

УДК 537.533.9: 537.525.5: 533.9.07

СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ГРИГОРЬЕВ

научный сотрудник Института сильноточной электроники
Сибирского отделения РАН

grigoriev@opee.hcei.tsc.ru

ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ ДЕВЯТКОВ

научный сотрудник Института сильноточной электроники
Сибирского отделения РАН

vlad@opee.hcei.tsc.ru

ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ ДЕНИСОВ

инженер Института сильноточной электроники Сибирского
отделения РАН

volodyadenisov@yandex.ru

НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ КОВАЛЬ

доктор технических наук, заведующий лабораторией
плазменной эмиссионной электроники Института сильноточной
электроники Сибирского отделения РАН

koval@opee.hcei.tsc.ru

ИЛЬЯ ВИКТОРОВИЧ ЛОПАТИН

младший научный сотрудник Института сильноточной
электроники Сибирского отделения РАН

lopatin@opee.hcei.tsc.ru

ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ ШУГУРОВ

младший научный сотрудник Института сильноточной
электроники Сибирского отделения РАН

shugurov@opee.hcei.tsc.ru

ВЛАДИСЛАВ ВИКТОРОВИЧ ЯКОВЛЕВ

инженер Института сильноточной электроники Сибирского
отделения РАН

vlad000@rambler.ru

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ СЛОЕВ И ПОКРЫТИЙ

В статье представлены вакуумные ионно-плазменные и электронно-лучевые установки для модификации поверхности материалов и изделий, разработанные в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН. Они позволяют проводить ионно-плазменную очистку и активацию поверхности изделий и ее азотирование с последующим нанесением сверхпрочных наноструктурных покрытий либо электронно-лучевую обработку поверхности с ее оплавлением, изменяющую ее фазовый состав (вплоть до наноструктурирования), шероховатости и твердости.

Ключевые слова: плазма, электроразрядное оборудование, ионно-плазменные технологии, азотирование, осаждение покрытий, электронный пучок, модификация поверхности

Ионно-плазменная обработка материалов и изделий, в том числе очистка и активация поверхности, создание поверхностных слоев с измененным химическим и фазовым составом, увеличенной твердостью и коррозионной стойкостью, напыление различных функциональных покрытий, получила широкое распространение в науке и промышленности.

К распространенным методам модификации поверхности можно отнести ионное травление и активацию, ионно-плазменное азотирование, электродуговое либо магнетронное напыление покрытий. Комбинирование вышеупомянутых методов модификации поверхности позволяет существенно улучшить потребительские свойства обрабатываемых изделий и оптимизировать те или иные ха-

теристики модифицированных поверхностей для конкретных конечных требований.

С целью комбинирования различных методов ионно-плазменной обработки в едином технологическом цикле в Институте сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН) были созданы специализированные технологические установки «ДУЭТ», «ТРИО» и «КВАДРО» [4], [6], [7]. В данной работе представлены описание этих установок и примеры реализации технологических процессов с их использованием. В описываемых установках возможна реализация в едином технологическом цикле последовательно нескольких различных операций обработки материалов и изделий. К этим операциям относятся: предварительный нагрев и обезгаживание, ионная очистка,

травление и активация поверхности изделий дуговой плазмой; химико-термическая обработка (азотирование) для формирования на поверхности обрабатываемого изделия диффузионного слоя с использованием плазмы несамостоятельного дугового разряда низкого давления; нанесение электродуговым плазменно-ассистированным методом однослойных и многослойных сверхтвердых (>40 ГПа) нанокристаллических покрытий на основе чистых металлов или их соединений (нитридов, карбонитридов, карбидов). Для этого установки оснащены генераторами газовой и металлической плазмы. Кроме того, в данной статье описана установка электронно-лучевой обработки поверхности изделий «СОЛО», на которой реализованы процессы электронно-пучковой полировки поверхности металлов и сплавов и процессы сверхбыстрой закалки поверхности изделий, приводящие к наноструктуризации поверхностного слоя.

1. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХТВЕРДЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

1.1. Автоматизированные установки для получения сверхтвердых наноструктурированных покрытий комбинированным методом азотирования и плазмоассистированного вакуумно-дугового напыления

Установки «ДУЭТ», «ТРИО», «КВАДРО» являются линейкой развития оборудования для реализации комплексного метода ионно-плазменной обработки поверхности материалов и изделий. Комплексный метод обработки, реализованный в данных установках, включает в себя плазменное азотирование и плазмоассистированное вакуумно-дуговое нанесение твердых и сверхтвердых (>40 ГПа) покрытий. В процессе создания данных установок последовательно улучшались параметры плазмогенераторов, источников питания разрядов и системы автоматизации работы установки.

Основное назначение описываемых установок – упрочнение режущего инструмента из быстрорежущей стали и твердых сплавов штамповкой оснастки, пресс-форм и других деталей машин и механизмов путем вакуумного ионно-плазменного азотирования в плазме несамостоятельного дугового разряда и нанесения на их поверхность металлических и композиционных покрытий методом электродугового плазменно-ассистированного напыления сверхтвердых наноструктурированных слоев.

1.1.1. Описание установки для комплексной ионно-плазменной обработки поверхности деталей и изделий «ДУЭТ»

Установка оборудована двумя плазменными источниками: плазменным источником с накаленным катодом ПИНК [2] для генерации объемной газоразрядной дуговой плазмы и дуговым

катодным распылителем для осаждения комплексных покрытий типа TiN. Плазмогенераторы могут работать как в независимом режиме, так и совместно – дутом. Установка включает в себя рабочую вакуумную камеру, вакуумную систему, систему газового питания, систему водяного охлаждения, систему электропитания и систему управления с элементами автоматизации. Общий вид установки показан на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид установки «ДУЭТ»

Функционально управление установкой разделено на два модуля: технологический и вакуумный.

Автоматизированная система управления установки, обеспечивающая безопасность работы и позволяющая автоматизировать процесс вакуумной откачки, конструктивно выполнена в виде отдельной стойки и состоит из двух контроллеров, каждый из которых отвечает за работу своего модуля: технологического и вакуумного. Контроллеры в соответствии с вшитыми в них алгоритмами преобразуют команды, получаемые с панелей управления, в рабочие импульсы аналоговых и дискретных выходов и контролируют их прохождение.

Рабочая камера, изготовленная из нержавеющей стали и имеющая внутренние размеры $750 \times 750 \times 750$ мм, автоматически откачивается турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 1000 л/с до давления 10^{-3} Па. Плазмогенератор ПИНК расположен на верхнем фланце камеры, а катодный дуговой испаритель – на боковом. Стенки камеры, вал манипулятора и корпусы плазмогенераторов оборудованы водяными системами охлаждения, подача воды в которые контролируется автоматизированной системой управления. Система вакуумных клапанов работает от сжатого воздуха, а цикл откачки полностью автоматизирован. Отрицательное электрическое смещение на обрабатываемые детали и изделия прикладывается либо от низковольтного (до -300 В), либо от высоковольтного (до -1500 В) источников питания с непрерывной регулировкой, оборудованных системой подавления дуг, предотвращающей длительное существование микродуг на поверхности обрабатываемых

ваемых изделий. Управление этими источниками питания производится вручную. Источник питания плазмогенератора ПИНК снабжен защитной системой, препятствующей переходу разряда в режим горения с катодным пятном. Рабочие газы подаются на установку посредством двухканальной автоматизированной системы СНА-2. Для работы главным образом используются два вида газа – аргон и азот. Контроль и индикация давления в вакуумной системе осуществлены с использованием цифровых вакуумметров, разработанных в ИСЭ СО РАН.

С внутренней стороны рабочей камеры на вращающемся валу крепится стол, на который устанавливаются напыляемые инструменты. Стол имеет 12 позиций, в каждую позицию устанавливается по одному инструменту или кассете с инструментами. Вращение вала с закрепленным на нем столом обеспечивает вращение каждого инструмента или кассеты вокруг своей оси и вращение вокруг оси стола. В центре стола имеется гнездо для установки инструмента или кассеты в центре камеры. Установка «ДУЭТ» используется для отработки новых режимов электродугового плазмоассистированного напыления функциональных покрытий с использованием многокомпонентных катодов.

1.1.2. Описание установки для комплексной ионно-плазменной обработки поверхности деталей и изделий «ТРИО»

В состав установки «ТРИО» входят: газоразрядный источник ПИНК, обеспечивающий ток несамостоятельной дуги до 250 А без катодного пятна, этот источник предназначен для нагрева, очистки и активации поверхности изделия, а также плазменного ассистирования при напылении функциональных покрытий; два дуговых испарителя с током до 150 А, которые служат для распыления материала катода и нанесения функциональных покрытий. Плазмогенераторы могут работать как в независимом режиме, так и совместно. Установка включает рабочую вакуумную камеру, вакуумную систему, систему газового питания, систему водяного охлаждения, систему электропитания и автоматическую систему управления.

Главным исполнительным устройством схемы автоматического управления является промышленный контроллер ADAM-5000. Управление компонентами системы осуществляется как дискретными, так и аналоговыми сигналами.

Общий вид и меню управления технологическим процессом установки приведены на рис. 2.

Водоохлаждаемая вакуумная камера установки выполнена в форме горизонтального цилиндрического сосуда диаметром 500 мм и длиной 500 мм с двумя боковыми технологическими дверцами. На боковых дверцах, а также на верхней части камеры имеются фланцы для установки источников плазмы. На нижней плоскости корпуса камеры имеется фланец для установки механизма вращения манипулятора.

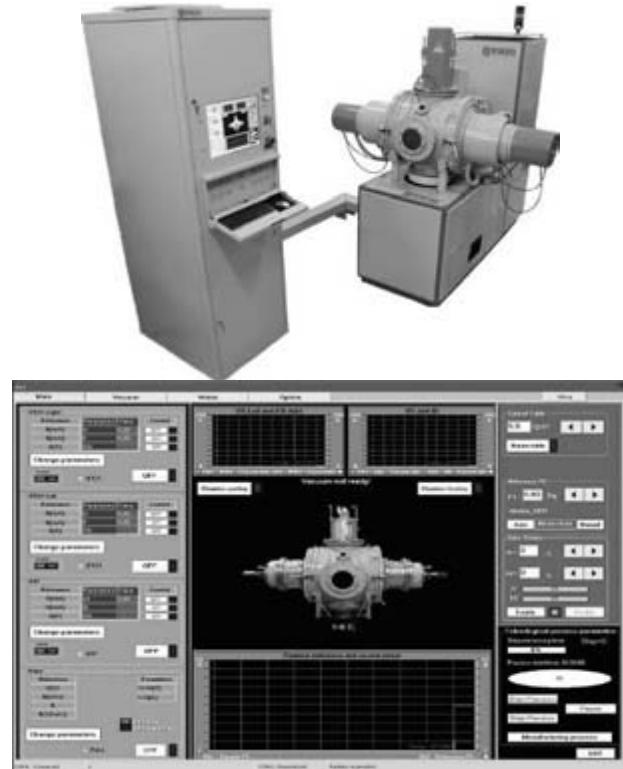


Рис. 2. Общий вид и меню управления технологическим процессом комплексной вакуумной ионно-плазменной установки «ТРИО»

Вакуумная камера откачивается посредством двух пластинчато-роторных насосов со скоростью откачки 11 л/мин и турбомолекулярного насоса со скоростью откачки 500 л/мин.

Коммутирующие элементы вакуумной системы имеют электромагнитное управление, а затвор – электромеханический привод. В качестве высоковакуумного датчика в камере используется цифровой вакуумметр на основе вакуумной лампы ПМИ-51; форвакум в камере, в турбомолекулярном насосе и в вакуумной магистрали измеряется тремя цифровыми вакуумметрами на основе вакуумной лампы ПМТ-2.

Система напуска газа состоит из автоматических натекателей со встроенными электронными блоками управления. Напуск газов осуществляется в требуемых пропорциях при заранее заданном давлении. Максимальное время выхода на режим составляет 10 с. В качестве рабочих газов могут использоваться азот, аргон либо другие газы в зависимости от требуемой обработки. Газы могут подаваться в камеру по одному или в заданной пропорции.

Источник отрицательного электрического смещения на обрабатываемые изделия представляет собой управляемый источник постоянного напряжения, коммутируемый к нагрузке через высокочастотный управляемый ключ. Источник отрицательного электрического смещения позволяет изменять напряжение смещения (0–1000 В), частоту следования импульсов (2–40 кГц) и ко-

эффективность заполнения импульсов (10–90 %), обеспечивая средний ток до 10 А. Источники питания разрядов являются инверторными с функцией стабилизации тока и автоматизированным управлением по цифровому интерфейсу.

Система автоматического управления установки «ТРИО» предусматривает алгоритмы автоматической откачки (с возможностью ручного управления). Предусмотрены защиты по давлению, охлаждению, а также по последовательности коммутации исполнительных устройств, при этом есть два уровня защиты: программный и аппаратный.

Управление технологическими процессами может осуществляться как в ручном, так и в автоматическом режиме с возможностью установки параметров каждого технологического источника отдельно. Изменение во времени всех основных параметров фиксируется и выводится в главном окне программного интерфейса, а также протоколируется.

Установка «ТРИО» используется для обработки малых партий промышленных деталей и изделий, в частности инструмента.

1.1.3. Описание установки для комплексной ионно-плазменной обработки поверхности деталей и изделий «КВАДРО»

В состав установки «КВАДРО» входят газоразрядный источник ПИНК, обеспечивающий ток несамостоятельной дуги до 250 А без катодного пятна, газоразрядный источник ПИХПК (плазменный источник с холодным полым катодом) [1], обеспечивающий ток дуги с катодным пятном до 250 А. Оба источника предназначены для нагрева, очистки и активации поверхности изделия, а также плазменного ассистирования при напылении функциональных покрытий. При этом ПИНК предназначен для работы с инертными газами и азотом, а ПИХПК – для работы с активными газами – кислородом и углеводородами. Два дуговых испарителя с током до 200 А служат для распыления материала катода и нанесения функциональных покрытий. Плазмогенераторы могут работать как в независимом режиме, так и совместно. Установка включает рабочую вакуумную камеру, вакуумную систему, систему газового питания, систему водяного охлаждения, систему электропитания и автоматическую систему управления.

Общий вид установки приведен на рис. 3.

Главным исполнительным устройством схемы автоматического управления является промышленный контроллер ADAM-5000. Управление компонентами системы осуществляется как дискретными, так и аналоговыми сигналами.

На рис. 4 показано меню управления вакуумом и технологическим процессом.

Вакуумная камера выполнена в виде вертикального цилиндрического сосуда с боковым проемом, закрываемым дверцей. На верхней и боковых стенках камеры, а также на дверце имеются

фланцы для установки источников плазмы. На нижней плоскости корпуса имеется фланец для установки механизма вращения. Отверстия в боковых стенках камеры могут закрываться сдвижными заслонками, предотвращающими нежелательное запыление внутренних полостей дуговых испарителей. Рабочая камера автоматически откачивается турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 500 л/с до давления 10^{-3} Па.



Рис. 3. Общий вид комплексной вакуумной ионно-плазменной установки «КВАДРО»

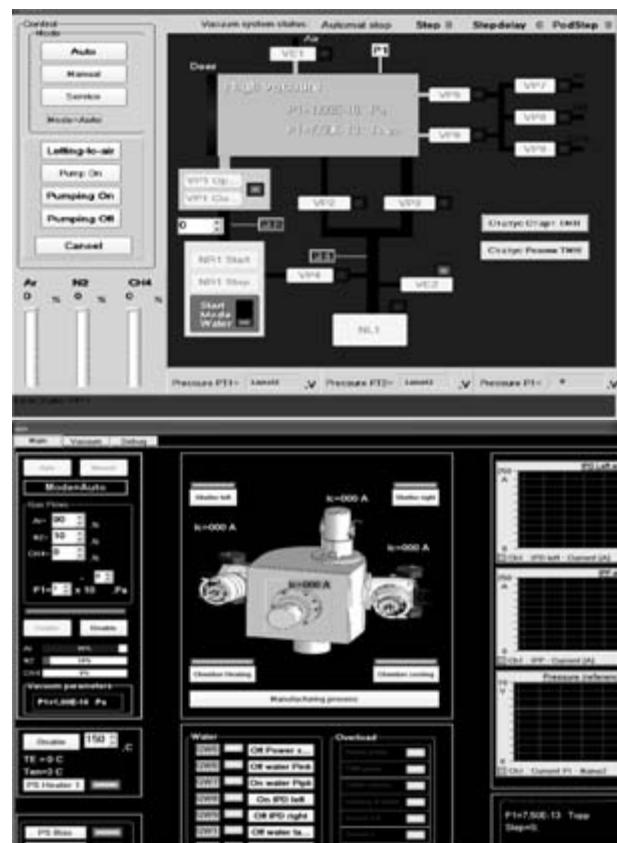


Рис. 4. Меню управления вакуумом и технологическим процессом

Плазмогенератор ПИНК расположен на верхнем фланце камеры, ПИХПК – на дверце камеры, дуговые испарители с системой фильтрации капель – на боковых фланцах. Стенки камеры, вал манипулятора и корпуса плазмогенераторов оборудованы водяными системами охлаждения, подача воды в которые контролируется автоматизированной системой управления. Система вакуумных клапанов работает от сжатого воздуха, а цикл откачки полностью автоматизирован. Отрицательное электрическое смещение на обрабатываемые детали и изделия прикладывается от блока смещения стола. Данный блок включает в себя инвертор электрического смещения ELB-10/900 и ключевой генератор паузы ELS-20/900 и позволяет регулировать амплитуду, частоту и коэффициент заполнения импульсов напряжения смещения на деталь. Кроме того, имеется возможность подачи постоянного смещения с функцией гашения микродуг. Источники питания разрядов являются инверторными с функцией стабилизации тока и автоматизированным управлением по цифровому интерфейсу. Газораспределение и стабилизация давления осуществляются автоматической системой, включающей распределительные клапаны и пьезоэлектрические регуляторы расхода газа. Газовое питание установки трехканальное, с возможностью установки процентного соотношения потоков газов. Контроль давления осуществляется широкодиапазонным активным вакуумметром WRG-S фирмы BOC EDWARDS.

Манипулятор установки «КВАДРО» аналогичен манипулятору установки «ДУЭТ».

Инфракрасный нагрев деталей осуществляется с помощью двух ТЭНов, установленных на днище вакуумной камеры вдоль задней стенки. Регулировка температуры ТЭНов осуществляется с помощью регулируемых твердотельных реле, а ее контроль – термопарой.

1.2. Типичные процессы и результаты применения комплексной ионно-плазменной обработки

На рис. 5 приведена типичная температурно-временная диаграмма процесса ионно-плазменной обработки, реализуемая на описанных установках. Буквами на рисунке обозначены характерные этапы технологического процесса. А – этап нагрева и очистки деталей; в этот момент включен генератор газовой плазмы и на образец подается отрицательное электрическое смещение, в качестве плазмообразующего газа используется инертный аргон, очистка и нагрев деталей производится ионами, извлеченными из объемной плазмы несамостоятельного дугового разряда, заполняющей рабочую камеру. Далее следует этап В – азотирование; в этот момент инертный газ аргон заменяется азотом, а ток разряда и напряжение смещения на детали подбираются таким образом, чтобы температура деталей держалась заданной. На этом этапе поддержание температуры и очистка поверхности изделий обеспечиваются ионами азота, бомбарди-

рующими обрабатываемую поверхность, при этом ионы и атомы азота диффундируют вглубь образца. Следующим этапом обработки является этап С – очистка поверхности от оксидов, карбидов и высших нитридов; на данном этапе азот заменяется аргоном, а ток разряда и напряжение смещения на деталь устанавливаются такими, чтобы обеспечить эффективную подготовку поверхности к напылению и изменить температуру детали для следующего этапа. Этап D – напыление наноструктурированного сверхтвердого покрытия. На этом этапе включаются генераторы металлической плазмы, генератор газовой плазмы не выключается и производит дополнительную ионизацию рабочего газа, осуществляя ионно-плазменное ассистирование процессу напыления покрытия; рабочий газ может выбираться как реактивным, так и активным, в зависимости от характера требуемого напыления. Токи разрядов плазмогенераторов, напряжение смещения на детали и давление могут задаваться различными в зависимости от требуемой температуры изделий и стехиометрического состава покрытия. После напыления следует этап Е – охлаждение изделий в вакууме; данный этап требуется для предотвращения окисления поверхности обработанных изделий и растрескивания покрытия вследствие быстрого охлаждения на воздухе.

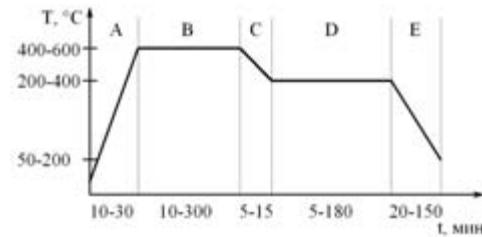


Рис. 5. Типовая температурно-временная диаграмма процесса обработки изделий

Температура и время процесса могут выбираться в зависимости от материала, из которого изготовлено изделие, требований к поверхности изделий и их массы.

В результате описываемой ионно-плазменной обработки достигается микротвердость поверхности до 20–45 ГПа (рис. 6) при глубине обработки 50–500 мкм. Износостойкость поверхности увеличивается в 2–3 раза.

2. МЕТОД ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

2.1. Автоматизированная установка для поверхностной обработки металлических и металлокерамических материалов импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности

Данная установка продолжает серию оборудования поверхностной обработки изделий с помощью электронного пучка [2], [3], [6]. Установка

предназначена для обработки поверхности металлических и металлокерамических изделий интенсивным импульсным низкоэнергетическим пучком субмиллисекундной длительности. При создании данной установки были улучшены параметры электронного источника, разработан сканирующий двухкоординатный манипулятор для увеличения площади, обрабатываемой электронным пучком, и реализована работа всех узлов и устройств установки под управлением персонального компьютера с возможностью программного задания и контроля параметров электронного пучка и проведения с его помощью обработки по заранее составленной программе.

Ионно-плазменной обработке по такой технологии подвергаются режущий инструмент, элементы конструкций машин и механизмов (рис. 7).

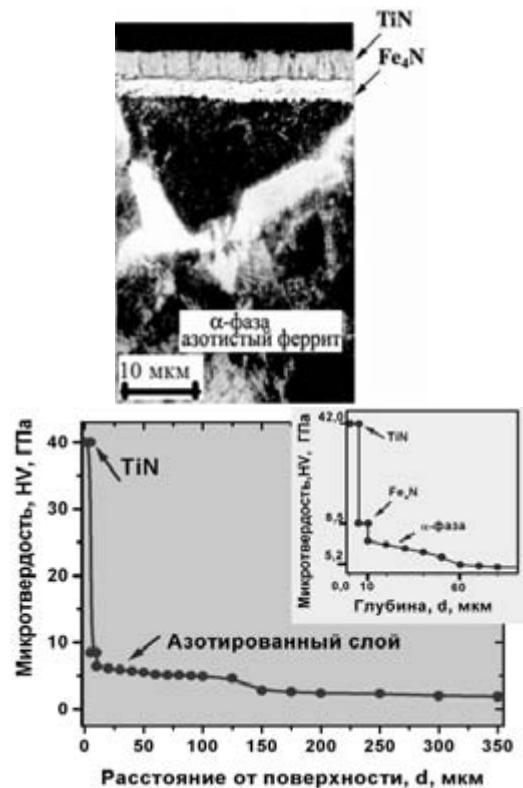


Рис. 6. Фотография микрошлифа стали-4140 и распределение твердости по глубине образца



Рис. 7. Фотографии изделий, обработанных по комбинированной технологии (верхний ряд) и азотированных (нижний ряд)

В состав представляемой установки входят: импульсный электронный источник на основе плазменного катода с сеточной стабилизацией плазменной границы, вакуумная камера прямоугольной формы со смотровым окном и двухкоординатным столом-манипулятором, блоки питания электронного источника, система управления установкой на основе персонального компьютера и работающих под его управлением блоков на основе микроконтроллеров, система газового питания, система диагностики параметров электронного источника и электронного пучка.

Общий вид установки приведен на рис. 8.



Рис. 8. Общий вид установки для импульсной поверхностной модификации электронным пучком и окон управленияющей программы

Конструктивно установка состоит из трех модулей:

1. Стойка управления и контроля, включающая в себя управляемый компьютер (ПК), контроллеры вакуумной системы, системы газового питания и контроллеры манипулятора. Работа с управляющей программой ПК возможна как с помощью клавиатуры и манипулятора мышь, так и с использованием сенсорного экрана при нажатии на соответствующие элементы установки, отображаемые на экране монитора.

2. Блок, включающий в себя вакуумную камеру с системой вакуумной откачки и манипулятором, электронный источник, вертикально установленный на верхней стенке камеры, и накопительные емкости высоковольтного источника ускоряющего напряжения.

3. Стойка с блоками питания (БП) импульсного электронного источника. Управление БП возможно как в автономном режиме (с панели контроллера БП), так и под управлением ПК.

Вакуумная камера откачивается посредством пластинчато-роторного насоса со скоростью откачки 5 л/с и турбомолекулярного насоса со скоростью откачки 500 л/с. Использование турбомолекулярного насоса позволяет стабилизировать скорость откачки системы и значительно снизить поступление паров масла в рабочий объем камеры, что необходимо для устойчивой работы электронного источника. Для контроля за вакуумом в уста-

новке используются цифровые вакуумметры на основе термопарных вакуумных преобразователей ПМТ-2 (вакуумметр АТВ-2.1) и ионизационных ПМИ-51 (АИВ-51.1), включенные в состав системы управления. Для обеспечения напуска рабочего газа (Ar) и регулировки его давления используется газовый натекатель типа РРГ-10. В камере установлен манипулятор, обеспечивающий перемещение обрабатываемых деталей с общим весом до 25 кг по двум координатам. Перемещение стола манипулятора, имеющего отверстия для закрепления обрабатываемых деталей, производится с помощью двух шаговых двигателей, вынесенных за пределы вакуумной камеры.

Работая на частоте 10–20 Гц, электронный источник, имея в этом режиме среднюю мощность до 5–8 кВт, способен кроме импульсной обработки поверхности проводить предварительный объемный нагрев деталей, что позволяет повысить качество поверхностной обработки для ряда обрабатываемых материалов. Обработка в этом случае проводится в два этапа. На первом этапе производится нагрев детали импульсами тока малой амплитуды с высокой частотой повторения. На втором этапе используется большой ток пучка, достаточный для модификации поверхности за один или несколько импульсов. Для предотвращения перегрева стола манипулятора предусмотрено его водяное охлаждение.

На рис. 9 представлена блок-схема установки.

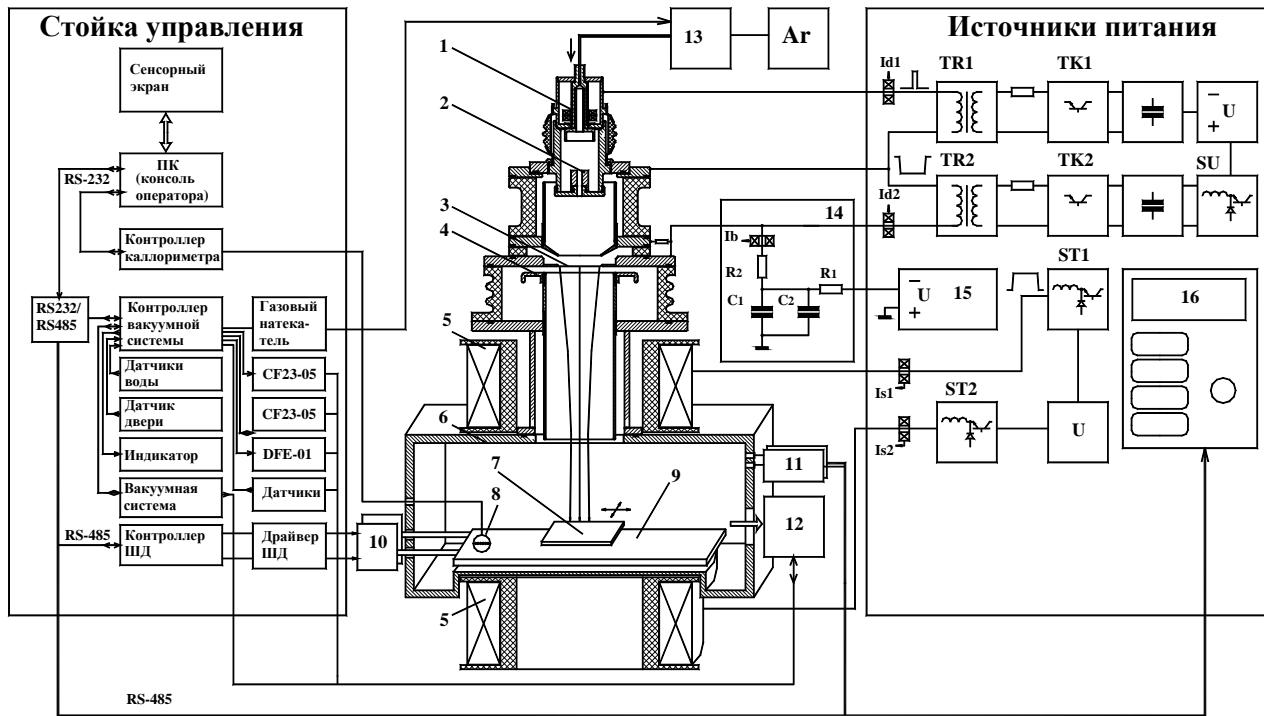


Рис. 9. Блок-схема установки

Генерация импульсного электронного пучка производится в плазмонаполненном диоде с транспортирующим магнитным полем на основе вакуумной дуги низкого давления, зажигаемой между электродами 2, 3 с помощью инициирующего разряда, предварительно созданного между электродами 1, 2. Питание разрядов осуществляется от вторичных обмоток высоковольтных разделительных трансформаторов TR1, TR2. Регулировка длительности основного разряда и, соответственно, длительности импульса электронного пучка производится с помощью транзисторных ключей TK1, TK2. Источники питания ST1, ST2, выполненные как управляемые стабилизаторы тока, служат для формирования импульсного магнитного поля. Электроны, извлекаемые через ячейки сетки электрода 3, проходя в трубе дрейфа 4 в транспортирующем магнитном поле (0.03–0.05 Тл), создаваемом соленоидами 5, попадают в вакуумную камеру 6 и на обрабатываемые детали 7. Детали крепятся на столе манипулятора 9 и могут перемещаться при помощи двух шаговых двигателей 10. Питание ускоряющего промежутка электронного источника осуществляется от высоковольтных накопительных емкостей (блок конденсаторов 14), заряжаемых от источника постоянного напряжения 15. Работа всех источников питания электронной пушки производится под управлением контроллера 16, позволяющего работать с электронным источником как автономно (работа в этом случае проводится с использованием клавиатуры и LCD-индикатора контроллера), так и в составе системы управления на базе управляемого компьютера (РС). Откачка рабочей камеры производится вакуумной системой 12. Контроль за давлением в элементах вакуумной системы осуществляется с помощью цифровых вакуумметров 11. Напуск рабочего газа (Ar) и регулировка давления в рабочей камере в рабочем режиме производятся с помощью газового натекателя 13.

В состав установки входят также аппаратно-программные средства контроля за работой электронного источника и средства диагностики электронного пучка. Измерение импульсных токов в цепях электронного источника производится с помощью поясов Роговского Id1, Id2, сигналы с которых могут регистрироваться как с помощью дополнительного внешнего осциллографа, так и с помощью встроенных средств измерений (осциллографической USB-приставки к ПК) с отображением осциллограмм на экране монитора системы управления. В этом случае осциллограммы токов в цепях электронного источника отображаются в специальном окне программы виртуального осциллографа. Датчики Is1, Is2 (на основе эффекта Холла) позволяют при необходимости контролировать токи в катушках соленоидов. Параметры электронного пучка в области воздействия им на обрабатываемые изделия могут быть измерены калориметрическим методом. Для проведе-

ния подобных измерений в составе установки используется многоканальный калориметр, с помощью которого можно измерять плотность энергии электронного пучка, полную энергию электронного пучка за один импульс и оценивать распределение энергии по сечению пучка. Датчик калориметра 8, представляющий собой набор цилиндров Фарадея с закрепленными на них термисторами, подключается к контроллеру калориметра, работающему под управлением специальной программы на управляющем компьютере. Измерение энергии пучка производится путем сравнения температуры цилиндров Фарадея с помощью термисторов до и после воздействия на них импульса тока электронного пучка.

Система управления на основе управляющего компьютера обеспечивает автоматическую откачуку вакуумной системы и предотвращает возникновение аварийных ситуаций, в том числе блокирует ошибочные действия оператора. Текущее состояние установки отображается на трехцветном световом индикаторе, расположенному над ней. При использовании источников бесперебойного питания выполняется безопасное отключение установки, в том числе производится автоматическое закрытие вакуумного затвора с механическим приводом, питание двигателя которого осуществляется от частотного преобразователя DFE-01. Также производится безаварийное отключение турбомолекулярного насоса, запитанного от частотных преобразователей CF23-05. В рабочем режиме программное обеспечение РС обеспечивает установление заданного рабочего давления, задание режимов работы электронного источника и управление движением стола манипулятора по заданной программе. Важной особенностью программы управления манипулятором является то, что кроме ручного управления движением стола манипулятора реализован и программный режим. В этом случае будет выполняться набор команд, задаваемых в специальном окне редактора. Программа управления может содержать не только команды управления манипулятором, но и команды управления электронным источником. Программа обработки конкретного изделия может быть сохранена в отдельном файле на РС и впоследствии многократно использоваться для обработки подобных изделий в автоматическом режиме.

Таким образом, созданная автоматизированная установка для модификации поверхности металлических и металлокерамических материалов и изделий с помощью интенсивного импульсного субмиллисекундного электронного пучка обеспечивает современный уровень сервиса и безопасную работу. Автоматизация процесса обработки позволяет улучшить степень воспроизводимости результатов импульсной электронно-лучевой обработки поверхности материалов и изделий, а наличие средств диагностики электронного пучка и оперативное управление его параметрами позволяют проводить выбор и оптимизацию режи-

мов электронно-пучковой обработки для широкого круга материалов и изделий.

2.2. Применение низкоэнергетичных импульсных электронных пучков

Электронный пучок, попадая на обрабатываемую поверхность, производит сверхбыстрый нагрев (в течение импульса) до температуры плавления материала подложки. Затем происходит быстрое охлаждение за счет отвода тепла в более глубокие холодные слои подложки. В результате

сверхбыстрой закалки в приповерхностном слое толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков микрон формируется улучшенная структура обрабатываемого материала. Очищается поверхность, отжигаются легкоплавкие примеси, в сталях формируется закалочная структура, повышается твердость поверхности. Кроме того, в жидкой фазе в вакууме за счет сил поверхностного натяжения происходит выглаживание рельефа поверхности (полировка). Примеры использования электронного пучка приведены на рис. 10 и 11.

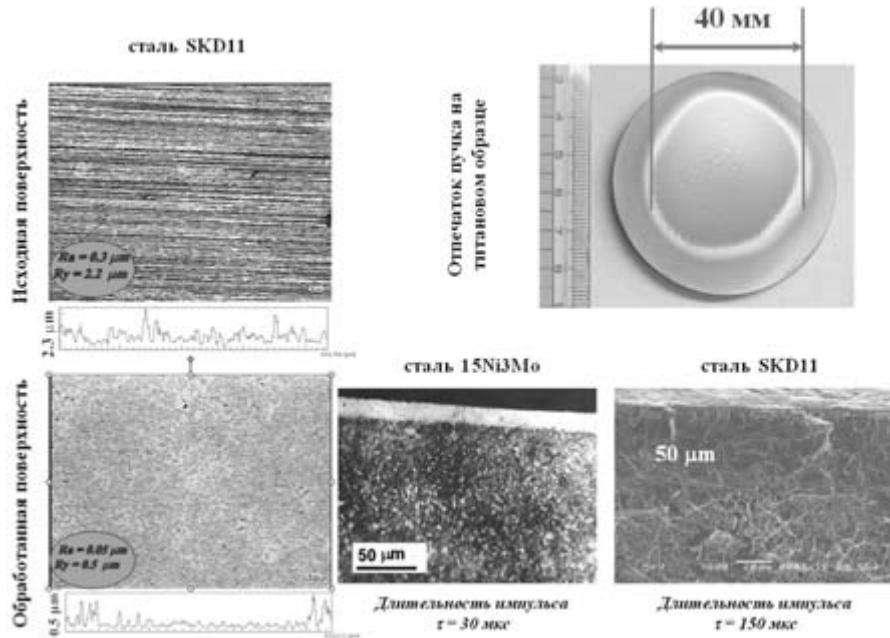


Рис. 10. Поверхность стали SKD11 до и после электронно-пучковой обработки, автограф электронного пучка $\varnothing 40$ мм на титане, поперечные шлифы стали 15 Ni3Mo и SKD11 после обработки электронным пучком

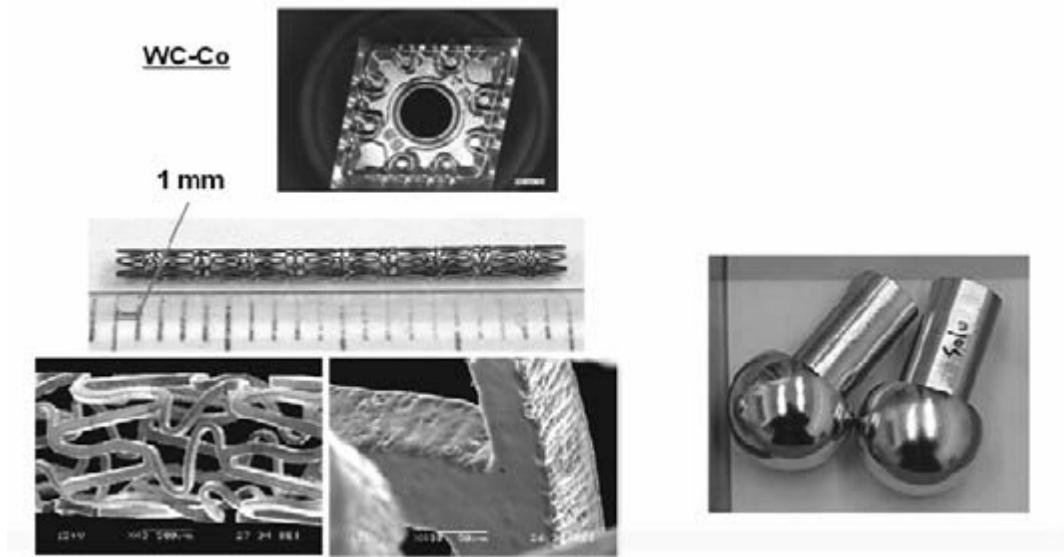


Рис. 11. Примеры использования электронно-пучковой обработки поверхности штампов из WC-Co сплава, стентов и искусственных суставов

Установка может применяться для электронно-пучковой полировки поверхности металлических и металлокерамических изделий, импульсной закалки поверхности из расплавленного состояния, кондиционирования поверхности путем удаления легкоплавких компонентов и других

процессов, требующих концентрированных потоков энергии в виде импульсного электронного пучка. При оптимизации режимов импульсной электронно-пучковой обработки реализуются процессы наноструктуризации поверхностного слоя материалов и изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винтизенко Л. Г., Григорьев С. В., Коваль Н. Н. и др. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц // Известия вузов. Физика. 2001. № 9. С. 28–35.
2. Коваль Н. Н., Сочугов Н. С., Девятков В. Н., Григорьев С. В., Арсланов И. Р., Миков А. В., Подковыров В. Г., Уемура К. Автоматизированный энергокомплекс для импульсной поверхностной обработки материалов электронным пучком // Известия вузов. Физика. 2006. № 8, приложение. С. 51–54.
3. Коваль Н. Н., Щанин П. М., Девятков В. Н., Толкачев В. С., Винтизенко Л. Г. Установка для обработки поверхности металлов электронным пучком // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 1. С. 135–140.
4. Denisov V. V., Koval N. N., Lobach M. I., Mikov A. V., Shugurov V. V., Yakkovlev V. V. Automated Vacuum Ion-Plasma Setup «TRIO» for Making Nanostructure Coatings // Proc. 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Tomsk, Russia, September 21–26, 2008. P. 31–34.
5. Koval N. N., Schanin P. M., Devyatkov V. N., Tolkachev V. S., Vintzenko L. G. Modification of the structure and phase composition of structural steel by a microsecond e-beam // Proc. 7th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. 2004. P. 43–46.
6. Lopatin I. V., Akhmadeev Yu. Kh., Denisov V. V., Koval N. N., Mikov A. V., Yakkovlev V. V., Seredinin A. Vacuum ion-plasma setup «QUADRO» for complex treating of materials and tools // Известия вузов. Физика. 2007. № 9, приложение. С. 98–101.
7. Schanin P. M., Koval N. N., Lopatin I. V., Goncharenko I. M., Grigoriev S. V., Tolkachev V. S., Vintzenko L. G., Kiselev V. N., Uemura K. Vacuum ion-plasma installation «DUET» // Proc. 6th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, September 23–28, 2002, Tomsk, Russia. P. 112–116.