

РАЗДЕЛ ЧЕТВЁРТЫЙ

ФИЗИКА РАДИАЦИОННЫХ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.793

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ВАКУУМНО-ДУГОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

И.И. Аксёнов, В.А. Белоус

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина*

Описана установка, в которой применен ряд технических решений, нетрадиционных для вакуумно-дуговых машин аналогичного назначения – камера колпачного типа, позволяющая применить промывку ее внутренних поверхностей сухим горячим азотом или аргоном при загрузке и выгрузке изделий со стороны днища; система автоматической выгрузки-загрузки изделий; экранировка внутренних стенок камеры прогреваемыми до высоких температур панелями; усовершенствованные вакуумно-дуговые источники плазмы, в том числе источник с плазменным фильтром; однотрансформаторный четырехканальный источник питания дуги в источниках плазмы; система колебательных LC контуров для подавления микродуг на поверхностях обрабатываемых изделий; автоматическое управление технологическим циклом, включая процессы откачки камеры, выгрузки и загрузки изделий, весь процесс ионно-плазменной обработки загруженных изделий. Перечисленный комплекс технических решений обусловил значительные преимущества установки перед другим технологическим оборудованием аналогичного назначения. Уникальность и новизна установки сохранились до настоящего времени, спустя два десятилетия после её создания.

1. ВВЕДЕНИЕ

Формирование покрытий методом конденсации ионно-плазменных потоков электродугового разряда в вакууме или в разреженной атмосфере реакционных газов ($10^{-3} \dots 10^2$ Па) в последние два-три десятилетия стало одним из наиболее перспективных направлений поверхностного модифицирования материалов в инструментальном производстве, в декорировании изделий бытового назначения и в некоторых отраслях машиностроения. Результаты исследований, полученные отечественными и зарубежными специалистами [1–5], свидетельствуют о том, что достоинства метода могли бы быть реализованы в значительно более широком круге практических применений, но этого пока что не произошло из-за отсутствия таких технических решений, которые были бы в состоянии обеспечить коммерческую целесообразность и конкурентоспособность новых вакуумно-дуговых технологических процессов и оборудования в сфере применений более обширной, нежели отмеченная выше. Так, из-за отсутствия достаточно эффективных фильтрующих устройств для очистки эрозионной плазмы от макрочастиц катодного материала вакуумно-дуговой метод, позволяющий синтезировать покрытия с уникальными комбинациями физико-механических и эксплуатационных свойств, до сих пор практически не используется в таких важнейших отраслях, как микроэлектроника, оптика (видимого и инфракрасного диапазонов), медицина (микрохирургический инструментарий, протезирование) и точная механика,

где этот метод мог бы способствовать существенно прогрессу. Отсутствие эффективных средств снижения тепловой нагрузки на обрабатываемый объект в процессе осаждения покрытий существенно ограничивает применение вакуумно-дугового метода для поверхностного упрочнения деталей машин (узлов трения), не позволяя обрабатывать этим методом в массовых масштабах ту подавляющую часть деталей, которая изготавливается из сталей и сплавов с низким температурным порогом деградации их характеристик.

Оборудование для нанесения покрытий вакуумно-дуговым методом на изделия, изготавливаемые в условиях массового производства, должно обеспечивать высокую производительность технологического процесса и точность контроля его параметров, а следовательно, – и высокую степень воспроизводимости характеристик получаемых покрытий. С этой целью современные вакуумно-дуговые установки оснащаются высокопроизводительным откачным оборудованием, надёжными источниками плазмы, обеспечивающими необходимую скорость осаждения покрытий, и системой компьютерного управления. И всё же производительность вакуумно-дугового процесса осаждения покрытий даже с применением современного, достаточно совершенного оборудования далеко не всегда отвечает нуждам производства с точки зрения производительности.

Это обусловлено тем, что все отмеченные выше достоинства современных установок в состоянии влиять на длительность только двух стадий рабочего

цикла осаждения: во-первых, на длительность откачки рабочей камеры и, во-вторых, на длительность собственно процесса ионно-плазменной обработки, включая конденсацию покрытия. Но кроме этих двух стадий длительность всего технологического цикла, осуществляемого на установке, обуславливается ещё и такими этапами, как (1) загрузка камеры изделиями, подлежащими обработке; (2) герметизация камеры; (3) охлаждение изделий после обработки; (4) разгерметизация камеры и (5) её разгрузка. Если длительность откачки и ионно-

плазменной обработки (включая осаждение) в современных установках составляет 20...60 мин, то суммарная продолжительность всех остальных этапов (1-5) существенно превышает эту величину. Кроме того, продолжительность откачки в существующих конструкциях соответствует рекламируемым значениям только в начале эксплуатации установки. Со временем продолжительность этого этапа значительно увеличивается в связи с накоплением на стенках камеры атмосферной влаги на стадиях 1 и 5, когда камера полностью открыта.

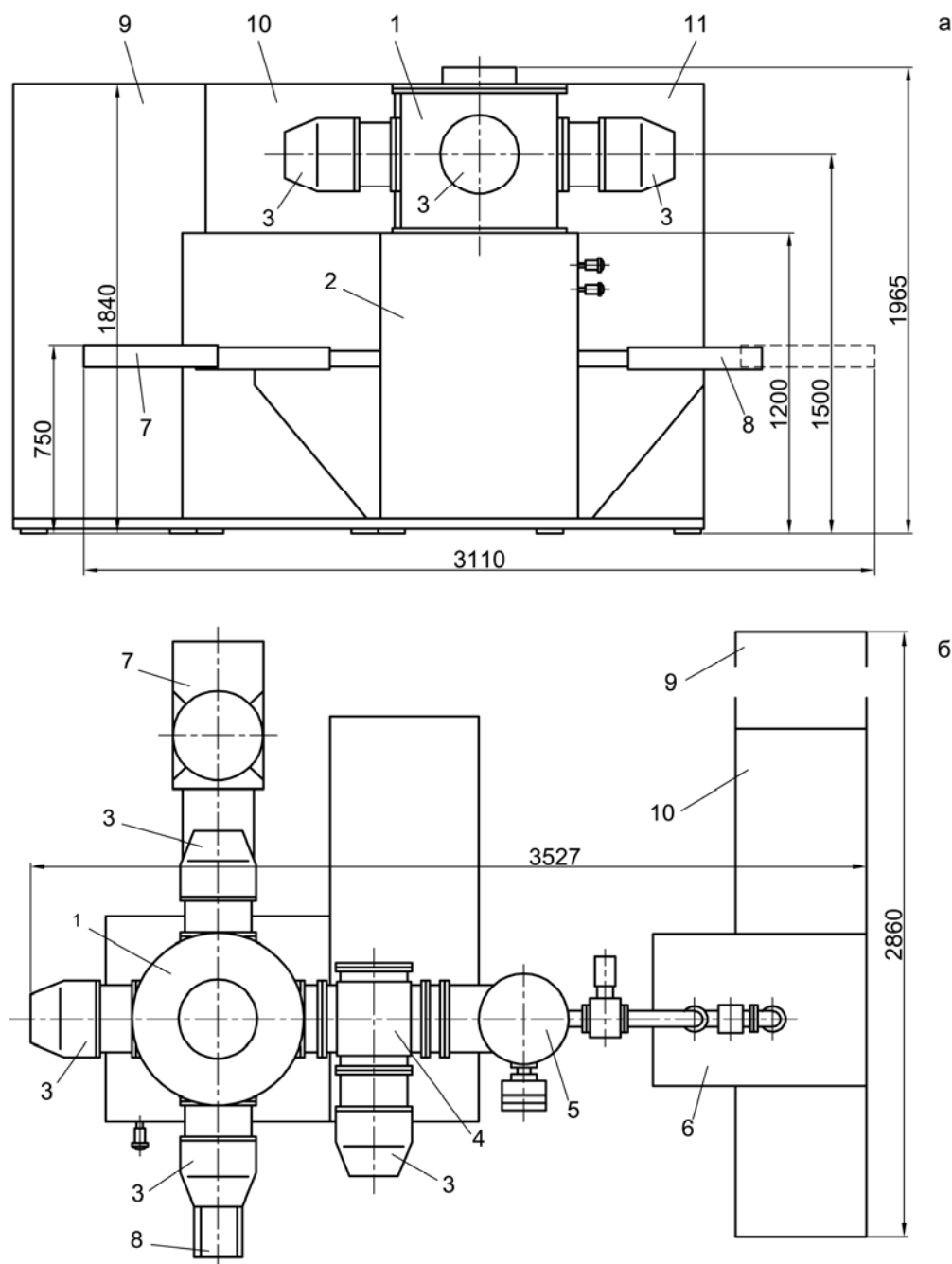


Рис. 1. Установка «Булат-9» вид спереди (а), вид сверху (б): камера (1), подставка (2), источник плазмы (3), плазменный фильтр (4), диффузионный насос (5), форвакуумный насос (6), стол загрузки (7), стол выгрузки (8), стойка управления (9), источник питания вакуумных дуг (10), источник отрицательного напряжения смещения на подложке (11)

Впервые систематические исследования и разработки вакуумно-дугового метода и оборудования с целью их адаптации к условиям промышленного производства были начаты в ХФТИ несколько десятилетий назад и продолжают до настоящего времени. Наиболее концентрированно результаты таких разработок применены в установке «Булат-9». После выпуска экспериментальной партии этих установок минуло уже без малого два десятилетия, и хотя установка по основным показателям и по сей день остаётся непревзойдённой, информация о ней в печатных изданиях отсутствует, если не считать короткое сообщение в работе [9]. В настоящей статье приведены основные сведения о конструкции и технологических возможностях установки «Булат-9», кратко рассмотрен проект её модификации.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Общий вид установки «Булат-9», фотография и схема ее вакуумно-плазменного агрегата приведены на рис. 1, 2 и 3 соответственно. Установка состоит из следующих основных частей: вакуумная камера с подставкой и системами водяного охлаждения/нагрева, подачи рабочего газа; система вакуумной откачки; четыре вакуумно-дуговых источника плазмы, один из которых включает в себя плазменный фильтр; четырехканальный источник питания вакуумно-дуговых разрядов; источник отрицательного напряжения смещения, подаваемого на обрабатываемые изделия; система автоматической выгрузки-загрузки обрабатываемых изделий; система программного управления.

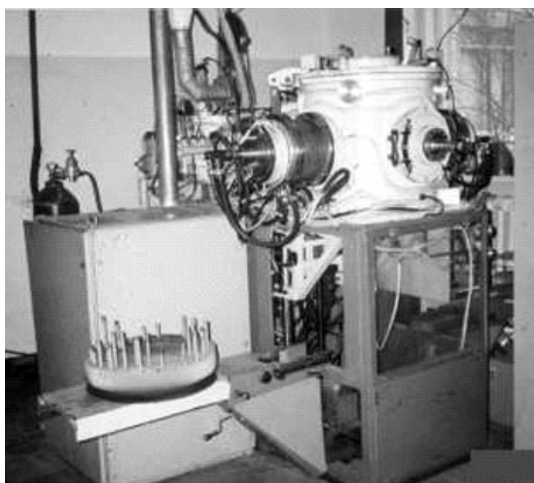


Рис. 2. Фотография установки «Булат-9»

Применение системы автоматической выгрузки-загрузки изделий, использование рабочей камеры колпачного типа, обеспечивающей возможность разгерметизации путем напуска горячего инертного газа (Ar , N_2), использование плазменного фильтра в качестве сорбционной ловушки на этапе откачки и, наконец, автоматизация управления всем технологическим циклом позволяют сократить время вспомогательных операций до 10...12 мин при общей длительности процесса около 60 мин (например, при

осаждении износостойкого покрытия на садку режущих инструментов средних размеров). Наличие плазменного источника с фильтром и системы перевода дугового разряда в режим с положительным анодным падением напряжения [5] определяют возможность синтеза покрытий из нитридов переходных металлов на материалах с температурой допустимого нагрева 250...280 °С при скорости конденсации до 20 мкм/ч на площади до 0,6 м². Ниже приведено более детальное описание систем установки и ее технологических возможностей.

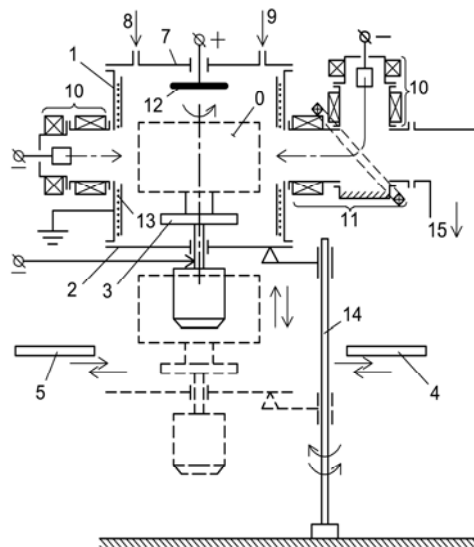


Рис. 3. Схема вакуумно-плазменного агрегата установки «Булат-9»: вакуумная камера (1); днище (2); платформа (3); столы загрузки и выгрузки (4, 5); обрабатываемые изделия (6); крышка (7); подача рабочих газов (8, 9); катушки плазменного источника (10); плазменный фильтр (11); анод тлеющего разряда (12); нагреватель (13); подъёмник (14); система откачки (15)

3. ВАКУУМНАЯ КАМЕРА, ОТКАЧКА, ГАЗОПИТАНИЕ

Водоохлаждаемая вакуумная камера цилиндрической формы с вертикальной осью (высотой 650 мм и диаметром 600 мм) имеет четыре горловины, горизонтальные оси которых находятся в одной плоскости и ориентированы друг относительно друга под углом 90°. К трем горловинам на петлях крепятся вакуумно-дуговые источники плазмы. К четвертой горловине пристыкован источник плазмы с фильтром, через плазмовод которого подключена система откачки. Плазменный источник с отключенными катушками может работать также в режиме сорбционного насоса. На внутренней поверхности камеры с зазором 5 мм закреплены прогреваемые панели, полностью экранирующие водоохлаждаемую поверхность от воздействия плазмы. Эти панели могут прогреваться в двух диапазонах температур: длительное время при температуре 200...250 °С и кратковременно (~ 10 с) – при температуре 550...650 °С. Первый режим прогрева предназначен для обезгаживания вакуумной камеры в

период откачки; второй режим – для очистки панелей от толстых плёнок, образующихся в процессе длительной эксплуатации установки.

Внутри камеры установлены подвижные шторы для прерывания плазменного потока, обеспечивающие отсутствие воздействия плазмы на обрабатываемые изделия в процессе обезгаживания внутренних поверхностей источников плазмы. Применение таких штор позволяет проводить процессы ионной бомбардировки изделий и конденсации покрытий в условиях высокой степени очистки остаточной атмосферы в камере от активных газов и паров (кислорода, воды, углеводородов и т.п.).

На верхней водоохлаждаемой крышке установлены дополнительный анод, используемый в режиме двухступенчатого дугового разряда низкого давления в процессе ионного азотирования [3], и смотровое окно для датчика пирометра, оснащённое шаровым вводом. Крышка открывается только в случае проведения различного рода регламентных работ.

На днище камеры закреплено вращающее устройство со специальным столом-ловителем для кассет с обрабатываемыми изделиями. Днище имеет возможность вертикального перемещения на (550 ± 50) мм посредством комбинированной клиноремной и винтовой передачи. В нижнем положении днища осуществляется погрузка на него кассеты с изделиями.

Выбор откачных средств определялся следующими требованиями: предельный вакуум $2 \cdot 10^{-5}$ Торр; максимально допустимое натекание $5 \cdot 10^{-4}$ (л·Торр)/с; общий объем откачиваемой системы $0,3 \text{ м}^3$; рабочий диапазон давлений реакционного газа ($2 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-1}$) Торр; максимальное время достижения предельного вакуума 10 мин. Кроме указанных требований к откачивающей системе необходимо было до предела уменьшить практически неконтролируемое газовыделение со стенок камеры и элементов источника плазмы. С этой целью использовались, как указано выше, прогреваемые панели, шторы, а также напуск горячего ($50 \dots 90$ °С) сухого азота или аргона при разгерметизации камеры. С учётом вышеизложенного была выбрана следующая схема откачки. Непосредственно пристыкованный к вакуумной камере источник плазмы с фильтром на стадии откачки камеры работает в режиме сорбционного насоса, одновременно выполняя функции масляной ловушки. Последовательно с плазменным фильтром через угловой высоковакуумный клапан подключен паромасляный насос Н250/2500, в диапазоне давлений $5 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-4}$ Торр обладающий скоростью откачки ≥ 2400 л/с. Предварительная откачка диффузионного насоса и камеры (через байпасную линию) осуществляется форвакуумным насосом АВЗ-20Д. Описанная система откачки при наличии автоматизированной системы выгрузки-загрузки (длительность цикла выгрузки-загрузки составляет 1 мин 25 с) позволила снизить время достижения предельного вакуума до $6 \dots 7$ мин.

Используемая схема откачки позволяет работать в широком диапазоне давлений реакционного газа. В диапазоне $2 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-4}$ Торр (обычно – в режиме

проведения ионной очистки изделий) работают все три насоса; в диапазоне $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ Торр работают форвакуумный и диффузионный насосы; при $1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$ Торр функционируют сорбционный и форвакуумный насосы.

Подача рабочих газов в камеру осуществляется двумя автономными системами газопитания, каждая из которых включает в себя тридцатилитровый баллон высокого давления с редуктором, трубопровод и электромеханический натекатель с блоком управления. Уровень давления азота в камере поддерживается с помощью блока управления, соединенного с вакуумметром ВИТ-3. В качестве датчика давления целесообразно использовать ионизационный манометр ПМИ-10-2, который предназначен для работы в диапазоне давлений $10^{-5} \dots 10^{-1}$ Торр, характерном для всех технологических режимов, реализуемых на установке.

В качестве второго реакционного газа используется углеродсодержащий газ (например, ацетилен). Необходимое количество этого газа поддерживается с помощью блока управления натекателя, вход которого (компаратор) через делитель (1:100) подключен к промежутку анод-катод источника плазмы. Данный режим работы системы напуска и контроля давления газа применяется при осуществлении вакуумно-дугового разряда с положительным анодным падением. Этот тип разряда необходим для проведения процесса нанесения нитридных покрытий при пониженных тепловых потоках на подложку [4]. При необходимости, эта система газопитания может быть использована для подачи в камеру инертного газа (аргона).

4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВЫГРУЗКИ-ЗАГРУЗКИ ИЗДЕЛИЙ

Система выгрузки-загрузки изделий из/в камеры(у) 1 (рис. 4) состоит из подвижного днища 2, вращающейся платформы 3 для фиксации кассеты 6 с обрабатываемыми изделиями, левого подвижного стола (загрузки) 5, правого стола (выгрузки) 4, электроприводов и релейного блока программного управления механизмами (на рисунке не показан).

Днище имеет форму диска диаметром 650 мм и толщиной 20 мм с центральным отверстием диаметром 100 мм. Через это отверстие проходит электрически изолированный от камеры вал с электрическим приводом. Скорость вращения вала составляет 9 об./мин. На валу закреплена платформа 3 с устройством для захвата кассеты с изделиями. Максимально допустимая нагрузка на вал составляет 90 кг. Подъемный механизм днища представляет собой тележку, движущуюся по двум вертикальным направляющим с помощью винтового механизма, который приводится в действие электродвигателем мощностью 0,5 кВт. Днище закреплено на горизонтальной части тележки с помощью регулировочных подпружиненных винтов, которые позволяют установить горизонтально плоскость днища, обеспечив таким образом равномерное его прилегание к торцу камеры.

Столы выгрузки и загрузки идентичны по конструкции и представляют собой телескопические механизмы горизонтального перемещения. Длина го-

ризонтового хода стола с кассетодержателем составляет (1200 ± 100) мм.

Процесс выгрузки-загрузки изделий осуществляется в следующей последовательности (см. рис. 4). Первый шаг из исходной позиции (а) – движение крышки с кассетой вниз на 420 мм до промежуточного фиксированного положения (б). Затем правый стол (выгрузки) перемещается из правого положения в крайнее левое (в) таким образом, что кассетодержатель стола находится точно под кассетой. Точность установки крайних положений составляет 3 мм и определяется специальными регулировочными винтами.

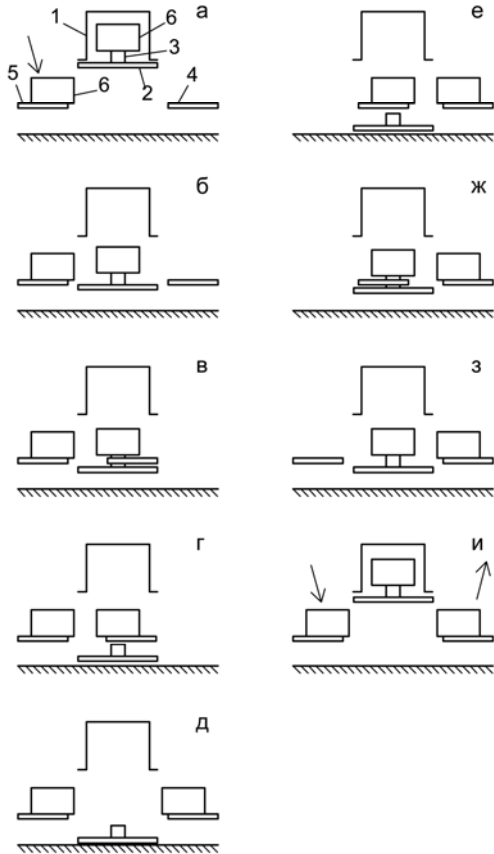


Рис. 4. Последовательность этапов выгрузки (а – д) и загрузки (е – и)

Следующий шаг – движение крышки вниз на 60 мм до нижнего положения (г), причём кассета сходит с механизма захвата и остается на кассетодержателе, после чего правый стол возвращается вместе с кассетой в крайнее правое положение (д). После этого левый стол (стол загрузки) с установленной на нем кассетой из исходного положения движется в крайнее правое положение под днище (е).

По окончании этого движения днище камеры перемещается из крайнего нижнего положения в промежуточное (ж), снимая кассету с помощью механизма захвата с кассетодержателя. Разгруженный левый стол возвращается в крайнее левое положение (з). По окончании этого движения крышка с укрепленной на ней кассетой движется вверх до крайнего (исходного) положения (и). Длительность всего процесса выгрузки-загрузки составляет 1 мин 25 с,

причём каждый последующий шаг процесса заблокирован предыдущим.

Длительная эксплуатация установки показала высокую надёжность и безотказность системы выгрузки-загрузки. Для проведения наладки механизмов системы в блоке управления предусмотрено пошаговое проведение процесса.

5. ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ЭРОЗИОННЫЙ ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ

Одним из основных узлов установки, определяющих ее производительность и технологические возможности, является источник эрозионной плазмы, которая генерируется вакуумной дугой. В установке «Булат-9» применён источник с магнитной фокусировкой плазменного потока. Этот тип источника характеризуется высоким коэффициентом использования плазмообразующего материала (катодного), обеспечивает широкий диапазон скоростей конденсации, отличается высокой надёжностью. Однако опыт эксплуатации таких источников на установках «Булат-4» и «Булат-6» указал на следующие недостатки: узкое радиальное распределение плотности потока плазмы, ограничивающее высоту и соответственно площадь обрабатываемых изделий; достаточно сложную операцию смены катода и жёсткие требования к его геометрии (использовать можно катоды только одного диаметра); недостаточно надёжную работу системы поджига. В этом отношении существенными преимуществами обладает новый источник, разработанный в процессе создания установки «Булат-9». Схематический чертёж такого источника показан на рис. 5.

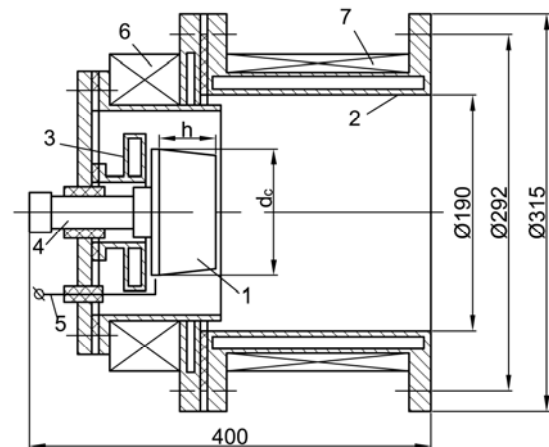


Рис. 5. Схема источника плазмы: катод (1), анод (2), экран (3), механизм крепления катода (4), ввод устройства поджига (5), стабилизирующая катушка (6), фокусирующая катушка (7)

Конструкция катододержателя 4 этого источника позволяет оперативно вручную, без применения инструментов производить смену катода и исключает возможность попадания воды из системы охлаждения катода в вакуумную камеру. Для предотвращения возможности возникновения катодного пятна на арматуре катодного узла используется водохла-

ждаемый экран 3 под плавающим потенциалом, охватывающий катододержатель и закрывающий нижний нерабочий торец катода. Система стабилизации катодного пятна выполнена в виде катушки 6 из 32 витков медной шины, через которую проходит ток дуги, что полностью исключает аварийные ситуации, связанные с отсутствием магнитных полей при горячей вакуумной дуге. Экран 3 перекрывает только тыльную поверхность катода и не ограничивает его радиальный размер. В сочетании с оригинальным креплением "свечи" поджига это обеспечивает возможность использования катодов любого диаметра в пределах 60...105 мм.

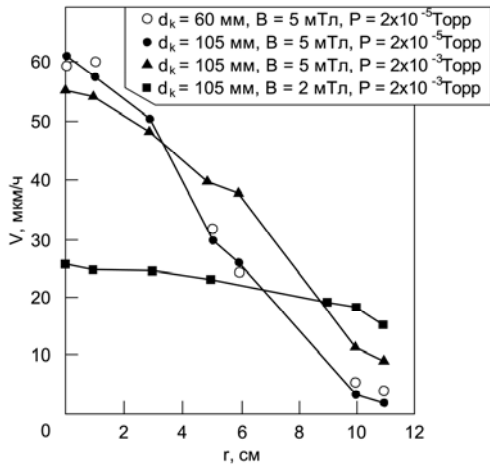


Рис. 6. Радиальное распределение скорости конденсации V на расстоянии 50 мм от торца анода

Однако приведенные зависимости свидетельствуют о значительной неоднородности распределения толщины покрытия по площади обрабатываемой поверхности. Для устранения этого явления обычно применяется ослабление фокусировки в анодной системе путем снижения напряженности фокусирующего магнитного поля и увеличения давления реактивного газа (см. рис. 6). Но оба эти приёма сопровождаются снижением коэффициента полезного использования плазмообразующего вещества. Поэтому в разрабатываемой системе управления плазменным потоком используется изменение структуры магнитных силовых линий (а соответственно – и электрических полей) внутри анода.

С этой целью на выходе анода установлены корректирующие седлообразные катушки (рис. 7), создающие поля напряженностью до 50 Э и обеспечивающие дополнительное сжатие плазменного потока по горизонтали, и размытие – по вертикали.

Исследования показали, что скорость роста конденсата и её распределение по радиусу системы в значительной мере определяются давлением реакционного газа и от диаметра катода не зависят (см. рис. 6). Это позволяет использовать катоды различного диаметра без внесения корректив в технологический процесс.

В результате диаграмма распределения плотности потока и, следовательно, скорости осаждения покрытия вытягивается в вертикальном направлении (рис. 8).

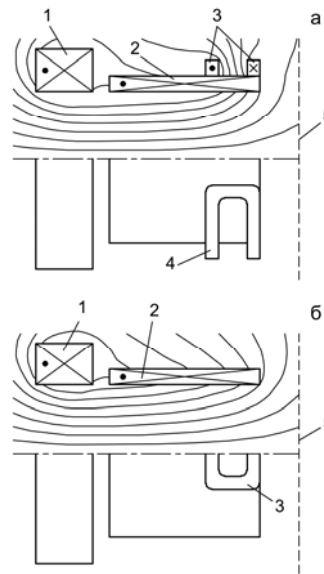


Рис. 7. Магнитные силовые линии в источнике плазмы с корректирующими катушками: вертикальное сечение (а), горизонтальное сечение (б): стабилизирующая катушка (1), фокусирующая катушка (2), корректирующие катушки (3, 4), подложка (5)

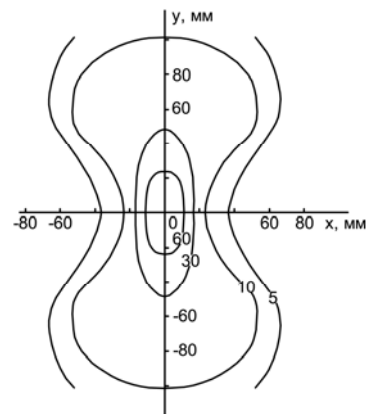


Рис. 8. Линии равной скорости осаждения TiN покрытия на плоской подложке, расположенной на расстоянии 50 мм от торца анода, при включенных корректирующих катушках

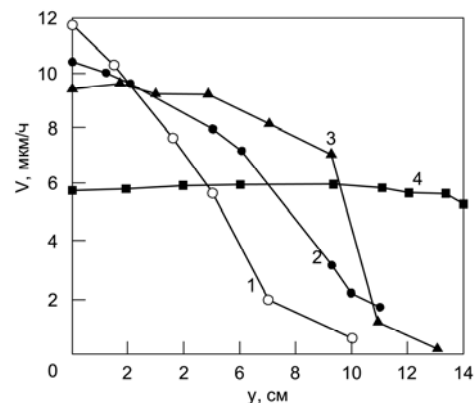


Рис. 9. Распределение скорости конденсации нитрида титана по вертикали на вращающемся вокруг вертикальной оси цилиндре диаметром 500 мм. Корректирующие катушки отключены (1, 2) и включены (3, 4); $p = 2 \cdot 10^{-5}$ Торр (1); $p = 5 \cdot 10^{-3}$ Торр (2, 3);

При размещении обрабатываемых изделий на кассете, вращающейся вокруг вертикальной оси, такая топограмма скоростей конденсации позволяет получить приведенное на рис. 9 интегральное распределение скорости конденсации, вытянутое по вертикали. Видно, что применение дополнительного магнитного поля, перпендикулярного основному, существенно увеличивает равномерность толщины покрытия с некоторым повышением коэффициента использования плазмообразующего вещества. Повышение давления рабочего реактивного газа, при котором реализуется низкотемпературная технология [4], сопровождается дальнейшим повышением степени равномерности толщины вследствие увеличенной хаотизации плазменного потока.

6. ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК С ФИЛЬТРОМ

Конструктивно плазменный фильтр представляет собой камеру в форме куба (рис. 10) с водоохлаждаемыми стенками.

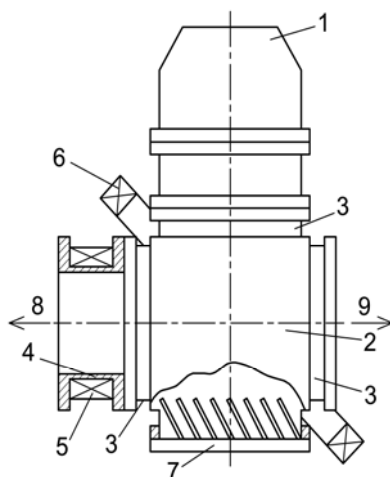


Рис. 10. Плазменный источник с фильтром: источник плазмы (1), плазмовод (2), горловина с фланцем (3), выходная секция плазмовода (4), выходная катушка (5), отклоняющая катушка (6), ловушка для макрочастиц (7)

Длина ребра куба 315 мм. На каждой его грани имеются горловины с фланцами. Посадочные места на фланцах являются унифицированными и служат для стыковки с камерой, высоковакуумным затвором, источником плазмы, водоохлаждаемой ребристой ловушкой макрочастиц. Плазмовод установлен так, что ось источника плазмы направлена горизонтально и составляет угол 90° с осью откачной горловины камеры. Между камерой и плазмоводом установлена фокусирующая выходная катушка, обеспечивающая транспортировку плазменного потока к обрабатываемому изделию. Плазмовод может быть выполнен в нескольких вариантах, отличающихся конструкцией отклоняющей магнитной системы. В описываемой установке используется вариант рамочной катушки, установленной в вертикальной плоскости, образующей угол 45° с осями источника плазмы и выходной катушки. Все катушки запитаны

от автономных источников питания, что даёт возможность оптимизировать структуру магнитных полей и соответственно выходные характеристики фильтра. Кроме того, выходная катушка может быть снабжена сканирующими соленоидами, позволяющими развернуть плазменный поток в вертикальной плоскости. К аналогичному эффекту приводит периодическое переключение направления полей, создаваемых катушками сепаратора. При этом используется отклонение плазменного потока поочередно вверх и вниз в такт переключениям. Отклонения плазмы в данном случае обусловлены явлением дрейфа плазмы в неоднородном криволинейном магнитном поле.

Исследования также показали целесообразность использования плазменного источника с фильтром в режиме сорбционного насоса (при отключенных катушках), на стадии ионной очистки изделий. Полный выходной ионный ток и максимальная скорость конденсации на неподвижное изделие, обеспечиваемые источником плазмы с фильтром, приведены в таблице.

Эффективность плазменного источника с фильтром

Материал катода	Ток дуги, А	Выходной ионный ток, А	Скорость конденсации, мкм/ч	Материал покрытия
Титан	100	2,5	6...8	Нитрид титана
Графит	150	6	10	Алмазоподобный углерод
Алюминий	120	3	8	Алюминий

7. ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

Стабильность технологического процесса, воспроизводимость результатов, экономические показатели вакуумно-дуговых установок существенным образом зависят от параметров источника питания вакуумной дуги, выбор которого определяется вольт-амперной характеристикой дугового разряда. Необходимым условием устойчивого горения вакуумной дуги является крутопадающая внешняя вольт-амперная характеристика источника питания. Существующие источники, удовлетворяющие этому условию, обладают рядом недостатков, основными из которых являются:

- необходимость использования балластных реостатов для создания крутопадающей характеристики и в результате – низкий КПД системы;
- высокая материалоемкость и громоздкость;
- малый диапазон регулирования токов дугового разряда, что неудобно при использовании различных испаряемых плазмообразующих материалов.

В этом отношении заметными преимуществами обладает разработанный для установки «Булат-9» четырехканальный источник питания вакуумных дуг. На рис. 11 показана его блок-схема.

Источник содержит общий трансформатор мощностью 20 кВт, четыре управляемых тиристорных выпрямителя, автономные схемы управления, поджига дуги и питания магнитных катушек источников плазмы, индуктивности в катодных цепях (6,5 мГн). Особенностью блока электронного регулирования тиристорного выпрямителя является наличие глубокой обратной связи, датчиком которой служит водоохлаждаемый высокостабильный шунт. Наличие этой связи позволяет поддерживать ток разряда на заданном уровне в пределах от 40 до 250 А (для титанового катода) с погрешностью не более 3 % и быстродействием 5 мс.

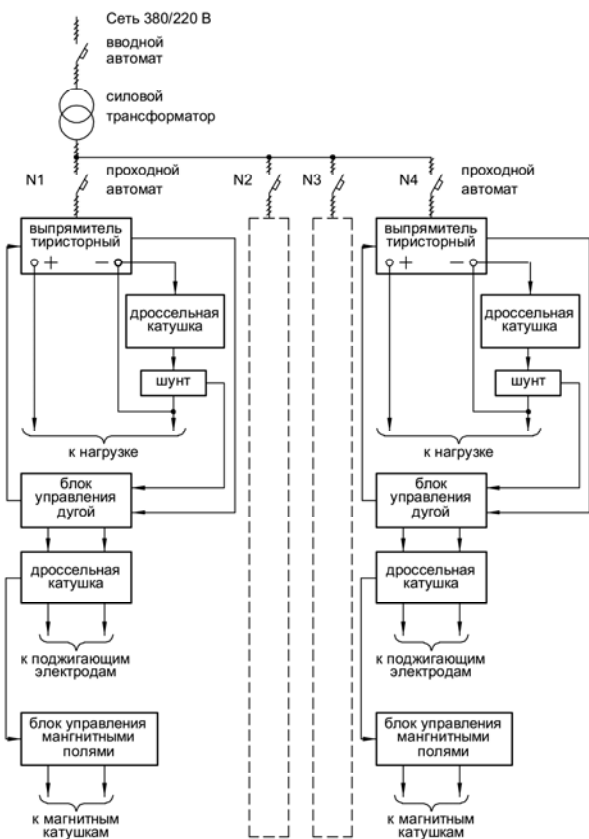


Рис. 11. Четырёхканальный источник питания вакуумно-дуговых разрядов

Высокая стабильность дуги в указанном диапазоне токов обеспечивается наличием индуктивности в разрядной цепи. При этом наблюдается не более одного погасания в минуту при токе 40 А. Однако наличие индуктивности существенным образом затрудняет инициирование (поджига) вакуумной дуги. Для устранения этого эффекта используется "обводная" RC-цепочка, в которой источником первичного подхвата тока дуги служит ёмкость $C = 7000$ мкФ, разряжающаяся через резистор $R = 2,5$ Ом. Заряд емкости осуществляется через диод, который устраняет возможность автоколебаний тока в момент поджига.

Разработанный источник питания вакуумных дуг обладает следующими преимуществами:

- а) возможность параллельного питания четырёх вакуумных дуг от одного трансформатора, что существенно улучшает массогабаритные показатели;
- б) отсутствие балластных реостатов, что не менее чем вдвое повышает КПД источника;
- в) обеспечение высокого уровня стабильности горения дугового разряда в широком диапазоне токов и высокой вероятности ($\geq 90\%$) поджига;
- г) возможность программного управления источником.

8. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ

Важным параметром, определяющим технологические процессы ионной очистки поверхностей изделий, подлежащих обработке, и конденсации покрытий, является величина постоянного отрицательного напряжения на обрабатываемых изделиях. К источнику этого напряжения предъявляются следующие требования:

- а) обеспечение мощности, необходимой для прогрева обрабатываемых изделий при заданной энергии ионов;
- б) наличие быстродействующего устройства для эффективного гашения микродуговых разрядов на обрабатываемых изделиях;
- в) широкий диапазон напряжений (30...1500 В) при ионных токах на изделия до 30 А;
- г) высокая надёжность и возможность программного управления.

Блок-схема высоковольтного источника, удовлетворяющего указанным условиям, приведена на рис. 12.

Силовой трансформатор мощностью 30 кВт имеет секционированную вторичную обмотку, напряжение с которой через коммутирующие пускатели поступает на диодный выпрямитель, собранный по схеме Ларионова. Коммутация напряжений во вторичной обмотке трансформатора, соответствующих величинам 100, 200, 300 и 1100 В, позволила применить слаботочные пускатели и повысить КПД трансформатора.

Плавное изменение напряжения в пределах каждой ступени осуществляется по первичной обмотке с помощью трёх однофазных тиристор-регуляторов. Кроме регуляторов, служащих также для кратковременного (около 10 мс) отключения напряжения, в первичной цепи трансформатора находятся токоограничивающие дроссели и фазосдвигающие балластные сопротивления. Такое устройство первичной цепи трансформатора ограничивает максимальный ток (величиной 60 А) на выходе высоковольтного выпрямителя. При необходимости эта величина может быть скорректирована в любую сторону путём изменения зазора в токоограничивающих дросселях. Тем не менее, такая конструкция источника не является гарантией гашения микродуговых разрядов. Для минимизации времени существования микродуговых разрядов используется эффект возбуждения колебаний в параллельном колебательном LC контуре, включенном последовательно в плюсовую цепь источника в момент зажигания микродуги. Раз-

вите колебаний в двух контурах, резонансные частоты которых составляют 200 и 20 кГц, обеспечивает надёжное гашение микродуговых разрядов на изделии в широком диапазоне ионных токов при минимальном (порядка размеров катодного пятна) повреждении поверхности обрабатываемых изделий.

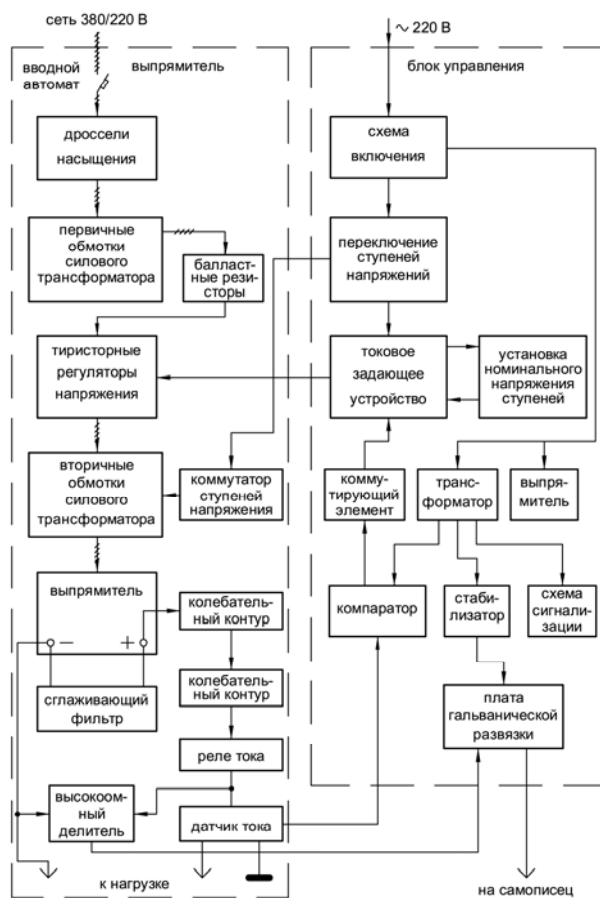


Рис. 12. Источник отрицательного напряжения смещения, подаваемого на обрабатываемые изделия

В блоке управления источником отрицательного смещения предусмотрены две возможные регулировки напряжения с помощью программируемого устройства: дискретная и аналоговая. В основном варианте предусмотрено дискретное управление с предварительным выбором величины напряжения на каждой ступени.

9. ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ

Управляющая система установки должна удовлетворять следующим требованиям: высокие надёжность и помехозащищённость, оперативность перестройки на другой техпроцесс, максимально возможная степень контроля параметров процесса, возможность эксплуатации персоналом средней квалификации.

В установках «Булат-9» блок программного управления является одновременно пультом оператора при проведении процесса в "ручном" режиме. Блок состоит из двух программаторов, предназначенных:

1 – для автоматического управления процессом откачки,

2 – для управления технологическим циклом формирования покрытий, азотирования или дуплексной обработки изделий.

Программатор откачки обеспечивает управление операциями переключения клапанов вакуумной системы, выгрузки-загрузки обрабатываемых изделий, разгерметизации камеры. Программа этих операций, записанная на носителе типа K155PE3, является жёсткой и в процессе эксплуатации корректировке не подлежит.

Программатор технологического цикла позволяет осуществлять автоматическое управление исполнительными элементами установки в последовательности, определяемой программой, "защитой" в постоянное программируемое запоминающее устройство (ППЗУ), состоящее из четырех микросхем серии K155PE3.

Программатор оснащен комплектом ППЗУ, содержащим 10 программ и позволяющим проводить одновременное управление исполнительными элементами по 28 каналам. Выходы программатора имеют цифровую индикацию состояния, предусмотрена цифровая индикация номера шага программы и его текущего времени. О конце технологического процесса информируют мигающий световой и прерывистый звуковой сигналы.

Для сброса и возвращения обоих программаторов в исходное состояние оператор должен нажать кнопки "Сброс" на каждом программаторе. Эти же кнопки служат для остановки программы на любом шаге. При необходимости оператор может продлить любой шаг программы на нужное ему время нажатием кнопки "Ост. N". Запуск полного технологического цикла осуществляется нажатием только одной кнопки "Пуск" на программаторе откачки вакуумной системы.

На лицевую панель программаторов выведены соответствующие кнопки "ручного" управления исполнительными механизмами, использование которых необходимо при проведении наладочных работ на установке и экспериментальных работах при разработке нового технологического процесса.

10. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ

Помимо обычных, ставших уже "стандартными", технологий, реализуемых с помощью известных вакуумно-дуговых установок, установка «Булат-9» позволяет осуществлять ряд технологических процессов модифицирования поверхности изделий, которые на серийных машинах затруднены или практически невозможны. К ним относятся: упрочнение с помощью нитридных композиционных покрытий мелкогабаритного инструмента (сверла диаметром ~ 1 мм, зубные боры); нанесение покрытий на внутренние поверхности инструментов из сталей с низкой температурой отпуска (плашки, фильеры); нанесение износостойких покрытий на детали машин с температурой отпуска 250...280 °С (детали топливной аппаратуры из сталей и сплавов типа ХВГ, 40Х); получение бескапельных покрытий с применением плазменного фильтра; азотирование поверх-

ности на глубину 30...50 мкм при температуре 300...500 °С; создание сложных, принципиально новых типов покрытий и композиций модифицированием поверхности (азотированием) с последующим послойным нанесением проводящих и/или диэлектрических покрытий.

Полная автоматизация установки ("однокнопочное" управление) позволяет использовать ее персоналом средней квалификации и использовать в качестве составной части линий по производству инструментов, прецизионных деталей машин, декоративных изделий и т.п. Возможности и технические решения, заложенные в установке, наиболее полно могут быть реализованы при микропроцессорном управлении.

11. МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ «БУЛАТ-9» (ЭДИТ)

В середине 1990-х годов был разработан проект установки «Булат-9М» (ЭДИТ-ТМ), в котором при сохранении основной концепции «Булата-9» осуществлен ряд существенных конструктивных изменений, учитывающих опыт нескольких лет эксплуатации прототипа в лабораторных и производственных условиях. Общий вид новой модификации установки показан на рис. 13. Внесенные в нее конструктивные изменения направлены на повышение производительности и надежности, на упрощение обслуживания. Основные из этих изменений прокомментированы ниже.

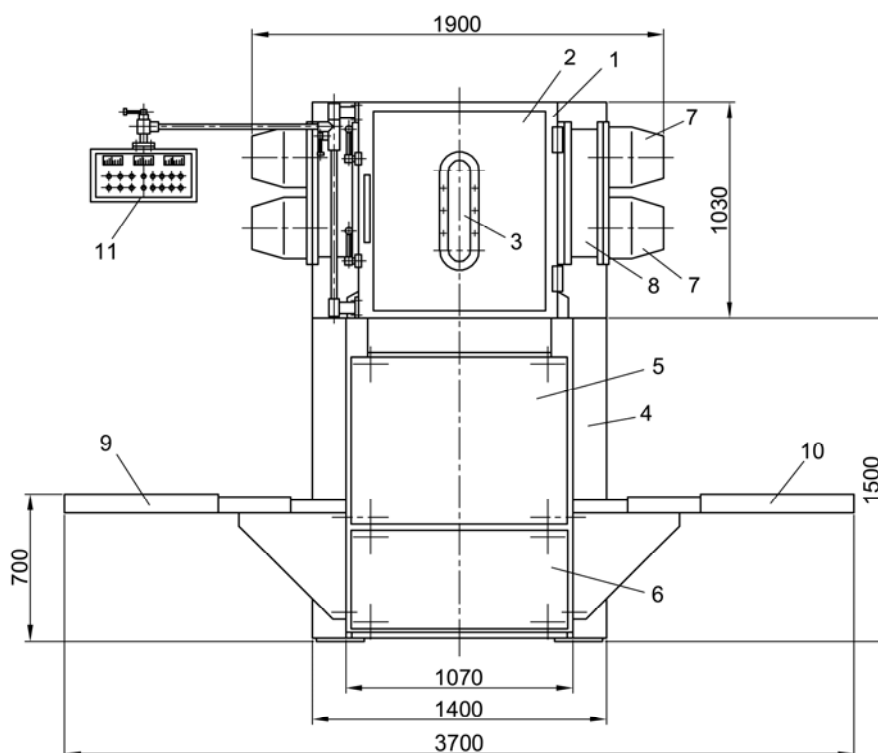


Рис. 13. Общий вид вакуумно-плазменного агрегата установки «Булат-9М» (ЭДИТ), вид спереди: камера (1), дверь (2), окно (3), подставка (4), защитно-декоративные панели (5, 6), катодный узел источника плазмы в защитном кожухе (7), анод (8), столы загрузки-выгрузки (9, 10), пульт управления (11)

Вакуумная камера в установке новой модификации увеличена в размерах: её высота составляет 1050 мм, диаметр – 900 мм. Передняя стенка камеры выполнена в виде двери, наличие которой облегчает доступ к внутренним элементам камеры: заслонкам, шторам, панелям прогрева, внутренним частям плазменных источников и др., что значительно облегчает процедуры профилактических осмотров и чистки камеры. В двери имеется большое вытянутое по вертикали смотровое окно, обеспечивающее удобство визуального наблюдения за тем, что происходит в камере во время технологического процесса. В боковых стенках камеры напротив друг друга имеются две также вытянутые по вертикали горловины, к которым пристыкованы сдвоенные вакуумно-дуговые источники плазмы. Каждый из этих блоков содержит два независимых катодных узла (катод, стабилизирующая катушка, устройство поджига, корпус, защитный колпак) и один общий

анод с фокусирующей катушкой. К третьей горловине, размещённой напротив двери, пристыкован блок, состоящий из двух независимых источников плазмы, оснащённых магнитными фильтрами с плазмододами в виде четверти тора. Плазмододы установлены на общем стыковочном фланце. Днище камеры, перемещаемое по вертикали с помощью винтового подъёмника, в сочетании с двумя механизмами горизонтального перемещения кассет с обработанными и подлежащими обработке изделиями, как и в «Булате-9», составляют механическую часть системы выгрузки-загрузки.

Система питания плазменных источников состоит из четырех пар сварочных аппаратов ВДУЧ-1, работающих по схеме с преобразованием частоты. Каждая "пара" обеспечивает питание одного источника плазмы, так что одновременно могут быть "задействованы" до четырех плазменных источников установки. Парное соединение сварочных источ-

ников необходимо для удвоения напряжения холостого хода, что, в свою очередь, диктуется необходимостью обеспечения надёжности поджига и стабильности горения дуги в источнике плазмы. Это особенно актуально при использовании магнитной фокусировки плазменных потоков, так как в этих режимах напряжение горения дуги значительно повышается и может достигать 50 В и более.

12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В установке «Булат-9» применён ряд технических решений, нетрадиционных для вакуумно-дуговых машин аналогичного назначения: это, прежде всего, камера колпачного типа, что позволило промывать её внутренние поверхности и содержащиеся в ней элементы оснастки сухим горячим азотом (или аргоном) при загрузке и выгрузке обрабатываемых изделий со стороны днища, перемещаемого по вертикали с помощью подъёмника; система автоматической выгрузки-загрузки изделий в камеру; экранировка внутренних стенок камеры прогреваемыми до высоких температур панелями; усовершенствованные вакуумно-дуговые источники плазмы, включая источник с плазменным фильтром; однотрансформаторная четырехканальная система питания источников плазмы; система колебательных LC-контуров для подавления микродуг на поверхностях обрабатываемых изделий; автоматическое управление технологическим циклом, включая процессы откачки камеры, выгрузки и загрузки изделий, весь процесс ионно-плазменной обработки (очистка ионной бомбардировкой, электронный нагрев изделий, азотирование, осаждение покрытия). Перечисленный комплекс технических решений определил уникальность установки как по конструктивному исполнению, так и по производительности, энергетической экономичности, по технологическим возможностям и гибкости перестройки с одного технологического процесса на другой, по простоте обслуживания. По эксплуатационным качествам установка остается непревзойденной, а по концепции конструктивного исполнения – новой, хотя и

создана без малого два десятилетия назад. По мнению авторов, ряд технических решений, использованных в «Булате-9» целесообразно применить при создании новых установок для вакуумно-дугового осаждения покрытий и других видов ионно-плазменной обработки материалов.

Общая концепция установки «Булат-9» и техническое задание на ее проектирование разработаны В.Г. Бренем, И.И. Аксёновым и Л.К. Гетьманом. Пусконаладочные работы и отработка технологических процессов на установке осуществлялись под руководством В.Г. Брени. Конструкторская документация разработана группой специалистов конструкторского бюро ХФТИ (Л.И. Гетьманом, С.И. Мельником, В.П. Смазным, В.Д. Шелешпановым и др.). Разработка технического задания на проектирование и проектирование модифицированной модели установки осуществлялись тем же составом специалистов с участием В.А. Белоуса. Основные конструкторские работы по системе электропитания и управления модифицированной установки выполнены Ю.А. Сенченко.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.L. Boxman, D.M. Sanders, Ph.J. Martin (Eds.). *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology*. Noyes Publications, Park Ridge, NJ, USA, 1995, 742 p.
2. Andre Anders (Ed.). *Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition*. John Wiley & Sons, Inc., NY / Chichester / Weinheim / Brisbane / Singapore / Toronto, USA, 2000, 736 p.
3. А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. *Вакуумно-дуговые устройства и покрытия*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, 236 с.
4. В.М. Хороших. *Стационарный дуговой разряд низкого давления в системах плазменной обработки поверхностей*: Докт. дис. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2002, 313 с.
5. И.И. Аксёнов. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2002, 212 с.

ВИСОКОПРОДУКТИВНА ВАКУУМНО-ДУГОВА УСТАНОВКА ДЛЯ ОСАДЖЕННЯ ПОКРИТТІВ

І.І. Аксёнов В.А. Білоус

Описано установку, в якій застосовано ряд технічних рішень нетрадиційних для вакуумно-дугового обладнання аналогічного призначення: камера ковпакового типу, яка дозволяє здійснювати її промивку сухим гарячим азотом або аргоном; система автоматизованого завантаження – розвантаження камери виробами, що підлягають обробці; екранування внутрішньої поверхні камери панелями, що нагріваються до високих температур; удосконалені вакуумнодугові плазмові джерела, серед яких одне оснащено магнітним фільтром; однотрансформаторне чотириканальне джерело живлення дугових розрядів; LC коливальні контури для запобігання появи розвинених катодних плям на оброблюваних виробках; система автоматичного керування технологічним процесом. Застосування ряду зазначених технічних рішень обумовили унікальність і новизну установки, які збереглися до теперішнього часу.

HIGH EFFICIENT VACUUM ARC PLANT FOR COATING DEPOSITION

I.I. Aksenov, V.A. Belous

A number of progressive technical solutions are used in the «Bulat-9» machine designed for vacuum arc coating deposition. The features of the machine are: a dome shaped working chamber that allows to "wash" its inner surfaces with hot nitrogen or argon gas; a system of automatic loading/unloading of articles to be treated into the chamber through its bottom; shielding of the inner surfaces of the chamber by heatable panels; improved vacuum arc plasma sources including filtered one; four ported power supply for the vacuum arc discharges; LC oscillatory circuits suppressing microarcs on the substrate; the system of automatic control of a working process. The said technical features cause the apparatus originality and novelty preserved up to-day.