adversely affect the functionality and the fatigue life of parts may be significantly diminished or eliminated. Strengthening is achieved by successive or simultaneous use of ion-beam surface treatment, high-intensity low-energy nitrogen atom implantation, and the ion-plasma deposition of a finish functional nanostructured coating. This paper presents part 1 of the work, which is of problem description character. The final goal of the work is achieved with the development of plasma process devices. The results of the development of process devices and the optimization of their use in a process installation will be presented in part 2 of this work.

Ключевые слова: *ионно-плазменная технология, ионно-лучевая технология, ионная имплантация, ионная полировка, нанесение функционального покрытия.*

Введение. Конструкционная прочность металла определяется его объемными и поверхностными механическими характеристиками. Объемные характеристики, как правило, задаются металлургическим легированием. Основные служебные характеристики деталей машин – надежность, сопротивление механическому износу и коррозии, усталостная долговечность, опре-

деляются механическими свойствами поверхностного слоя конструкционного металла. Известно [1], что механическое поведение металла находится в прямой зависимости от его структурно-фазового состояния. Эта зависимость позволяет целенаправленно изменять функциональные и эксплуатационные характеристики элементов конструкции машин изменением структурно-фазового состояния поверхностного слоя металла.

Методы создания на поверхности металлов модифицированных слоев с необходимыми функциональными и эксплуатационными свойствами достаточно изучены, отработаны и широко применяются на практике. При этом отмечают, что традиционные технологии повышения конструкционной прочности металлов и сплавов достигли своего практического предела [2]. В настоящее время актуализируется применение способов управления структурно-фазовым состоянием поверхности металла, основанных на использовании физических эффектов взаимодействия концентрированных потоков энергии с поверхностью металла. Физические способы управления структурно-фазовым состоянием позволяют упрочнять поверхность металла, наносить функциональные покрытия, создавать металлические композиционные материалы, обладающие уникальным сочетанием свойств, которые принципиально отличаются от свойств массивного металла [3].

Установлено, что максимальный эффект модификации достигается при комбинировании различных способов изменения структурно-фазового состояния [4]. Комбинация различных технологий упрочнения позволяет создавать на поверхности металла композитные слои с различной архитектурой. Практическое использование новых комбинированных технологий поверхностной модификации требует создания технологических комплексов, включающих оптимальный набор технологий модифицирования и специализированных технологических устройств для реализации всех технологических переходов поверхностной обработки. В настоящей работе предполагается использовать результаты оригинальных исследований автора и материалы из мировой научно-технической литературы.

Постановка задачи. В настоящей работе решалась прикладная задача разработки комбинированной технологии улучшения функциональных и эксплуатационных характеристик подвижных контактирующих поверхностей и создания новой технологической установки на основе стандартной вакуумной установки типа «Булат». Поставленная задача решалась в соответствии с современным уровнем технологии поверхностного упрочнения.

Принято считать, что новые технологические процессы должны не только улучшать эксплуатационные характеристики обрабатываемых изделий, но и удовлетворять требованиям экономической эффективности, способствовать снижению трудоемкости и себестоимости изделий, а также обеспечивать социальный и природоохранный эффект применения. Экономическая эффективность и прогрессивность новых технологических процессов определяется рядом взаимосвязанных критериев, определяющих соответствие разработки достигнутому мировому техническому уровню и позволяющих построить полностью автоматизированный высокопроизводительный комплекс технологического оборудования. Наиболее важные из этих критериев следующие:

– использование технологических процессов, позволяющих максимально автоматизировать производственный процесс, что в свою очередь, должно обеспечить высокую производительность обработки и качество продукции;

– обеспечение непрерывности технологического процесса, т. е. объединение ряда последовательных технологических переходов в одном технологическом объеме;

– обеспечение адаптивности технологического процесса, т. е. способность его длительного использования в условиях непрерывного появления и развития новых конкурентоспособных процессов.

При разработке технологического комплекса, включающего комбинированную технологию и технологическое оборудование для ее осуществления, использовались результаты оригинальных исследований автора и материалы из мировой научно-технической литературы

Состояние проблемы упрочнения поверхностей контактирующих деталей. В качестве конкретного объекта модифицирования подвижных контактирующих поверхностей рассматривались внутренние и наружные рабочие поверхности деталей подвижных сочленений коаксиального типа. Разработка адаптировалась к требованиям упрочнения деталей гидроцилиндра стойки взлетно-посадочного устройства самолета (шасси).

В процессе эксплуатации шасси самолета испытывает вибрационные и значительные динамические нагрузки. Давление гидрожидкости в полости гидроцилиндра достигает 500 атм. При этом должна обеспечиваться абсолютная герметичность полости высокого давления гидроцилиндра. Для достижения современного технического уровня к изделию предъявляется ряд высоких требований [5]. Масса шасси не должна превышать достигнутого в мировой практике уровня весового совершенства, т.е. 3,5...4,5 % от взлетной массы самолета. Ресурс шасси должен составлять не мене 50 тысяч взлето-посадок в течение 25 лет эксплуатации самолета.

Для достижения требуемого уровня весового совершенства требуется применение более легких и прочных конструкционных материалов. Надежность изделия определяется способностью конструкционных материалов сопротивляться хрупкому разрушению и развитию поверхностных микротрещин. Для обеспечения долговечности изделия необходимо также решение задачи минимизации трения в подвижных сочленениях и максимальное ослабление или полное исключение факторов, влияющих на малоцикловую усталость конструкции. Эти задачи решаются применением в конструкции шасси новых конструкционных материалов – мартенситностареющих нержавеющих сталей ВКС170, ВКС210 и высокопрочного титанового сплава ВТ22 [6]. Сравнение механических характеристик этих материалов представлено в таблице 1 [5].

Таблица 1. Сравнение механических характеристик материалов шасси [5]

Сплав	ρ, кг/м^3	$\sigma_{в,}$ МПа	$\sigma_{0.2,}$ Мпа	Е, МПа
30ХГСН2МА	7770	600 – 1800	1400 – 1600	195000
03Н18К8М5Т (ВКС170)	8100	600 – 1850	1550 – 1800	190000
03Н18К9М5Т (ВКС210)	8010	950 – 2150	1850 – 2050	184000
ВТ22	4620	900 – 1300	1050 – 1150	115000
ρ – плотность; $\sigma_в$ – прочность; $\sigma_{0.2}$ – предел прочности; Е – модуль Юнга				

Высокие удельные прочностные характеристики новых стальных сплавов способствуют повышению ресурса шасси. Применение титанового спла-

ва обеспечивает снижение весовых показателей изделия. Необходимость перехода на новые конструкционные материалы обусловлена также тем, что при использовании сталей типа 30ХГСА ресурсные характеристики ограничиваются электролитической коррозией и коррозией деталей подвижных сопряжений под напряжением.

Однако применение новых конструкционных сталей и титана не отменяет необходимости дополнительного улучшения поверхностных характеристик деталей. Одной из причин этого является наличие на рабочих поверхностях деталей дефектного слоя, который образуется в процессе механической обработки контактирующих поверхностей. В результате абразивного шлифования в поверхностном слое металла возникают внутренние напряжения растяжения и микротрещины, которые с большой вероятностью в процессе эксплуатации развиваются и неблагоприятно влияют на усталостные характеристики изделия.

При эксплуатации шасси основными видами трения контактирующих поверхностей являются трение скольжения, трение при виброперемещении и реверсивное трение [7]. Учитывая это, технология изготовления деталей гидроцилиндра предусматривает модификацию контактирующих поверхностей путем нанесения антифрикционных покрытий. При использовании высокопрочного титанового сплава ВТ22, необходимость улучшения фрикционных характеристик сопряженных поверхностей усугубляется склонностью титана к схватыванию. Для снижения коэффициента трения при изготовлении используют газотермические антифрикционные покрытия [8], гальваническое хромирование [9] или химическое нанесение никель-фосфорного покрытия [10]. Использование этих технологий порождает риск снижения эксплуатационных характеристик изделия. Во-первых, для получения заданного параметра шероховатости поверхностей трения возникает необходимость дополнительного шлифования газотермических и гальванических антифрикционных покрытий, которое, как отмечалось выше, неблагоприятно влияет на усталостные характеристики. Кроме того, гальванические, химические и газотермические покрытия имеют недостаточную износостойкость и характеризуются наличием внутренних напряжений растяжения. Трещиноватость слоя гальванического твердого хрома может быть причиной нарушения герметичности полости гидроцилиндра. Гальваническая и газотермическая технологии нанесения покрытий не обеспечивают достаточный уровень адгезии к поверхности титанового сплава. По этой причине гальванический твердый хром ограниченно допустим только на стальных деталях. Конструктивные особенности шасси и условия эксплуатации изделия не исключают возникновение фреттинга в неподвижных сочленениях, что также требует дополнительного улучшения поверхностных свойств контактирующих поверхностей.

Суммируя сказанное, можно определить основные задачи разрабатываемого технологического комплекса. Это:

1) поверхностная обработка с целью устранения факторов снижения показателя малоцикловой усталости, как то: поверхностных микротрещин и внутренних напряжений растяжения в поверхностном слое;

2) улучшение функциональных и эксплуатационных характеристик сопряженных поверхностей путем модификации свойств рабочих поверхностей без изменения геометрических размеров деталей или нанесение на контакти-

рующие поверхности функционального покрытия. Возможно совместное или раздельное применение этих двух технологий поверхностного упрочнения.

По предварительным оценкам поставленные задачи могут быть решены применением комбинированной технологии, включающей ионно-лучевое травление поверхностного слоя, плазменное азотирование поверхностного слоя и ионно-плазменное нанесение функционального покрытия. Для обоснования применения этих технологий был выполнен анализ металлофизических предпосылок получения необходимого эффекта модификации рабочих поверхностей и физических основ функционирования технологических устройств для осуществления модификации.

Обоснование предварительного выбора способов поверхностного упрочнения и технологических устройств для их осуществления. Учитывая имеющееся разнообразие физических способов модификации свойств поверхности, рассмотрим их особенности и обоснуем предварительный выбор способов, соответствующих требованиям задачи разработки. Сравнивая технологические возможности различных физических способов модификации поверхности [3] и оценивая их пригодность для решения конкретной практической задачи, пришли к следующему.

Основным технологическим параметром большинства традиционных технологий модификации физико-механических свойств металлов является температура. Возможность повышения температуры для расширения функциональных возможностей и интенсификации технологических процессов ограничивается температурами фазовых переходов обрабатываемого материала и рядом других причин.

Проведение технологических процессов модификации поверхностных свойств в плазменной среде существенно упрощает возможность влияния на процессы формирования структуры и физико-механические свойства металлов. Плазменные технологические устройства – генераторы плазмы, позволяют независимо управлять энергией ионов и плотностью ионного тока. Через эти параметры может осуществляться эффективное влияние на параметры модификации.

Плотность ионного тока оказывает влияние на формирование структурно-фазового состояния в неравновесных условиях, что и определяет физико-механические свойства поверхностного слоя (микротвердость, плотность, адгезию, модуль упругости, внутренние напряжения, коэффициент трения, стойкость к износу, химический состав, толщину модифицированного слоя и др.), а также на производительность обработки (скорость распыления, насыщения легирующими элементами или скорость роста покрытия) [11].

Энергия ионов оказывает влияние на процесс формирования потока паров материала покрытия. От энергии ионов зависят процессы зародышеобразования и уплотнения частиц покрытия за счет баллистических эффектов. В свою очередь, совместное влияние энергии ионов и плотности ионного тока определяет температуру обрабатываемой поверхности.

На основании анализа особенностей технологических устройств, использующих для упрочнения физические эффекты взаимодействия, предпочтение можно отдать плазменным технологическим устройствам на основе газового разряда с замкнутым дрейфом электронов [12]. Технологические устройства этого типа могут обеспечить как создание потоков энергетических газовых ионов для проведения ионно-лучевой обработки и ионно-лучевого азотиро-

вания, так и генерацию потока атомных частиц (паров) материала для ионно-плазменного нанесения функциональных наноструктурированных покрытий. Однотипность физических принципов функционирования технологических устройств для выполнения различных технологических функций упрощает разработку и эксплуатации интегрированной системы технологических устройств, системы электропитания разрядов технологических устройств и системы компьютеризированного управления технологическим процессом.

Важным аргументом в пользу выбора плазменных технологий, явилось то, что для их осуществления существуют технологические устройства, которые характеризуются полной функциональной совместимостью при их совместном использовании в одном технологическом объеме. Этими устройствами являются автономный источник энергетичных газовых ионов УАС (ускоритель с анодным слоем) [13, 14] и МРС (магнетронная распылительная система) [15]. Характеристики избранных способов вакуумно-плазменной обработки поверхности и соответствующих технологических устройств соответствуют требованиям, предъявляемым к специализированному технологическому комплексу. Использование плазменных технологических устройств для ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки позволит осуществить низкобюджетную модернизацию стандартной вакуумно-плазменной установки «Булат» в соответствии с критериями прогрессивности.

Основные физические и металло-физические характеристики плазменных способов модификации физико-механических свойств поверхности. Как было определено выше, предварительной операцией модификации физико-механических свойств обрабатываемых поверхностей должно быть устранение факторов технологической наследственности предшествующей механической обработки. Для выполнения этой операции предпочтение отдано технологии ионного травления дефектного поверхностного слоя.

Физические вопросы ионного распыления подробно рассмотрены в литературе [16 – 20]. Ионно-лучевое распыление поверхностного слоя металла энергетичными газовыми ионами широко используется в производстве полупроводникоых и оптических приборов [21]. Как сообщается в [22], ионно-лучевая обработка (ИЛО) обладает значительным потенциалом применения в машиностроении. Ионное травление позволяет стравливать поверхностный дефектный слой металла, не повреждая структуру металла подложки. В [23] сообщается, что в результате такой обработки улучшается шероховатость поверхности, полученная лезвийной обработкой или предварительным шлифованием, а также происходит некоторое улучшение физико-механических свойств поверхности. В настоящее время ионно-лучевые методы играют ключевую роль в оптической технологии [24, 25].

В настоящее время интенсивно разрабатываются теоретические основы упрочняющего воздействия плазмы, созданы технологии, которые уже используются в производственной практике [26]. Физические способы обработки с целью повышения конструкционной прочности и улучшения коррозионных, трибологических и усталостных характеристик контактирующих поверхностей разработаны с учетом основных положений дислокационной теории пластической деформации [27] и классической теории износа [28].

Из представлений этих теорий следует, что низкий абразивный износ и высокая усталостная прочность, а также стойкость к деформации и разрушению связаны с высокой твердостью материала, которая в свою очередь явля-

ется структурно зависимой характеристикой и связана с упругими и пластическими свойствами материала. Для оценки стойкости материала к упругой деформации разрушения используют индекс пластичности материала, равный отношению величины микротвердости H к модулю упругости E. Для оценки сопротивления материала пластической деформации используют параметр H3/E2 [1]. Из этого следует, что для повышения поверхностной прочности конструкционный материал должен обладать высокой твердостью при низком модуле упругости. Как определено в [29], такое сочетание свойств обеспечивается наноструктурированием (нанокристаллизацией) металла поверхностного слоя.

Известно, что в соответствии с законом Холла–Петча твердость материала плавно увеличивается при уменьшении среднего размера структурного элемента материала (зерна или слоя структуры). В [30] был установлен факт, что при уменьшении размера зерна менее 100 нм, изменение твердости ускоряется и перестает подчиняться закону Холла–Петча. Причиной ускорения является смена механизма пластической деформации с дислокационного на зернограничный. Зернограничный механизм проявляется при увеличении объемной доли атомов материала в межзеренных границах. Так, при размере кристаллита (зерна), равном 100 нм, в межкристаллитных границах содержится не более 3% материала. При размере зерна 2 нм эта доля возрастает до 88 % [31]. При наноструктурировании строение и природа межкристаллитных границ становятся ключевым фактором, определяющим процесс пластической деформации. Таким образом, наноструктурирование является определяющим фактором увеличения конструкционной прочности материала.

Принято [3] выделять четыре принципиально различных способа упрочнения, которые в большей или меньшей степени используют эффект наноструктурирования. Это субстрктруктурный, твердорастворный, поликристаллический и многофазный способы упрочнения. Кратко охарактеризуем их.

1. Субструктурное упрочнение используется для чистых металлов. Упрочнение достигается при создании в кристаллической решетке точечных дефектов, образующих субструкту. Дислокации, скользящие через неподвижные элементы субструктуры, испытывают с ее стороны сопротивление. Это явление обусловливает эффект упрочнения металла.

2. Твердорастворное упрочнение основано на введении в кристаллическую решетку основного металла элементов замещения или внедрения в виде атомов других химических элементов. Искажения кристаллической решетки основного металла происходят вследствие различного размера атомов основного металла и внедренного элемента. Искажения решетки твердых растворов замедляют движение границ зерен и тем самым препятствуют их росту. Таким путем удается значительно повысить прочность и другие физические характеристики металла.

3. Поликристаллическое упрочнение. Большинство используемых металлов являются поликристаллами. Наличие границ зерен является фактором упрочнения поликристалла. Для ограничения роста размеров зерен их границы закрепляют малорастворимыми частицами вторых фаз. Они препятствуют движению границ и тем самым замедляют скорость роста зерен и препятствуют миграции дислокаций. Эффективность закрепления границ зерен определяется размером частиц и объемной долей частиц второй фазы. В ультрамелкозернистых (наноструктурированных) материалах и покрытиях объем

материала границы стремится к величине, равной объему зерна. В металлах, упрочненных таким способом, проявляется механизм так называемого зернограничного упрочнения.

4. Многофазное упрочнение заключается в образовании мелких выделений дополнительной мелкодисперсной фазы в матрице основного металла. Эти выделения могут иметь кристаллическую решетку основного металла или иную. Выделения создают поля напряжений, непроходимые для дислокаций и значительно повышающие прочность металла. В отличие от субструктурного, твердорастворного и поликристаллического упрочнения, многофазное упрочнение существенно снижает пластичность металла.

Упрочняющий эффект наноструктурирования структуры металла является частным случаем поликристаллического упрочнения. Нанокристаллизация – измельчение зёренной структуры, перспективна как для объемного, так и для поверхностного упрочнения.

Физические процессы, приводящие к модификации поверхностных свойств металла, происходят в следующей последовательности [32]: воздействие на поверхность – возникновение напряжений в поверхностном слое – образование зон концентрации напряжений – возникновение поверхностных микродеформаций – радиационно-стимулированная диффузия имплантируемых атомов – структурные изменения в поверхностном слое.

Технологические процессы, использующие наноструктурирование как способ модификации поверхностных физико-механических свойств, различаются различными способами активации процесса наноструктурирования.

В промышленности распространен способ активации наноструктурирования внешним силовым воздействием. Этот способ активации используют технологии интенсивной поверхностной деформации в результате фрикционной обработки, ударного наклепа, прокатки, алмазного выглаживания и др. При силовом воздействии в слоях металла, ориентированных вдоль поверхности, происходит повышение плотности структурных дефектов. Слои уплотнения характеризуются наноразмерами и являются эффективным препятствием для дрейфа дислокаций.

Процесс физической активации наноструктурирования потоком энергетичных ионов определяется как низкоэнергетическая имплантация ионов инертного или химически активного газа. В результате этого процесса на поверхности металла формируются градиентные структуры, непроходимые для миграции дислокаций и способствующие упрочнению. Разработаны и применяются способы активации наноструктурирования внешним физическим воздействием. В [32] было показано, что физическая активация нанокристаллизации ионно-лучевым воздействием энергетичными ионами азота приводит к образованию в поверхностном слое металла внутренних напряжений, достаточных для того, чтобы интенсифицировать диффузионные процессы, приводящие к изменению структурно-фазового состояния. Облучение ионами химически активных газов вызывает диссоциацию молекул при взаимодействии с атомами мишени и их внедрение в твердое тело в химически активном состоянии. Это может приводить к ускорению химических реакций на несколько порядков по сравнению с термически активируемыми процессами. Эта зависимость и используется при ионно-лучевом азотировании. При использовании химически активного газа, кроме структурных изменений в материале поверхности, происходит изменение химического состава припо-

верхностного слоя, образуются химические соединения, усиливающие эффект модификации поверхностных свойств. Эта технология позволяет получать на поверхности металла модифицированные слои из оксидов, нитридов, карбидов при существенно более низких температурах, чем температура, необходимая для получения этих соединений термохимическими методами.

В работе [33] процесс низкоэнергетичной имплантации представляется с позиций преобладания процессов ядерного взаимодействия. Падающий на поверхность энергетичный ион взаимодействует с атомами поверхности и передает им часть своей энергии. При этом характер и интенсивность физических процессов зависит от энергии падающих ионов. При достижении величины переданной энергии больше некоторого порогового значения в приповерхностном слое твердого тела образуются радиационные дефекты, стимулирующие процесс радиационно-стимулированной диффузии. Энергия активации диффузии равна единицам электрон-вольт. Энергия химической связи составляет величину порядка 10 эВ. Ионы с такой энергией могут влиять на химические реакции на поверхности твердого тела. При энергии больше 20 эВ, ионы могут создавать точечные дефекты. При энергии более 100 эВ начинается проникновение ионов в объем материала.

Принимая во внимание эффективность азотирования для модификации физико-механических свойств поверхности, рассмотрим особенности современных плазменных технологий азотирования подробнее.

Особенности современных плазменных технологий азотирования. В настоящее время процесс азотирования еще не получил достаточного теоретического обоснования. Теория и практика азотирования развиваются в направлении устранения основных недостатков газовой диффузионной технологии, которые заключаются в высокой технологической температуре и длительности процесса азотирования [34, 35]. Использование в качестве технологической среды плазмы позволяет существенно снизить технологическую температуру и время обработки. Так, технология азотирования в тлеющем разряде уже нашла свою нишу в промышленном производстве. В настоящее время интенсивно исследуются технологические возможности азотирования в плазме разрядов различных типов: в высокочастотном разряде [36], в двойном вакуумно-дуговом разряде (ДВДР) [37, 38], в разряде с полым катодом [39].

В работе [39] представлен обзор особенностей различных способов азотирования в плазме разрядов различных типов. Утверждается, что для увеличения производительности обработки, путем увеличения объема загрузки обрабатываемых деталей, наилучшим вариантом азотирования является обработка в плазме несамостоятельного разряда с полым катодом. С этим трудно поспорить. В этой же работе автор формулирует высокие требования к вакуумным условиям в операционной камере. Напрашивается вывод, что необходимость строгого соблюдения вакуумных условий в производственных условиях не оправдывается полученными преимуществами плазменного способа азотирования с полым катодом.

Очевидно, что невозможно создать универсальную технологию и технологическую установку. В практике чаще приходится адаптировать технологию и технологическое оборудование для обработки определенного типа деталей.

На наш взгляд, для решения задач нашей работы преимуществом обладает технология ионно-лучевого азотирования, определяемая как высокоинтенсивная низкоэнергетическая ионная имплантация азота [40]. Ионно-лучевые способы воздействия [41] на обрабатываемую поверхность, кроме размерной обработки, способны производить значительный модифицирующий эффект на поверхностные физико-механические свойства металлической поверхности. Преимуществом этой технологии, по сравнению с чисто плазменными технологиями азотирования, является локальный характер обработки. Локальность позволяет повысить энергетические характеристики технологического процесса и упростить требования к вакуумным условиям в операционном объеме. Однако ценой снижения требований к соблюдению вакуумной гигиены явилось снижение производительности обработки. Подобный выбор может быть оправдан при обработке ответственных габаритных деталей и при низкой серийности производства.

Высокоинтенсивная низкоэнергетическая имплантация азота. В работах [42, 43] исследована возможность ионно-лучевого азотирования потоком ионов химически активного газа азота с энергиями от 0,5 кэВ до 3 кэВ при величине плотности ионного тока от 1 мА/см^2 до 10 мА/см^2. Полученные результаты перспективны для промышленного применения. Ионно-лучевое азотирование характеризуется более высоким уровнем энергий ионов активного газа азота. Эта особенность технологии позволяет азотировать сплавы, не подающиеся азотированию с использованием диффузионной технологии и низкоэнергетичных плазменных процессов.

Расширение технологических возможностей способа обусловлено ионно-стимулированным характером диффузии энергетических ионов азота. Ионно-стимулированная диффузия позволяет производить азотирование при температурах ниже температуры фазового перехода металла основы. В процессе плазменного азотирования в тонком поверхностном слое металла происходит образование нитридов. Подповерхностный слой металла представляет собой слой внутреннего азотирования. Структура подповерхностного слоя металла измельчается (вплоть до аморфного состояния) в результате образования твердого раствора внедрения атомов азота. Концентрация азота в слое внутреннего азотирования имеет градиентный характер. В зависимости от температуры процесса толщина слоя внутреннего азотирования спадает на толщине до ста микрометров. При азотировании некоторых сплавов (например, высокопрочного титанового сплава) поверхностный слой нитрида титана может препятствовать внутреннему азотированию, являясь барьерным слоем. Для преодоления этого препятствия, при использовании смеси азота и аргона, энергетические ионы аргона могут в реальном масштабе времени производить эффективное ионное травление барьерного слоя нитрида титана.

Практический интерес представляет то, что в результате имплантации атомов азота формируется внутренний модифицированный слой, связанный с кристаллической решеткой конструкционного металла. Образование новой (аморфной) структуры оказывает положительное влияние на физико-механические свойства конструкционного металла. При ионной имплантации, в зависимости от флюенса ионов (интегральной плотности потока ионов), возможно образование, в поверхностных слоях, пересыщенных (метастабильных) твердых растворов и выделение новых фаз, что существенно улучшает физические и механические характеристики поверхности металла.

Рассмотрев основные способы улучшения конструкционной прочности металла применительно к потребностям нашей работы, было подтверждено, что наиболее перспективными для формирования комбинированной технологии и создания технологической установки являются ионно-лучевая обработка (ИЛО) и ионно-плазменная технология нанесения покрытий (по принятой международной классификации – PVD Physical Vapor Deposition). Комбинация (совместное использование) этих двух технологий может существенно дополнить и расширить возможности модификации функциональных и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей.

Рассмотрим подробнее особенности практической реализации ионно-плазменной технологии нанесения покрытий как одного из наиболее универсальных способов поверхностной обработки.

Особенности ионно-плазменной технологии нанесения покрытий. Большой практический интерес для модификации поверхностных свойств изделий из металлов и неметаллов представляет ионно-плазменная технология нанесения наноструктурированных покрытий. При решении задач настоящей работы нанесение высокотвердого антифрикционного покрытия может потребоваться дополнительно к наностуктурирующей модификации рабочих поверхностей.

При использовании покрытий происходит изменение геометрии изделия. Упрочнение достигается нанесением на поверхность детали слоя чужеродного материала с необходимыми физико-механическими свойствами. Следует учитывать, что при нанесении покрытия неизбежно возникает проблема оптимизации свойств интерфейса между поверхностью изделия и покрытием. Необходимо обеспечить адгезионную прочность покрытия на уровне, сравнимом с когезионной прочностью подложки.

При исследовании ионно-плазменного способа нанесении тонкопленичных покрытий было установлено [44], что при сильно неравновесном процессе конденсации из высокоэнергетических ионно-плазменных потоков даже относительно небольшое внешнее воздействие приводит к весьма значительным эффектам в изменении структурно-фазового состояния покрытия. Использование таких воздействий является основой для создания покрытий с уникальными свойствами.

Musil с сотрудниками в своих работах [45] показал, что одним из наиболее эффективных путей изменения физико-механических свойств покрытий является нанесение покрытия в условиях бомбардировки поверхности растущего конденсата энергетическими ионами. Ионная бомбардировка (ионное ассистирование) [38] может выполнятся ионами рабочего газа магнетронного разряда либо, что более эффективно, энергетичными ионами материала покрытия. Ионная бомбардировка приводит к уменьшению размеров кристаллитов, уплотнению их границ, формированию точечных радиационных дефектов, появлению сжимающих напряжений и тем самым изменяет структуру и свойства покрытия. Ионная бомбардировка позволяет управлять механизмом роста конденсируемого покрытия при помощи энергии, поставляемой в конденсат ионами ассистирования. Кинетическая энергия бомбардирующих ионов превращается в тепловую в очень малых объёмах, которые затем охлаждаются с крайне высокими скоростями. Эффект ионного ассистирования по управлению параметрами структуры достигается при бомбар-

дировке конденсата ионами с энергией более 100 эВ при значениях плотности тока ассистирования более 1 мА/см$^{2.}$.

Регулируя энергию и плотность потока бомбардирующих ионов, можно регулировать размеры и ориентацию зёрен, формирование точечных радиационных дефектов, появление сжимающих напряжений и тем самым изменять структуру и свойства покрытия и, как следствие, управлять микротвердостью, плотностью, стехиометрией и остаточными напряжениями в покрытиях.

В [46] уточняется, что размер элемента структуры является ключевым фактором упрочнения. Состояние поверхностей раздела между элементами структуры является очень важным, но не всегда определяющим фактором. На размеры кристаллитов влияют не только энергия ионов ассистирования и температура подложки, но и целый ряд других факторов. Поэтому в каждом конкретном случае требуется оптимизация процесса осаждения.

Основными технологическими параметрами процесса конденсации покрытия являются ток разряда магнетрона, зависящий от напряжения разряда и давления плазмообразующего газа, а также напряжение смещения подложки. Эти параметры в свою очередь определяют плотность ионного тока на подложку и температуру подложки. Как было установлено, каждой конкретной комбинации этих параметров соответствует только одна дискретная структура покрытия. Поэтому невозможно, изменяя один параметр процесса в этой комбинации, изменять структуру осажденной пленки. Кроме того, отмечается, что энергии, доставленные растущей пленке обычным термическим нагреванием и бомбардировкой частицами, не являются физически эквивалентными.

Таким образом, основными задачами разработки технологии осаждения наноструктурированных покрытий являются выбор адекватного способа измельчения зеренной структуры и ее временная и температурная стабилизация. В практическом плане важнейшим аспектом обеспечения технологии является создание плазменных технологических устройств, обеспечивающих выполнение главных технологических условий осаждения покрытий с заданными свойствами.

Способы получения покрытий разнообразны, но все они основаны на переносе атомов материала в атомарном или заряженном состоянии от источника материала покрытия на поверхность конденсации. В качестве источника материала покрытия (паров металла покрытия) оптимально использование магнетронной технологии. Благодаря относительной простоте получения интенсивных потоков материала покрытия в атомном состоянии [47], магнетронная технология имеет преимущества перед другими видами ионно-плазменных технологий. Атомный характер частиц материала покрытия, создаваемых магнетронной распылительной системой, существенно упрощает получение наноструктурированных покрытий с наперед заданными функциональными свойствами.

Современные МРС несбалансированного типа [48, 49] обладают свойствами генерации потоков энергетичных газовых ионов, что расширяет технологические возможности устройства, превращая его в универсальный инструмент для комбинированной ионно-плазменной – ионно-лучевой обработки. МРС несбалансированного типа позволяет выполнять следующие технологические операции: ионная очистка и нагрев подложки перед нанесением по-

крытия; нанесение наноструктурированного покрытия с ионным ассистированием; имплантация с ионным перемешиванием.

Выводы по настоящей работе и направления дальнейшего развития работ.

- Основной задачей настоящей работы является создание технологического комплекса для упрочнения контактирующих поверхностей деталей гидроцилиндра.
- Определены технологические переходы комбинированной технологии упрочнения. В их числе: устранение технологической наследственности предшествующей механической обработки поверхности; модификация поверхностных свойств рабочих поверхностей без изменения их геометрических параметров; улучшение физико-механических свойств рабочих поверхностей нанесением функционального покрытия.
- Произведен выбор физических способов упрочнения и соответствующих выбранным способам технологий и технологических устройств. Предпочтение отдано: технологии ионно-лучевого травления дефектного слоя поверхности; обработке рабочих поверхностей низкоэнергетичной высокоинтенсивной имплантацией азота ионно-лучевым способом; ионно-плазменному нанесению функционального покрытия.
- Выполнен аналитический обзор основных физических и металлофизических особенностей избранных технологий упрочнения.

При выборе оптимальных технологий комбинированной обработки поверхностного слоя механические, химические и электрофизические технологии были отвергнуты как не соответствующие требованию выполнения всего комплекса поверхностной обработки в одном технологическом объеме, в вакуумной камере.

В качестве технологических устройств для осуществления комплексной обработки рабочих поверхностей определены практически однотипные по конструкции плазменные устройства на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов. Этими устройствами являются автономный источник энергетичных ионов для осуществления ионно-лучевой обработки и магнетронная распылительная система для ионно-плазменного нанесения покрытий.

Предполагается, что при одновременном использовании в одной технологической установке плазменных устройств для ионно-лучевой модификации и нанесения покрытий, возможно существенное расширение функциональности установки. С этой же целью, на основе использования двух основных плазменных технологических устройств, планируется рассмотреть варианты дальнейшего расширения номенклатуры обрабатываемых изделий. Планируется возможность трансформации установки для проведения индивидуальной обработки габаритных изделий или групповой обработки маломерных деталей. Ожидается, что разработанное аппаратурное обеспечение ионно-лучевой технологии, кроме декларируемых ионного травления и ионно-лучевого азотирования, позволит дополнительно производить другие варианты плазменного модифицирования свойств поверхности без изменения геометрических параметров изделий, внутренних и наружных рабочих поверхностей. Таким процессом может быть имплантация с ионным перемешиванием.

Во второй части настоящей работы будут рассмотрены вопросы аппаратурного обеспечения принятых и перспективных технологий. Будут представлены результаты проектирования технологических устройств различных типов и назначения, а также варианты их использования для различных видов обработки. Будут представлены результаты экспериментальной отработки устройств на функционирование и результаты их технологического применения по прямому назначению.

1. *Нечаев В. В., Смирнов Е. А., Кохтев С. А., Калин Б. А., Полянский А. А., Стаценко В. И.* Физическое материаловедение. В 6 т. Том 2. Основы материаловедения / Под общей редакцией *Б. А. Калина*. М.: МИФИ, 2007. 608 с.
2. *Степанова Т. Ю.* Технологии поверхностного упрочнения деталей машин. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. 64 с.
3. *Альмов М. И., Елманов Н. Н., Калин Б. А., Калашников А. Н., Нечаев В. В., Полянский А. А., Чернов И. И., Штромбах Я. И., Шульга А. В.*. Физиическое материаловедение. В 6 т. Материалы с заданными свойствами / Под общей редакцией *Б. А. Калина*. М.: МИФИ, 2008. 672 с.
4. *Бойцов А. Г., Машков Н. В., Смоленцев В. Л., Хворостухин Л. А.* Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. М.: Машиностроение, 1991. 144 с.
5. *Рябков В. И., Капитанова Л. В., Бабенко Ю. В.,. Трофимов В. А., Бычкова Н. Н.* Особенности использования титановых сплавов нержавеющих сталей, металлокомпозиционных и антифрикционных материалов в шасси современных самолетов. Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2003. Вып. 1 (36). С. 6–15.
6. *Богданович В. И., Михлин В. И., Докупина И. Л.* Применение титана в узлах пар трения космических аппаратов. Проблемы машиностроения и автоматизации. М.: 1998. № 2 – 3. С. 100–103.
7. *Пономарев М. И., Лось А. В.* Эффективность покрытий на основе вольфрама при обеспечении работоспособности подвижных узлов, изготовленных из титановых сплавов. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2014. № 63. С. 91–95.
8. *Борисов Ю. С.* Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник. К.: Наукова думка, 1987. 342 с.
9. *Богорад Л. Я.* Хромирование. Л.: Машиностроение, 1984. 97 с.
10. *Вансовская К. М.* Металлические покрытия, нанесенные химическим способом. Л.: Машиностроение, 1985. 103 с.
11. *Баранов О. О.* Проблема управления ионным потоком в технологических установках плазменно-ионной обработки. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологи. 2012. № 55. С. 52–66.
12. *Sanochkin Yu. V., Kalashnicov V. K.* The theory of discharge with closed electron drift. ZhTF. 1974. V.44. N12. P. 2501–2516.
13. *Машев Ю. П., Виноградов М. И.* Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электронно-лучевой технологии. М.: Машиностроение, 1989. 56 с.
14. *Zhurin V. V.* .Industrial Ion Sources: Broadbeam Gridless Ion Source Technology, First Edition. У 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Published 2012 by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 311 p.
15. *Кузьмичев А. И.* Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. К.: Аверс, 2008. 244 с.
16. *Плешивцев Н. В.* Катодное распыление. М.: Атомиздат, 1968. 340 с.
17. *Бериш Р.* Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. М.: Мир, 1984. 336 с.
18. *Браун Я.* Физика и технология источников ионов. М.: Мир, 1998. 496 с.
19. *Ивановский Г. Ф., Петров В. И.* Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
20. *Габович М. Д.* Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972. 304 с.
21. *Anders A.* Plasma and ion sources in large area coatings. Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 200. P. 1893–1906.
22. *Габович М. Д. Плешивцев Н. В., Семашко Н. Н.* Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986. 248 с.
23. *Плешивцев Н. В., Бажин А. И.* Физика воздействия ионных пучков. М.: Вузовская книга, 1998. 341 с.
24. *Одинокова Е. В., Панфилов Ю. В., Юрченко П. И.* Перспективы получения нанометровой шероховатости поверхности ионно-лучевым методом. Наука и инновации. 2013. Вып. 6. URL: http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/801.
25. *Черезова Л. А.* Ионно-лучевые методы в оптической технологии. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2007. 151 с.
26. *Сулима В. А., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д.* Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
27. *Приходько В. Ж., Петрова Л. Г., Чудина М. Н.* Металлофизическне основы разработки упрочняющих технологий. М.: Машиностроение, 2003. 384 с.
28. *Польцер Г., Майсснер Ф.* Основы трения и изнашивания. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
29. *Поздняков В. А.* Физическое материаловедение наноструктурных материалов. М.: МГИУ, 2007. 424 с.

30. *Gleiter H*. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. Acta material. 2000. 324 с.
31. *Азаренков Н. А., Погребняк А. Д., Береснев В. М. и др*. Наноматериалы, нанопокрытия, нанотехнологии. Харьков: изд. ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. 209 с.
32. *Забелин С. Ф.* Решение проблемы прочности металлов методами поверхностной нанокристаллизации. Ученые записки ЗабГУ. 5(62). 2015. С. 48–58.
33. *Белоус В. А., Лапшин В. И., Марченко И. Г., Неклюдов И. М.* Радиационные технологии модификации поверхности ФИП. 2003. Том 1. № 1. С. 41–48.
34. *Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. и др*. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
35. *Арзамасов Б. Н.* и др. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 400 с.
36. *Рябчиков А. И.* Высокочастотная плазменно-импульсная имплантация азота в сталь. Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 12/2. С. 69–71.
37. *Аксенов И. И., Андреев А. А., Белоус В. Л., Стрельницкий В. Е., Хороших В. М.* Вакуумная дуга. Киев: Наукова думка, 2012. 727 с.
38. *Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М., Григорьев С. Н.* Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, 236 с.
39. *Борисов Д. П.* Генерация однородной газоразрядной плазмы в несамостоятельном разряде низкого давления для модификации поверхности материалов и и изделий. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Национальный исследовательский Томский государственный университет. Томск, 2015. 161 с.
40. *Белый А. В.* Высокоинтенсивная низкоэнергетическая имплантация ионов азота. Физическая мезомеханика. 2002. № 1. 95 с.
41. *Белый А. В.* Физические и технологические основы ионно-лучевой обработки материалов. Новополоцк: ПГУ, 2010. 84 с.
42. *Берлин Е. В., Сейдман Л. А.* Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. М.: Техносфера, 2010. 528 с.
43. *Берлин Е. В., Коваль Н. Н., Сейдман Л. А.* Плазменна я химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. М.: Техносфера, 2012. 464с.
44. Наноструктурные покрытия. Под ред. *А. Кавалейро, Д. де Хоссона*. Москва, 2011. 752 с.
45. *Musil J., Ŝuna J.* The role of energy in formation of sputtered nanocomposite films. Mater. Scien. Forum. 2005. V. 502. P. 29 –296.
46. *Levchuk D.* Plasma assisted techniques for deposition of superhard nanocomposite coatings. Surface and Coatsng Technologses. 2007. P. 6071–6077.
47. С*вадковский И. В.* Направления развития магнетронных распылительных систем. Доклады БГУИР. 2007. № 2(18). С. 112–121.
48. *Window B., Savvides N*. Unbalanced DC magnetrons as sources of high ion fluxes. J. Vac. Sci. Technol. A. 1986. Vol. 4. P. 453–456.
49. *Savvides N., Window B.* Unbalanced magnetron ion-assisted deposition and property modification of thin films. J. Vac. Sci. Technol. A. 1986. Vol. 4, №. 3. P. 504–506.

Получено 03.07.2017,
в окончательном варианте 12.10.2017