УДК 621.002.56

А. Д. ГРИШКЕВИЧ, С. И. ГРИНЮК

МАГНЕТРОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ГАЗОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

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

В роботі стверджується, що поверхневе зміцнення конструкційного матеріалу деталей машин фізичним впливом на оброблювану поверхню концентрованими потоками енергії є найбільш універсальним і ефективним способом досягнення максимальних функціональних і експлуатаційних показників. Розглядаються технології поверхневої обробки, що базуються на використанні енергетичного потоку газометалевої плазми, який генерується аномальним тліючим розрядом із замкненим дрейфом електронів. Газометалева плазма використовується для модифікації поверхневого робочого шару металу, а також для нанесення наноструктурного функціонального покриття. Для генерації газометалевої плазми в роботі використовується планарна магнетронна розпилювальна система незбалансованого типу, що працює в режимі частотної модуляції струму магнетронного розряду.

Метою роботи є розробка плазмового технологічного пристрою з потужнострумовим імпульсним магнетронним розрядом (ПІМР) для генерації енергетичного потоку газометалевої плазми. Плазмовий технологічний пристрій призначено для комплексної зміцнюючої обробки робочих поверхонь пар тертя. Зміцнення досягається поверхневою модифікацією конструкційного матеріалу високо інтенсивним низькоенергетичним іонним азотуванням з подальшим нанесенням наноструктурного функціонального покриття. Експериментально підтверджено, що ПІМР придатний до генерації потоку енергетичної газометалевої плазми, що забезпечує якісне зміцнення поверхні конструкційного матеріалу. Плазмовий технологічний пристрій призначено для виконання всіх технологічних переходів іонно-плазмової обробки в єдиному вакуумному циклі.

В роботі досліджено просторові характеристики потоку газометалевої плазми. Показано, що розроблений плазмовий пристрій ефективний для локальної обробки робочих поверхонь пар тертя трубчастого типу. Досліджено локальні параметри плазми ПІМР в області оброблюваної поверхні. Отримано зразки з комбінованим зміцненням, що включає попереднє плазмово-пучкове азотування і фінішне нанесення функціонального наноструктурного покриття. Показано, що обробка поверхні в режимі ПІМР забезпечує отримання робочих характеристик, що перевищують функціональні і експлуатаційні характеристики, які отримуються при роботі технологічного плазмового пристрою в режимі стаціонарного магнетронного розряду.

В работе декларируется, что поверхностное упрочнение конструкционного материала деталей машин физическим воздействием на обрабатываемую поверхность концентрированными потоками энергии является наиболее универсальным и эффективным способом достижения максимальных функциональных и эксплуатационных показателей. Рассматриваются технологии поверхностной обработки, которые базируются на использовании высокоэнергетичного потока газометаллической плазмы, который генерируется аномальным тлеющим разрядом с замкнутым дрейфом электронов. Газометаллическая плазма используется для модификации поверхностного рабочего слоя металла, а также для нанесения наноструктурного функционального покрытия. Для генерации газометаллической плазмы в роботе используется планарная магнетронная распылительная система несбалансированного типа, работающая в режиме частотной модуляции разрядного тока магнетрона.

Основной целью работы является разработка плазменного технологического устройства с сильноточным импульсным магнетронным разрядом (СИМР) для генерации энергетичного потока газометаллической плазмы. Плазменное технологическое устройство предназначено для комплексной упрочняющей обработки рабочих поверхностей пар трения. Упрочнение достигается поверхностной модификацией конструкционного материала высокоинтенсивным низкоэнергетичным ионным азотированием с последующим нанесением наноструктурного функционального покрытия. Экспериментально подтверждено, что СИМР пригоден для генерации потока энергетичной газометаллической плазмы, что обеспечивает качественное упрочнение поверхности конструкционного материала. Плазменное технологическое устройство предназначено для выполнения всех технологических переходов ионно-плазменной обработки в едином вакуумном цикле.

В работе исследованы пространственные характеристики потока газометаллической плазмы. Показано, что разработанное плазменное устройство эффективней для локальной обработки рабочих поверхностей пар трения трубчатого типа. Исследованы локальные параметры плазмы СИМР в области обрабатываемой поверхности. Получены образцы с комбинированным упрочнением, включающим предварительное плазменно-пучковое азотирование и финишное нанесение функционального наноструктурного покрытия. Показано, что обработка поверхности в режиме СИМР обеспечивает получение рабочих характеристик, превышающих функциональные и эксплуатационные характеристики, получаемые при роботе магнетронного устройства в режиме стационарного разряда.

This paper states that the surface strengthening of a machine part structural material by the physical action of concentrated energy flows on the surface under treatment is the most universal and effective method for maximizing the function and performance indices. The paper considers surface treatment technologies based on the use of a high-energy gas-metal plasma flow generated by an abnormal glow discharge with closed electron drift. Gas-metal plasma is used in modifying a surface working metal layer and in depositing a nanostructured functional coating. In this work, gas-metal plasma was generated using an unbalanced magnetron sputtering system operating in the magnetron discharge current frequency modulation mode.

The aim of this work was to develop a plasma process device with a high-current pulsed magnetron discharge (HCPMD) for generating a high-energy gas-metal plasma flow. The device is designed for an integrated treatment of friction pair working surfaces. The strengthening is achieved by a surface modification of the structural material via high-intensity low-energy ion nitriding followed by the deposition of a nanostructured functional coating. It was shown by experiment that an HCPMD is suitable for generating a high-energy gas-metal plasma flow thus assuring a high-quality strengthening of the structural material surface. The device is designed for performing all stages of ion-plasma treatment in a single vacuum cycle.

The spatial characteristics of a gas-metal plasma flow were studied, and it was shown that the device developed is more efficient for a local treatment of tube-type friction pair working surfaces. The local parameters of an HCPMD plasma in the vicinity of the surface under treatment were studied. Samples treated by combined strengthening that includes preliminary plasma beam nitriding and the final deposition of a nanostructured functional coating were prepared. It was shown that surface treatment in the HCPMD mode results in performance characteristics superior to those obtained when the magnetron device operates in the stationary discharge mode.

Ключевые слова: *ионно-плазменная технология, высокоинтенсивная низкоэнергетичная ионная имплантация, сильноточный импульсный магнетронный разряд, планарная магнетронная распылительная система, цилиндрическая магнетронная распылительная система, импульсный источник питания разряда.*

Введение. В практике современного машиностроения наиболее распространенным способом обеспечения долговечности машин является поверхностное упрочнение рабочих поверхностей пар трения [1, 2]. Разработано значительное количество разнообразных технологий упрочнения, которые основаны на приложении к обрабатываемой поверхности внешнего механического или физического воздействия. Технологии упрочнения, основанные на физическом воздействии [3, 4], используют для этих целей концентрированные потоки энергии. Эти технологии позволяют модифицировать физико-механические свойства поверхностного слоя конструкционного материала и служат для нанесения покрытий с необходимыми физико-механическими свойствами. Упрочняющая обработка под действием физических факторов достигается в результате происходящих в поверхностном слое материала структурных превращений, диспергирования кристаллической структуры, преобразования межкристаллитных границ и образования вторичных фаз [5]. В качестве физических факторов воздействия может быть лазерное излучение или потоки (пучки) энергетичных частиц электронов или ионов. На использовании концентрированных потоков энергии основаны наиболее универсальные ионно-плазменные технологии упрочнения [6].

Состояние вопроса. В настоящее время магнетронные распылительные системы (МРС) являются одним из основных инструментов ионно-плазменной обработки поверхности. Основным достоинством современных МРС, отличающим их от других систем ионно-плазменной обработки, является отсутствие микрокапельной фазы распыленного материала в генерируемом ими потоке плазмы. В частности, загрязненность генерируемого потока газометаллической плазмы микрокапельной фазой органически присуща другой ионно-плазменной технологии, использующей вакуумно-дуговой принцип генерации газометаллической плазмы. Магнетронные технологии заняли лидирующие позиции в технологии поверхностной обработки благодаря разработке и использованию техники сильноточного импульсного магнетронного разряда – СИМР [7]. Благодаря использованию СИМР, МРС получили возможность генерации незагрязненной микрокаплями газометаллической плазмы, что в настоящее время является ключевым условием проведения современных технологических процессов ионно-плазменного поверхностного упрочнения и нанесения наноструктурных функциональных покрытий.

Охарактеризуем основные особенности реализации и применения СИМР. Особенностью аномального тлеющего разряда (магнетронного разряда) является то, что его наиболее эффективные сильноточные режимы локализуются вблизи границы перехода магнетронного разряда в дуговую моду [8]. При увеличении мощности магнетронного разряда плотность тока на катод МРС может превышать некую критическую плотность (по данным [9] это примерно 30 мА/см^2). Это приводит к локальному перегреву поверхности катода и образованию на его поверхности катодных пятен биполярных дуг. Дуги генерируют широкий спектр ионизированных атомных частиц, а также микрокапли материала катода величиной от 0,1 мкм до 10 мкм. Объем выброса материала катода в виде микрокапельной фазы зависит от энергии, вложенной в вакуумную дугу. От частоты появления дуг в разряде зависит наличие и плотность дефектов в покрытии. Дефекты микроструктуры в функциональном покрытии являются прямым следствием появления в конденсате микрокапель распыленного материала [10].

При нанесении покрытий существенным для улучшения качества обработки является удельная мощность распыляющего магнетронного разряда. Высокоэнергетичное распыление приводит к образованию в разряде ионов распыленного металла. В результате МРС генерирует поток газометаллической плазмы. Наличие заряженной компоненты в потоке плазмы оказывает положительное влияние на технологические характеристики процесса магнетронного напыления. Появляется дополнительная возможность эффективного управления факторами, определяющими производительность технологического процесса и качество получаемого покрытия. При предварительной подготовке напыляемой поверхности потоком газометаллической плазмы, содержащей ионы материала распыляемого катода-мишени, на подложке образуется хорошо связанный с ней подслой материала покрытия толщиной до 10 нм. Это обеспечивает получение высоких адгезионных характеристик покрытия. В результате величина адгезии покрытия может приближаться к показателям, соответствующим эпитаксии [11]. Имеется возможность использования МРС в режиме СИМР для генерации потока активных газовых ионов. Эта возможность может быть использована для проведения локального легирования поверхности высокоинтенсивной низкоэнергетичной имплантацией ионов азота [12].

Для получения наноструктурных покрытий используют МРС с несбалансированной магнитной системой [4]. Магнитная несбалансированность МРС обеспечивает проведение режима ассистирования конденсации покрытия, который характеризуется наличием бомбардировки конденсата низкоэнергетичными ионами [13]. При ионном ассистировании также отдается предпочтение бомбардировке подложки ионами материала покрытия, так как газовые ионы при внедрении в покрытие могут приводить к нарушению его кристаллической структуры.

В [14] сообщается, что комплексная технология упрочнения, включающая модификацию поверхности подложки ионным азотированием и последующее нанесение функционального наноструктурного покрытия, существенно улучшает функциональные и эксплуатационные свойства упрочняемой поверхности. Привлекательно, что при использовании МРС в режиме СИМР появляется возможность использования МРС для проведения всех технологических переходов комплексной технологии поверхностного упрочнения в одном непрерывном рабочем цикле, без перезагрузки.

Сильноточный импульсный режим магнетронного распыления обладает привлекательностью также при использовании его в качестве источника плазмы высокой плотности. Если в стационарной МРС концентрация плазмы вблизи катода составляет (10^{9} – 10^{11}) см$^{-3}$, то в СИМР плотность плазмы может превышать характерные для стационарного магнетронного разряда значения на три порядка. Импульсная плотность мощности на катоде СИМР может достигать значений от сотни до тысячи Вт/см^{2}. При этом, благодаря высокой скважности импульсов разряда, средняя мощность, выделяемая в катоде, остается в характерном для стационарных МРС диапазоне от 1 Вт/см^{2} до 10 Вт/см^{2}, что не увеличивает риск дугообразования на катоде-мишени. Как сообщается в [15], увеличение импульсной амплитуды тока разряда в СИМР до сотен ампер обеспечивает генерацию плазмы с концентрацией до 10^{13} см$^{-3}$, при этом степень ионизации распыленного материала достигает (70 – 90) %.

Нами разработан ряд цилиндрических [16] и планарных [17] магнетронных устройств, предназначенных для обработки внутренних и наружных поверхностей деталей пар трения по традиционной магнетронной технологии. В рамках настоящей работы была произведена модернизация конструкции разработанных МРС с целью их адаптации для эксплуатации в режиме СИМР. Разработан экспериментальный источник питания СИМР с регулируемой частотой модуляции тока магнетронного разряда в диапазоне (0,5 ÷ 100) Гц. Выполненная модернизация превращает магнетронные распылительные устройства в эффективный инструмент как для предварительного упрочнения поверхности подложки ионной имплантацией, так и для нанесения наноструктурных металлических покрытий в одном непрерывном вакуумном цикле.

Постановка задачи. Общей направленностью настоящей работы является обеспечение комплексной технологии упрочнения рабочих поверхностей возвратно-поступательных и вращательных пар трения. Такая ориентация предполагает использование, по крайней мере, двух различных типов конструкции технологических плазменных устройств. Одно устройство необходимо для обработки наружных рабочих поверхностей, другое – для обработки внутренних поверхностей.

Ставилась задача создания магнетронного устройства, обеспечивающего проведение всех переходов упрочняющей обработки в едином вакуумном цикле. Плазменные устройства должны обеспечивать следующие технологические переходы: 1 – ионную очистку, нагрев и активацию обрабатываемой поверхности; 2 – высокоинтенсивное низкоэнергетическое азотирование имплантацией ионов азота; 3 – нанесение функционального наноструктурного покрытия с ионным ассистированием.

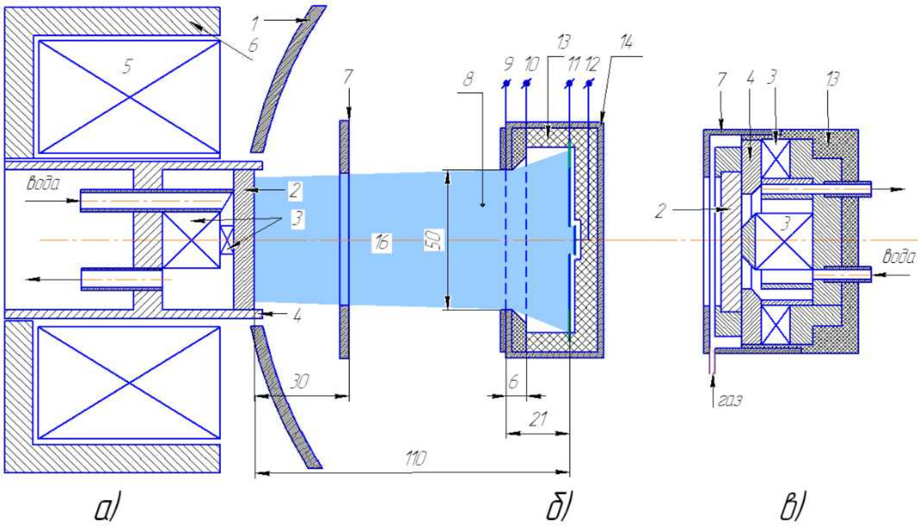
Для проведения упрочняющей высокоинтенсивной низкоэнергетичной ионной имплантации используется плазма пучкового разряда. Пучковая плазма создается в пролетном промежутке между распыляемой мишенью (катод МРС) и обрабатываемой подложкой. Извлечение плазмы из магнитной ловушки магнетрона производится благодаря несбалансированной конфигурации магнитного поля магнетронного устройства.

В первую очередь разрабатывалась планарная магнетронная распылительная система – ПлНбМРС. При разработке цилиндрической магнетронной распылительной системы – ЦМРС, имеющей более простую конструкцию и реже применяемой в технологической практике, предполагалось использовать опыт, полученный при разработке планарного магнетронного генератора.

Так как импульсный разрядный источник находился еще в процессе разработки и его расчетные параметры (частота 100 Гц) не были достигнуты, отработка конструкции и рабочих режимов ПлНбМРС проводилась в низкочастотном режиме от 0,5 Гц до нескольких герц. Низкочастотный режим СИМР не отражается на локальных характеристиках потока газометаллической плазмы, который он генерирует. Для исследования характеристик газометаллической плазмы было бы достаточно использования одноимпульсного разряда. Частотный режим работы СИМР требовался только для определения массы покрытия за измеряемый промежуток обработки. Для выбора низкой расчетной частоты модуляции разрядного тока имелись две причины. Первая причина состояла в том, что разрабатываемое магнетронное устройство предполагалось использовать только для распыления металлических материалов. В этом случае опасность возникновения униполярных дуг существенно понижена. При этом для предотвращения возникновения достаточно модуляции тока с частотой (100 ÷ 500) Гц. Второй причиной создания низкочастотного модулятора были соображения экономического характера. Разработана низкочастотная схема модуляции разряда, которая характеризуется низким бюджетом на изготовление, так как не требует затрат, связанных с использованием дорогостоящих высокочастотных сильноточных полупроводниковых переключающих элементов. Ожидается, что результаты, полученные при отработке и исследовании СИМР с низкочастотным источником питания, могут быть экстраполированы для использования в более высокочастотных режимах, с частотой до (30 – 60) кГц.

Экспериментальные условия. Для исследования параметров импульсной газометаллической плазмы и для оценки технологического эффекта от применения импульсного режима ионно-плазменной обработки использовались две конструкции планарных магнетронов с равными диаметрами катодов – 50 мм. Один из магнетронов был предназначен для установки на смотровом окне 20-литровой вакуумной камеры вакуумной установки ВУП-5М. В этом магнетроне имелась возможность плавного регулирования характеристик магнитного поля. Регулирование магнитного поля было необходимо для исследования и оптимизации несбалансированности магнитной системы ПлНбМРС50 и исследования геометрических параметров генерируемого потока газометаллической плазмы.

Другой планарный магнетрон – ПлНбМРС50 – проектировался как прототип технологического магнетрона с магнитной системой несбалансированного типа. Магнетрон был предназначен для работы в полости вакуумной камеры большого объема (~ 1 $м^3$) и планировался для обработки локальных участков упрочняемых рабочих поверхностей. Особенности условий эксплуатации магнетронов обусловливали особенности их конструкции, но по функциональным характеристикам они были аналогичными. Конструктивные схемы двух типов магнетронов и экспериментальной измерительной оснастки представлены на рисунке 1.



а) планарный магнетнонный распылитель в камере установки ВУП–5М: 1 – стенка вакуумной камеры; 2 – катод магнетрона; 3 – постоянные магниты; 4 – наружный магнитопровод магнетрона; 5 – магнитная катушка; 6 – магнитопровод, разбалансирующий магнитноге поле МРС; 7 – анод МРС

б) ионный анализатор: 8 – входная апертура анализатора; 9 – сеточный электрод 1; 10 – сеточный электрод 2; 11 – коллектор; 12 – плоский зонд; 13 – изолятор; 14 – корпус анализатора

в) магнетронное распылительное устройство ПлНбМРС50

Рис. 1 – Планарные магнетронные распылительные устройства

Магнитная система магнетронов включала осевой неодимовый магнит 3 диаметром 20 мм, высотой 20 мм. Несбалансированность магнитного поля первого типа в магнетроне обычно создается усилением периферийного магнитного потока магнитной системы [4]. На практике этот эффект получают путем установки коаксиальной магнитной катушки в пролетном пространстве между магнетроном и подложкой. Это не лучшее техническое решение. При фланцевой установке магнетрона (на окне вакуумной камеры) коаксиальная магнитная катушка может устанавливаться за пределами вакуумной камеры. При этом существенно ослабляется магнитное поле в пролетном пространстве. Необходимая несбалансированность достигается увеличением габаритов магнитной катушки и требует повышенных энергетических затрат.

В нашей конструкции МРС несбалансированность магнитного поля создавалась наружной магнитной катушкой 4, имеющей 1000 витков медной проволоки сечением 1,5 мм. Катушка помещалась в дополнительный наружный магнитопровод 6. При токе в катушке 4 А магнитная индукция в центре зоны эрозии катода равнялась 0,056 Тл. Постановка наружного магнитопровода 6 усиливала магнитную индукцию на наружном полюсе магнетрона в четыре раза.

Непосредственно в вакуумной камере установки ВУП-5М, соосно с МРС, устанавливался анод магнетронного разряда и анализатор заряженных частиц. Апертура анодного кольца служила для диафрагмирования потока плазмы перед входом в апертуру анализатора. В металлическом корпусе анализатора, изолированно от него, монтировались сетчатые электроды 9 и 10. Через сетки в полость анализатора проникают анализируемые заряженные и нейтральные компоненты потока газометаллической плазмы. Размер ячеек нержавеющих сеток выбирался из условий непрозрачности для прохождения заряженных частиц. При подаче на сетку отрицательного потенциала она становится непрозрачной для электронов. При подаче положительного потенциала – непрозрачной для ионов. Характерный размер ячеек сеточных электродов выбирается из условия $h \leq 2D$, где h – характерный размер ячейки сетки, D – толщина слоя Дебая. Назначение электрода 9 – отсечка электронов плазмы. Электрод 10 – анализирующий электрод, позволяет снимать тормозную характеристику потока ионов, что необходимо для определения функции распределения ионов по энергиям. Коллектор 11 служит для исследования фракционного состава газометаллической плазмы. На коллектор диаметром 65 мм, удаленный от катода магнетрона на 110 мм, регистрируется ток газовых и металлических ионов и масса осаждаемого на нем покрытия. По центру коллектора имеется отверстие диаметром 10 мм, за которым устанавливался токоприемник плоского токового зонда. Плоский зонд служил для определения локальных характеристик плазмы. С помощью анализатора определялись важные технологические характеристики процесса обработки поверхности: скорость осаждения покрытия и доза ионной бомбардировки подложки – флюенс. С помощью анализатора определялась степень сфокусированности потока плазмы и доля металлических ионов в плазме.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Для подтверждения практической эффективности использования потока газометаллической плазмы для проведения упрочняющей обработки поверхности проводилось сравнение некоторых характеристик режима обработки в стационарном режиме работы разряда (500 В/0,5 А) и в импульсно-периодическом режиме работы разряда (400 В/30 А). Частота следования разрядных импульсов равнялась 0,5 Гц, длительности разрядного импульса – 14 мс. При сравнении характеристик газометаллической плазмы соблюдалось равенство мощностей сравниваемых распыляющих разрядов, которое устанавливалось следующим выражением:

$$U_{рст} \times I_{рст} = f\int_0^{\Delta} U(t)I(t)dt,$$

где $U_{рст}$ – разрядное напряжение в стационарном режиме [В], $I_{рст}$ – разрядный ток в стационарном режиме [А], f – частота следования разрядных импульсов [$с^{-1}$], t – время работы разряда [с], Δ – длительность разрядного импульса [с].

Была определена энергетическая эффективность распыления медного катода в стационарном режиме МРС. За 60 минут при мощности стационарного разряда 250 Вт было распылено 2031 мг меди. Энергетическая эффективность составила 0,135 мг/Вт×мин. Это соответствует значению энергетической эффективности распыления меди, полученному в [18]. Сравнение этого показателя в стационарном и в импульсном режиме показало, что этот параметр не зависит от мощности магнетронного разряда.

Сравнивалась скорость нанесения покрытия в стационарном и импульсном режиме. На коллекторе анализатора измерялась масса покрытия за время обработки 60 минут. В стационарном режиме МРС при мощности разряда 250 Вт на коллекторе формировалось покрытие массой 67,4 мг. Покрытие формировалось из нейтральных атомных частиц. При работе МРС в импульсном режиме этот показатель почти вдвое превосходил показатель в стационарном режиме. При равных мощностях разрядов этот результат мог объясняться только улучшением сфокусированности потока газометаллической плазмы в импульсном режиме работы по сравнению со стационарным.

При равных показателях интенсивности режимов распыления, выраженных в единицах [Вт×мин], определялся показатель сфокусированности потока пучковой плазмы на коллекторе в стационарном и импульсном режиме разряда МРС. В импульсном режиме энергетический показатель эффективности фокусировки был определен равным 0,0085 мг/Вт×мин, что почти вдвое превысило аналогичный показатель в стационарном режиме – 0,0045 мг/Вт×мин. Таким образом, была подтверждена версия о лучшей сфокусированности потока газометаллической плазмы за счет имеющихся в потоке плазмы металлических ионов.

Во время импульсного разряда МРС в пролетном пространстве визуально наблюдался узкий поток пучковой плазмы диаметром значительно меньше диафрагмирующего диаметра анода МРС. Степень сфокусированности потока газометаллической плазмы подтверждалась путем определения радиального распределения плотности ионного тока на коллекторе. С этой целью производились измерения ионного тока на всю площадь коллектора и на плоский токовый зонд, расположенный на оси анализатора. Диаметр зонда равнялся 10 мм. Плотность ионного тока на осевой токовый зонд равнялась 0,1 А/см^2. Средняя плотность ионного тока на коллектор равнялась 0,06 А/см^2. Этими измерениями также была подтверждена предельная сфокусированность потока ионов на коллектор. Повышенная сфокусированность потока газометаллической плазмы может быть эффективно использована для проведения локальной упрочняющей обработки поверхности.

Используя полученные значения плотности тока на коллектор, была определена плотность плазмы по Бому. На оси потока плотность плазмы равнялась $2{,}2\times10^{12}$ см$^{-3}$. Средняя по сечению потока плотность плазмы равнялась 4×10^{12} см$^{-3}$.

В импульсном режиме разряда на приосевой плоский зонд снималась вольт-амперная характеристика. Для этого использовалась схема, представленная на рисунке 2. Зондовая характеристика обрабатывалась по стандартной методике [19, 20]. Было определено, что температура электронов T_e в плоскости коллектора равна примерно 8 эВ, плавающий потенциал плазмы был равен примерно 60 В. Локальный потенциал плазмы $\Phi_{пл}$, равный 48 В, определялся из выражения, данного в [21].

$$\Phi_{пл} = \ln\sqrt{M_i / 2® m_e}.$$

где M_i и m_e – соответственно массы ионов и электронов.

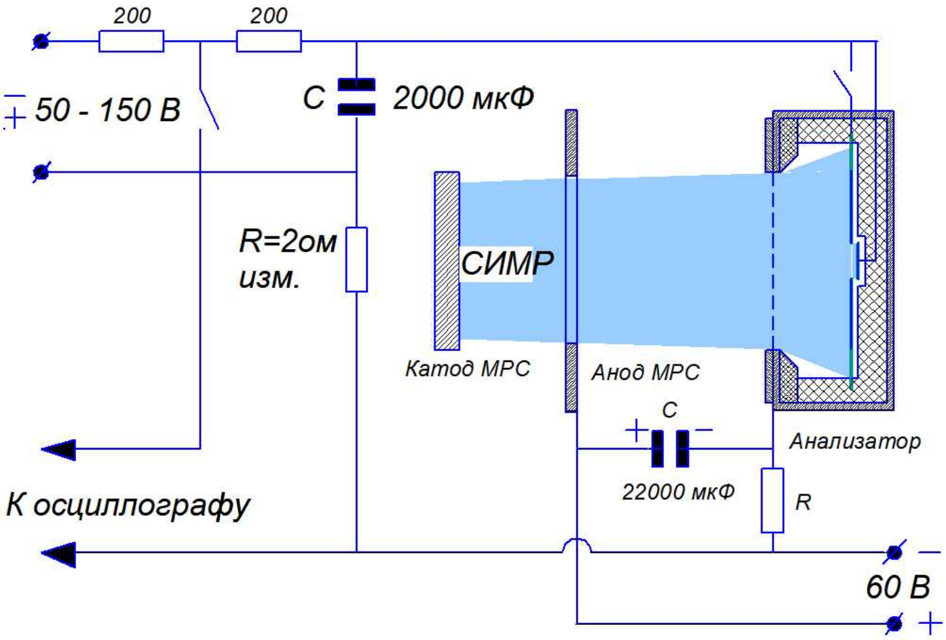


Рис. 2 – Схема измерения параметров газометаллической плазмы

В импульсном режиме работы исследовался зарядовый состав пучковой плазмы в области подложки-коллектора. Из литературных источников известно, что в СИМР генерируется от 5 % до 70 % ионов распыленного материала мишени. Процентное содержание ионов в газометаллической плазме зависит от материала мишени катода и от энергетичности разрядного импульса. Этот вопрос исследовался разными авторами [22, 23]. Учитывая, что металлические ионы играют важную роль в повышении качества покрытия, нами было исследовано содержание металлических ионов в плазме сильно несбалансированного магнетрона ПлНбМРС, работающего в режиме СИМР. Относительна доля ионизированных M_i и нейтральных атомов – M_n в области коллектора анализатора, определялась весовым способом по величине осадка на коллекторе анализатора и равнялась согласно выражению:

$$\Theta = \frac{M_i}{M_i + M_n}.$$

Для определения доли металлических ионов в токе на коллектор использовалась методика, отличная от методик, использующихся в [22] и [23]. В работе использовался блок-анализатор (см. рис. 2). Для отсечки электронов от проникновения в полость анализатора, использовалась мелкоструктурная сетка с оптической прозрачностью 0,326. Для повышения точности определения доли ионов учитывались тонкие эффекты, искажающие значения показателя оптической прозрачности сетки. Так, в [23] было обнаружено, что для получения истинной величины оптической прозрачности сетки необходимо учитывать геометрический фактор, учитывающий влияние углового разброса траекторий нейтральных частиц, проходящих через сетку. Из-за этого часть нейтралов осаждается на сетке. Для учета этой зависимости нами использован метод экспериментального определения этого геометрического фактора. Сравнивалась масса осадка на коллекторе, полученная с сеткой и без нее. В нашем случае реальный коэффициент прозрачности сеточного электрода был уточнен и равнялся 0,25. Содержание металлических ионов в потоке газометаллической плазмы определялось с применением уточненного коэффициента прозрачности сеточного электрода.

Покрытие на коллекторе анализатора формировалось потоком прошедших через сетку нейтралов и ионов распыленного металла. В эксперименте регистрировалась масса покрытия и токи на коллектор, обусловленные газовыми и металлическими ионами. Доля металлических ионов в покрытии определялась путем сравнения массы покрытий, осажденных на коллектор при отрицательном и положительном смещении коллектора относительно сеточного электрода. При отрицательном потенциале коллектора – 60 В – на коллекторе конденсировались как нейтральные атомы, так и ионы металла. Положительный потенциал коллектора + 60 В препятствовал конденсации ионов распыленного металла. Это позволяло определить долю ионов металла, формирующую металлическое покрытие на коллекторе. Было определено, что доля ионов металла в потоке металлических частиц на коллектор равна 43 % .

При отрицательном смещении сравнивалась величина плотности ионного тока на коллектор в стационарном и импульсном режиме МРС. В стационарном режиме плотность ионного тока равнялась 0,9 $мА/см^2$ при напряжении смещения – 60 В. Эта величина близка к рекомендуемой плотности тока ионов ассистирования для получения наноструктурного покрытия [13]. В режиме импульсного разряда ПлНбМРС плотность ионного тока на коллектор могла достигать величины 0,18 $А/см^2$ при смещении (100 ÷ 200) В. Такой режим может обеспечивать проведение форсированной обработки поверхности ионным распылением. В том числе он может обеспечивать высокоинтенсивную низкоэнергетичную ионную имплантацию.

Приведенные выше оценки подтверждают эффективность импульсного способа формирования потока газометаллической плазмы для проведения различных способов ионно-плазменной обработки поверхности.

Заключение. В работе разработаны действующие макеты плазменных технологических устройств, позволяющие генерировать высокоэнергетические потоки газометаллической плазмы. Характеристики создаваемых технологическими устройствами потоков газометаллической плазмы позволяют проводить отработку и оптимизацию комплексных технологических процессов упрочнения пар трения. Для питания разрядов плазменных устройств опробовано низкобюджетное схемное решение импульсного источника питания магнетронного разряда. Показано, что сильноточный импульсный режим работы, удовлетворяющий требованиям технологии комплексной обработки, эффективен и на частотах до 100 Гц. Исследованы характеристики плазмы в области обработки. Определены основные технологические и эксплуатационные характеристики комплексного технологического устройства. Получены исходные данные для проектирования опытных вариантов технологических устройств и опытного технологического процесса.

1. *Степанова Т. Ю.* Технологии поверхностного упрочнения деталей машин. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. 64 с.
2. *Сулима В. А., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д.* Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
3. *Новиков Н. В., Бидный А. А., Ляшенко Б. А. и др.* Методы упрочнения поверхности машиностроительных деталей. Киев: Ин-т сверхтвердых материалов, 1989. С. 64–65.
4. *Свадковский И. В.* Направления развития магнетронных распылительных систем. Доклады БГУИР. 2007. № 2(18). С. 112–121.

5. *Панин В. Е., Сергеев В. П., Панин А. В.* Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 254 с.
6. *Кадыржанов К. К.* Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. М.: изд. МГУ, 2005. 640 с.
7. *Кузьмичев А. И.* Импульсные магнетронные распылительные системы. Сб. трудов Харьковской научной ассамблеи ISTFE-14, Харьков: ННЦ ХФТИ, 2014. С. 221–244.
8. *Грановский В. Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 543 с.
9. *Мозгрин Д. В., Фетисов И. К., Ходаченко Г. В.* Экспериментальное исследование сильноточных форм квазистационарного разряда низкого давления в магнитном поле. Физика плазмы. 1995. Том 21. №5. С. 422–433.
10. *Аксенов И. И., Андреев А. А., Белоус В. А. и др.* Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование. Киев: Наукова думка, 2012. 727 с.
11. *Ehiasarian A. P., Wen J. G., Petrov I.*. Interface microstructure engineering by high power impulse magnetron sputtering for the enhancement of adhesion. Journal of Appl. Physics. 101 (2007), 054301.
12 *Белый А. В., Кукареко В. А., Лободаева О. В. и др.* Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов. Минск: ФТИ, 1998. 218 с.
13. *Musil J., Suna J.* The role of energy in formation of sputtered nanocomposite films. Vfter. Scien. Forum. 2005. V. 502. P. 239–260.
14. *Бойцов А. Г., Машков Н. В., Смоленцев В. Л.* Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. М.: Машиностроение, 1991. 144 с.
15. *Сочугов Н. С., Оскирко В. О., Спирин Р. Е.* Источник питания для магнетронных распылительных систем. ПТЭ. 2013. № 2. С. 62–68.
16. Патент на корисну модель, 102744 України, МПК С23С 14/00. Незбалансована циліндрична магнетронна розпилююча система / *Гришкевич О. Д.*; заявник і патентоволодар ІТМ НАНУ і ДКАУ. Заявл. 28.10.2013; опубл. 24.01.2014. Бюл № 1.
17. *Гришкевич А. Д., Гринюк С. И., Кучугурный Ю. П.* Технологические плазменные устройства на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов. Техническая механика. 2013. №4. С 43–57.
18. *Рогов А. В, Капустин Ю. В., Мартыненко Ю. В.* Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Критерии оптимизации. ЖТФ. 2015. Том 85. Вып. 2. С. 126–134.
19. *Ершов А. П.* Метод электрических зондов Ленгмюра. М.: Физический факультет МГУ. 2007. 26 с.
20. *Подгорный И. М.* Лекции по диагностике плазмы. М.: Атомиздат. 1968. 220 с.
21. *Каган Ю. М., Перель В. И.* Зондовые методы исследования плазмы. Успехи Физических Наук. 1963 г. Т. LXXXI. Вып. 3. С. 409–452.
22. *Kouznetsov V., Macak K., Schneider J. M., Helmersson U., Petrov I.* A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities. Surf. Coat. Technol. 1999. V. 122. Iss. 2–3. Pp. 290–293. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00292-3
23. *Poolcharuansin P., Bowes M, Petty T. J. and J. W. Bradley*. Ionized metal flux fraction measurements in HiPIMS discharges. Journal of Phys. D: Appl. Phys. (2012). № 45. P. 1–5.

Получено 13.05.2019,
в окончательном варианте 19.06.2019