

## Экономические аспекты применения ионно-плазменных технологий

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

В работе выполнен анализ ионно-плазменных технологий, используемых в машиностроении для модификации поверхностных слоев изделий с целью улучшения их функциональных характеристик. Анализ выполнен с точки зрения технико-экономической эффективности используемых процессов и применяемого оборудования. Рассмотрены вопросы экономической оптимизации работы установок за счет снижения энерго- и материалоемкости при условии обеспечения необходимого качества покрытий. Предложен ряд новых решений по повышению технико-экономических характеристик используемого оборудования.

**Ключевые слова:** ионно-плазменная обработка, ионно-плазменные технологии, температура катода.

### 1. Введение

Методы ионно-плазменной обработки широко применяются во всем мире в различных отраслях промышленности. Первоначальным стимулом работ в данном направлении явились потребности машиностроения в повышении стойкости и ресурса режущих инструментов при постоянном увеличении скорости обработки и повышении твердости обрабатываемых материалов. Успехи применения упрочняющих покрытий в металлообработке, заключающиеся в существенном повышении износостойкости режущего инструмента и его ресурса, предопределили расширение областей производства, где применяются ионно-плазменные методы. При этом также увеличивается и сфера функционального применения покрытий. Они начинают использоваться как коррозионностойкие, жаростойкие, защитно-декоративные, геттерные, антифрикционные и др. К настоящему времени за счет поверхностной обработки методами ионно-плазменных технологий достигнуты следующие результаты: повышение стойкости режущего инструмента в 2,5...3,5 раза; увеличение общего срока службы компрессорных лопаток ГТД в 1,8 – 2 раза, повышение коррозионной стойкости до пяти раз [1].

Достигнутые достаточно высокие результаты обосновывают экономическую эффективность применения ионно-плазменных технологий. Вместе с тем, эти же результаты затушевывают тот факт, что реализация самих методов обработки зачастую не является экономически оптимальной. Это связано с тем, что большинство существующих ионно-плазменных установок характеризуются высокой энерго- и материалоемкостью при проведении технологических процессов. Так, широко распространенные установки типа «Булат», «ННВ» и аналогичные имеют энергопотребление до 50 кВт, расход воды до 2 м<sup>3</sup>/ч, коэффициент полезного использования материала катода (которым часто являются металлы, имеющие высокую стоимость), обеспечиваемый конструкцией источника плазмы, в среднем не более 70...80%. Поэтому вопросы повышения экономической эффективности ионно-плазменных технологий являются актуальными. Критериями оптимальности при этом могут служить различные показатели: энергопотребление, водопотребление, коэффициент полезного использования плазмообразующего материала катода, время цикла нанесения покрытий и другие при условии обеспечения необходимого качества покрытий (задаваемое в каждом конкретном случае такими показате-

лями, как адгезия, твердость, износостойкость, теплостойкость, коэффициент трения, одинаковая толщина по площади, равный состав по толщине, пористость, количество микрокапель, шероховатость, внешний вид и пр.).

Целью работы является анализ энерго- и материалозатрат при реализации ионно-плазменных технологий, рассмотрение на его основе возможностей их снижения и разработка новых технико-экономических решений, повышающих производительность и минимизирующих затраты при условиях обеспечения качества покрытий на заданном уровне.

## 2. Ресурсные затраты при реализации ионно-плазменных технологий

### 2.1. Анализ энергозатрат

Распределение энергозатрат по основным узлам ионно-плазменных установок рассмотрено на примере установки «Булат-6» [2], являющейся типичным представителем установок данного класса и представлено в табл. 1.

Таблица 1  
Основные составляющие энергопотребления в установке «Булат-6»

Наименование узла установки	Максимальная потребляемая мощность, кВт	Количество, шт	Общая потребляемая мощность, кВт	Доля в общей потребляемой мощности, %
Источник плазмы	4,5	1/3	4,5/13,5	11,3/27,7
Нагреватель индукционный	13	1	13	32,7/26,7
Выпрямитель ионной бомбардировки	15	1	15	37,8/30,8
Агрегат форвакуумный АВ3-20Д	2,2	1	2,2	5,5/4,5
Нагреватель диффузионного насоса НВДМ-250	2,0	1	2,0	5,1/4,1
Прочие устройства переменного потребления энергии (поворотное устройство, приводы клапанов и др.)	2	1	2	5,1/4,1
Прочие устройства постоянного потребления энергии (аварийный клапан, вакуумметр ВИТ-3 и др.)	1	1	1	2,5/2,1
		Всего	39,7/48,7	100

Узлы установки «Булат-6» по их режиму работы можно разделить на два типа: устройства постоянного потребления энергии (основные из которых нагреватель диффузионного насоса и агрегат форвакуумный АВ3-20Д) и устройства периодического потребления (основные – источники плазмы, нагреватель индукционный, выпрямитель ионной бомбардировки). Устройства первого типа, поддерживая функционирование установки, работают непрерывно в течение всего рабочего времени и потребляемая ими мощность постоянна. Длительность включения, и соответственно, мощность потребления устройствами второго типа регламентируется требованиями технологического процесса. Кроме того, этими же требованиями для источников плазмы и выпрямителя ионной бомбардировки устанавливается режим, а, следовательно, и потребляемая мощность.

Возможности снижения энергопотребления узлами установки ограничиваются особенностями физических процессов, лежащих в основе их работы. Для примера можно привести следующее: ионный ток из плазмы вакуумной дуги, который может быть получен на подложку, обычно не превышает значение порядка 10% от общего тока дуги («правило 10%», [3]); коэффициент электропереноса материала катода в вакуумной дуге определяется материалом катода и для данной температуры рабочей поверхности катода при постоянном давлении является величиной постоянной [4]; для нормального функционирования диффузионного насоса необходимо подводить энергию для получения паров масла и отводить ее от поверхности конденсации паров. Поэтому вопрос повышения экономической эффективности таких устройств неразрывно связан с совершенствованием самих методов достижения необходимых результатов.

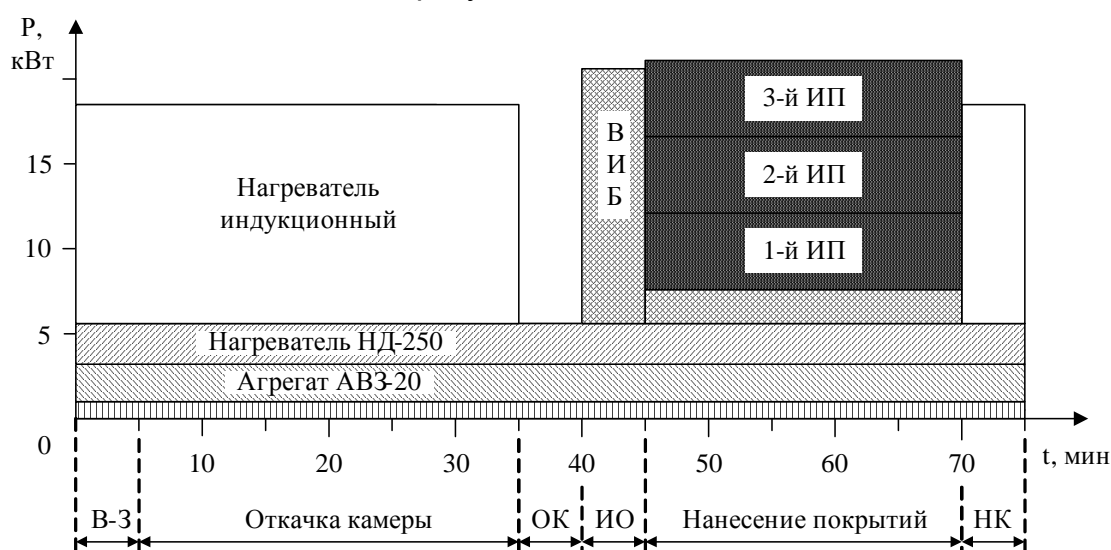


Рис. 1. Потребление энергии узлами установки «Булат-6» при реализации технологического процесса.

Условные сокращения: ВИБ – выпрямитель ионной бомбардировки; ИП - источник плазмы; В-З – выгрузка (загрузка) изделий из (в) камеры (у); ОК – охлаждение камеры; ИО – ионная очистка; НК – нагрев камеры.

При анализе доли того или иного узла в общей потребляемой энергии следует учитывать время его работы в течение цикла проведения обработки. Распределение энергопотребления во времени различными узлами установки при реализации типового технологического процесса показано на рис. 1. Несмотря на высокую потребляемую мощность источниками плазмы и выпрямителем ионной бомбардировки (~ 50 % в общем балансе), потребление ими энергии за время проведения технологического процесса оказывается наименьшим по сравнению с потреблением остальными основными узлами. Так, для режима обработки, представленного на рис.1, потребление энергии выпрямителем ионной бомбардировки равно 1,25 кВт·час в режиме ионной очистки и 0,83 кВт·час в режиме нанесения покрытий, для источников плазмы – 1,87 кВт·час на один источник. Значительно больше энергии потребляют узлы, обеспечивающие функционирование установки: 7,85 кВт·час система откачки (нагреватель насоса НВДМ-250 и электропривод агрегата АВЗ-20) совместно с устройствами постоянного потребления энергии и 8,6 кВт·час нагреватель индукционный. Данный анализ показывает, что поиск решения задачи снижения энергопотребления ионно-плазменных установок в пер-

вую очередь необходимо проводить в области уменьшения энергоемкости узлов, обеспечивающих функционирование установок.

Наибольшее количество энергии в установках «Булат» потребляет нагреватель индукционный, работающий в течение ~50% времени технологического цикла. Основное его функциональное назначение – обеспечение прогрева вакуумной камеры и других частей установки с целью предотвращения конденсации на них паров воды и тем самым сокращение время откачки рабочего объема установки до высокого вакуума. Работа этого устройства в составе системы прогрева камеры далека от рациональной. Действительно, в такой системе постоянно идет нагрев проточной воды от  $T_{мин}$  до  $T_{маx}$ , а нагретая вода идет на охлаждение, где опять надо затратить энергию (как минимум, на транспортировку воды) для снижения температуры воды от  $T_{маx}$  до  $T_{мин}$ . Очевидно, что построение работы системы прогрева вакуумной камеры на более рациональных принципах обеспечит резкое сокращение потребления энергии этим устройством, а значит, позволит существенно повысить экономическую эффективность ионно-плазменных установок.

Значительная часть подводимой энергии к большинству узлов установки затем отводится проточной водой системы охлаждения. Складывается ситуация, когда, по сути, при работе установки производится нагрев воды разными устройствами, и только одно из них, нагреватель индукционный, целенаправленно осуществляет ее подогрев. При практически паритетном потреблении энергии нагревателем индукционным и остальными устройствами представляется целесообразным проработка вопроса создания системы прогрева вакуумной камеры, в которой вместо индукционного нагревателя для подогрева воды используется энергия других узлов ионно-плазменной установки.

## 2.2. Анализ потребления воды

При работе ионно-плазменных установок для охлаждения ее узлов и прогрева стенок вакуумной камеры используется проточная вода, причем в конструкцию установок, как правило, закладывается принцип ее постоянного расхода. Основным достоинством такого подхода является простота его реализации. Однако, поскольку при этом необходимо расход устанавливать максимальный (с учетом отвода максимальной подводимой энергии к узлам установки), то данный принцип предопределяет повышенное водопотребление, и, как следствие этого, повышенный расход электроэнергии и снижение производительности. Замена постоянного расхода на контролируемый переменный расход воды, очевидно, позволит получить существенные технико-экономические выгоды, заключающиеся в повышении экономии ресурсов и производительности ионно-плазменных установок, а также повышении качества обработки. Это следует из следующих соображений.

Рассмотрим процесс охлаждения катода вакуумно-дугового источника плазмы при постоянном протоке воды через зону охлаждения. Во-первых, в начальный момент при таком расходе увеличивается время выхода катода на стационарный температурный режим, поскольку поступающая из разряда на катод энергия расходуется как на его нагрев, так и на нагрев протекающей охлаждающей жидкости. Во-вторых, поскольку в процессе работы вследствие эрозии катода постоянно уменьшается его длина, то будет изменяться и температура рабочей поверхности катода. В свою очередь ее изменение приведет к изменению состава генерируемого плазменного потока (перераспределению средней энергии ионов

различной кратности заряда, изменению относительного содержания ионов с меньшей кратностью заряда и изменению содержанию капельной фракции в плазменном потоке [5]), что неизбежно будет влиять на состав и характеристики получаемых покрытий. В значительной мере избавиться от данных недостатков возможно путем контролируемого регулирования расхода воды через зону охлаждения катода, при котором обеспечивается сокращение времени установления стационарного режима катода, а также, в определенном диапазоне, поддерживается постоянной температура его рабочей поверхности.

Аналогичным образом можно показать, что изменяя расход воды от минимального до номинального в период прогрева диффузионного насоса, можно не только сократить расход воды, но и уменьшить время выхода насоса на рабочий режим.

### 2.3. Возможности повышения коэффициента использования материала катода

Установки ионно-плазменной обработки являются установками со значительным уровнем материальных затрат. Изначально этот уровень определяется высокой наукоемкостью используемых технологических процессов. Приведенным в [2] перечнем материалов, необходимых при эксплуатации одной установки типа «Булат-6», этот список далеко не исчерпывается. Не вдаваясь в детальный анализ возможностей сокращения уровня материальных затрат по отдельным составляющим, проанализируем возможные направления совершенствования источников плазмы для повышения коэффициента полезного использования материала катода. Данный вопрос особенно актуален при использовании катодов из материалов остродефицитных, имеющих высокую стоимость (вольфрам, молибден, гафний и др.).

Коэффициент полезного использования материала катода в одном цикле напыления  $\eta_u$  можно определить как отношение массы нанесенных покрытий  $M_{пц}$  в этом цикле к разнице масс катода в начале цикла нанесения  $M_{нц}$  и в его конце  $M_{кц}$ :  $\eta_u = M_{пц} / (M_{нц} - M_{кц})$ . Величина  $\eta_u$ , вследствие «правила 10%» [3], обычно не превышает значений в несколько процентов. Для одного источника плазмы установки «Булат-6» в номинальном режиме при нанесении покрытий на расстоянии 50 мм от среза анода, при параметрах, приведенных в [2], величина  $\eta_u$  не превышает  $\approx 3\%$ . Повышение значения  $\eta_u$  до максимальных значений, ограниченных «правилом 10%» требует проведения отдельных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Усредненный за период ресурса катода коэффициент полезного использования материала катода  $\overline{\eta_u}$  по всем циклам обработки  $N$  равен

$$\overline{\eta_u} = \sum_{i=1}^N \left( M_{пци} / [M_{нци} - M_{кци}] \right) / N.$$

С другой стороны, вследствие конструктивных особенностей охлаждения и крепления катода не весь запас материала катода может быть задействован. Коэффициент полезного использования материала катода, определяемый конструкцией катодного узла  $\eta_{кон}$  равен  $\eta_{кон} = (M_n - M_k) / M_n$ , где  $M_n$  – начальная масса катода;  $M_k$  – масса катода в конце его ресурса.

Очевидно, что для получения максимального  $\eta_{\text{кон}}$  значение  $M_k$  должно быть минимальным. При этом, в общем случае, нужно учитывать и потери, возникающие при обработке катода для придания ему требуемой рабочей формы (например, конической, с резьбовым креплением и т.п.). Значение  $\eta_{\text{кон}}$  для катода источника плазмы установки «Булат-6» при выработке в 33 мм (длина рабочей части катода 35 мм) имеет величину до 73%.

Вопросу повышения  $\eta_{\text{кон}}$  при разработке новых конструкций источников плазмы уделяется серьезное внимание. Так, в [6] разработанная конструкция источника плазмы установки «Булат-9» позволяет оперативно вручную, без применения инструментов производить смену катода, имеющего диаметр в пределах 60...105 мм. Увеличение диаметра катода при прочих равных условиях позволяет увеличивать  $\eta_{\text{кон}}$ .

Получение значения  $\eta_{\text{кон}}$  близким к единице представляется возможным в конструкциях вакуумно-дуговых источников с охлаждением катода по боковой поверхности. При организации перемещения катода по мере его выработки в таких источниках плазмы дополнительно можно обеспечивать высокий запас плазмообразующего материала катода.

### 3. Новые решения по повышению экономичности установок

#### 3.1. Прогрев камеры за счет энергии, отводимой от источника плазмы

Очевидная неэффективность примененного в большинстве ионно-плазменных установках решения по прогреву вакуумной камеры, когда имеется отдельный мощный нагреватель воды, а отводимая от отдельных узлов установок энергия идет на нагрев воды и затем эта нагретая вода, не используя, отводится в систему охлаждения, потребовала разработки нового решения, направленного на устранение этого недостатка. С этой целью как потенциальные источники нагрева воды были рассмотрены различные узлы установки. При этом основным критерием выбора являлось условие сохранения работоспособности узла при его использовании в новом качестве.

Было выяснено, что поставленному критерию удовлетворяют узлы охлаждения катодов и анодов источников плазмы, в которых без существенного ухудшения режима работы, после некоторых доработок, возможно осуществлять нагрев воды до уровня порядка 60...80 °С. Мощность такого нагревателя определяется мощностью, выделяющейся на катоде и аноде вакуумно-дугового разряда. Известно, что в дуговом и искровом разрядах соотношение энергии  $P_a/P_k$ , выделяющейся на аноде  $P_a$  и катоде  $P_k$ , может быть как больше, так и меньше единицы, и определяется множеством факторов (вид и давление газа, ток разряда, его длительность, длина и др. [7 – 9]). В первом приближении можно полагать  $P_a = P_k$ , а потери на излучение равными порядка 20% от общей мощности разряда [10]. Ориентировочный расчет, выполненный в предположении величины суммарной мощности, выделяющейся на катоде и аноде вакуумно-дугового источника плазмы порядка 0,8 от номинальной мощности разряда (3 кВт) показывает, что до температуры 80 °С за один час работы такой нагреватель сможет нагреть порядка 35 литров воды.

Система прогрева вакуумной камеры, разработанная на основе рассмотренного принципа, представлена на рис. 2. Поскольку процесс нагрева теплоносителя и его использование для нагрева вакуумной камеры разнесены во времени, была

применена аккумулирующая термоизолированная емкость 4. Первоначальный нагрев воды в этой емкости осуществляется нагревателем 5. Этот же нагреватель используется для компенсации потерь энергии теплоносителем при прогреве камеры, а также для дополнительного его нагрева в технологических процессах с малой длительностью обработки (малым временем работы источника плазмы).

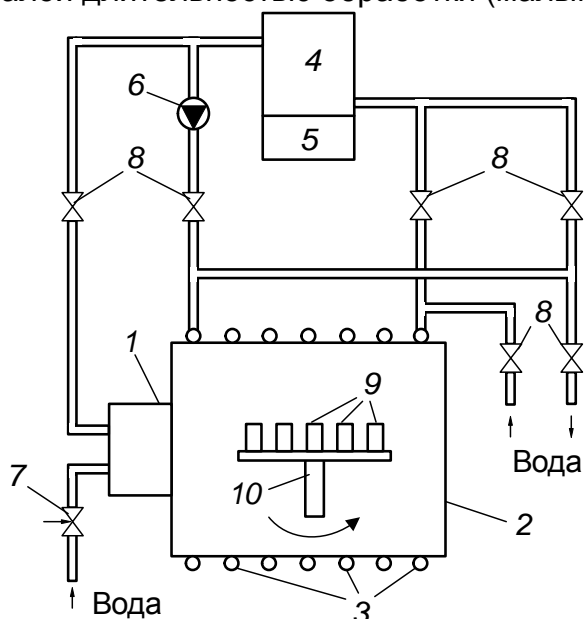


Рис. 2. Схема прогрева вакуумной камеры с использованием энергии, отводимой от источника плазмы:

- 1 – источник плазмы;
- 2 – вакуумная камера;
- 3 – медные трубки;
- 4 – термоизолированная аккумулирующая емкость;
- 5 – резервный нагреватель;
- 6 – циркуляционный насос;
- 7 – регулирующий вентиль;
- 8 – клапана;
- 9 – обрабатываемые изделия;
- 10 – подложкодержатель

Технические решения, положенные в основу работы системы прогрева вакуумной камеры: основной нагрев энергией, отводимой от источника плазмы; дополнительный подогрев нагревателем небольшой мощности; использование циркуляции теплоносителя, позволяют экономить при ее работе до 80% электроэнергии по сравнению со штатной системой прогрева камеры установки «Булат-6».

### 3.2. Снижение потребления воды

Регламентируемый расход воды установкой «Булат-6» - не более 1200 л/ч [2]. Из этого количества 100 л/ч потребляет система охлаждения диффузионного насоса НВДМ-250, остальное расходуется источниками плазмы и системой нагрева-охлаждения вакуумной камеры. При условии примерно одинакового потребления этими узлами, каждый потребитель воды установки расходует порядка 275 л/ч.

Применение источников плазмы в качестве нагревателей воды приводит к снижению ее расхода через источник до 35 л/ч (при температуре теплоносителя на выходе 80 °С). При использовании схемы прогрева вакуумной камеры с циркуляцией теплоносителя, приведенной на рис.2, система нагрева-охлаждения вакуумной камеры в режиме прогрева потребления воды не производит. Ее потребление идет только в режиме охлаждения камеры.

В режиме охлаждения камеры следует различать два этапа. Первый, когда нагретая камера охлаждается до рабочей температуры (рис.1), и второй, когда поддерживается рабочая температура камеры в процессе нанесения покрытий. Если на первом этапе для сокращения времени технологического цикла расход воды должен быть на номинальном уровне, то на втором рабочую температуру можно поддерживать при меньшем протоке охлаждающей воды (на уровне поряд-

ка 0,5 от номинального расхода).

Отдельного внимания заслуживает вопрос выхода на рабочий режим энергопотребляющих узлов ионно-плазменных установок. Как правило, этот процесс сопровождается охлаждением еще непрогретого узла, что приводит к неоправданным затратам энергии и расходу воды, непроизводительным потерям времени. Для примера, время прогрева катода источника плазмы установки «Булат-6» до температуры  $80^{\circ}\text{C}$  при параметрах: катод – титан, диаметр катода 60 мм, длина 35 мм, ток дуги 100 А имеет значение  $\approx 21$  с при отсутствии расхода охлаждающей жидкости. При наличии расхода охлаждающей жидкости это время увеличивается и достигает нескольких минут. Аналогичная ситуация имеет место и при выходе на рабочий режим диффузионного насоса. Поэтому целесообразным представляется для сокращения общего времени выхода на рабочие режимы и уменьшения расхода энергии и воды, в этот период расход воды не осуществлять.

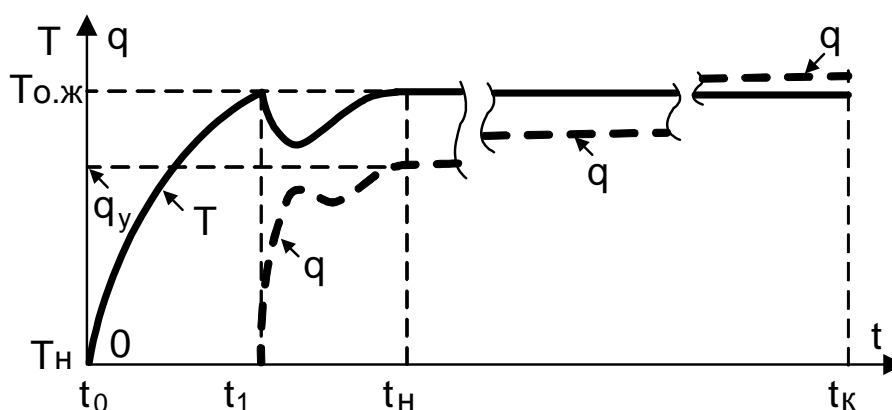


Рис. 3. Изменение температуры охлаждающей воды на выходе системы охлаждения катода при переменном расходе воды

Процесс установления и поддержания температуры охлаждающей жидкости на заданном уровне на ее выходе из системы охлаждения катода источника плазмы при переменном расходе воды показан на рис. 3. Постоянный рост расхода воды  $q$  в процессе работы источника плазмы связан с эрозией катода и соответствующей ей изменением длины катода. Казалось бы, небольшая экономия в 21 с, когда расход охлаждающей жидкости отсутствует, не скажется существенным образом на общей картине расхода. Тем не менее, это позволяет при реализации процесса напыления длительностью в один час при двухсменной работе экономить в год порядка 8000 л охлаждающей жидкости для одного источника плазмы установки «Булат-6». Соответственно, экономия будет выше в несколько раз при одновременной работе нескольких источников плазмы и при меньшем времени нанесения покрытий (большем количестве циклов напыления в смену). Такое же техническое решение в отношении охлаждения насоса НВДМ-250 позволяет экономить до 2000 л охлаждающей жидкости в год.

Сравнительные показатели расхода воды в стандартной и модернизированной на основе разработанных решений установках «Булат-6» приведены в табл. 2. При сохранении всех функциональных возможностей стандартной установки, модернизированная установка позволяет в 2 – 3 раза уменьшить расход охлаждающей воды при одновременном снижении потребления энергии и вспомогательного времени.



Таблица 2

Расход воды узлами стандартной и модернизированной установок «Булат-6»

Наименование узла	Режим работы	Расход воды, л/ч	
		Стандартная установка «Булат-6»	Модернизированная установка «Булат-6»
Источник плазмы:	Прогрев катода	275	нет
	Стационарный режим	275	35
Система нагрева-охлаждения вакуумной камеры	Нагрев камеры	275	нет
	Охлаждение камеры до начала процесса напыления	275	275
	Охлаждение камеры в процессе напыления	275	140
Охлаждение насоса НВДМ-250	В режиме запуска	100	5 мин отсутствует, затем 100
	В рабочем режиме	100	100

### 3.3. Повышение коэффициента использования материала катода

Для повышения коэффициента полезного использования материала катода  $\eta_{кон}$ , был разработан источник плазмы, в котором охлаждение катода происходит по его боковой поверхности, представленный в составе установки вакуумного напыления на рис. 4. Такое конструктивное исполнение катодного узла позволяет использовать катоды с запасом материала, в несколько раз превышающем запас материала катода в источнике плазмы установки «Булат-6», что обеспечивает увеличение  $\eta_{кон}$  до 90% и выше.

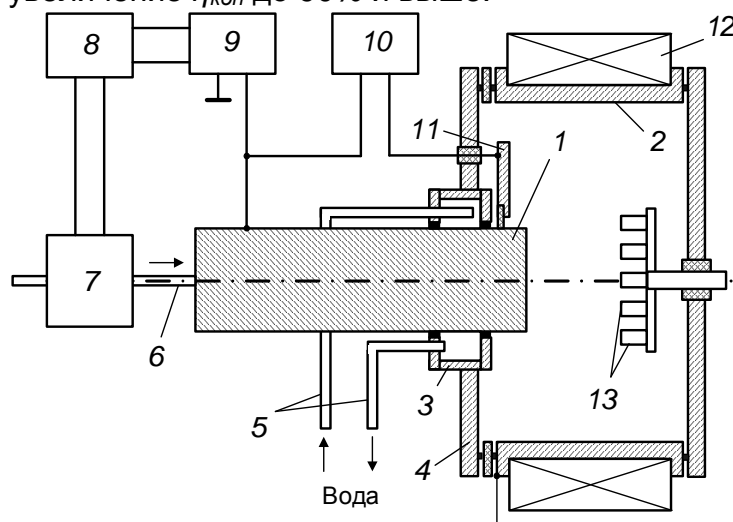


Рис. 4. Установка с модернизированным источником плазмы:  
 1 – катод; 2 – анод - камера;  
 3 – система охлаждения;  
 4 – фланец;  
 5 – патрубки; 6 – шток;  
 7 – привод;  
 8 – система управления;  
 9 – блок питания;  
 10 – блок поджига;  
 11 – поджигающий электрод;  
 12 – соленоид;  
 13 – обрабатываемые изделия

Кроме повышения коэффициента полезного использования материала катода  $\eta_{кон}$ , в представленной конструкции легко осуществляется поддержание температуры рабочей поверхности катода на заданном уровне путем перемещения катода так, чтобы расстояние между рабочей поверхностью катода и началом зоны его охлаждения было постоянным. Такая особенность расширяет технологические

возможности данного источника плазмы, поскольку позволяет получать плазменный поток с постоянным заданным соотношением компонентов.

### **3.4. Другие решения по повышению технико-экономических показателей установок**

Применяемое в установках «Булат», «ННВ» и аналогичных одноуровневое размещение оборудования отстает от требований эффективного использования производственных помещений. Более целесообразным является использование концепции многоуровневого размещения оборудования, предложенной в [11]. Такое многоуровневое размещение, снижая величину занимаемой площади и затраты по ее содержанию, одновременно улучшает условия труда (снижает уровень шума) и обеспечивает необходимую для вакуумного производства чистоту помещения.

Создание специализированных установок для обработки определенной номенклатуры изделий (как правило, малоразмерных) также обеспечивает повышение технико-экономических показателей установок. Для примера, созданная в ИФПМ СО РАН установка «Микро» [12] занимает площадь 9 м<sup>2</sup> и имеет потребляемую мощность не более 5,5 кВт, что практически на порядок ниже по сравнению с установкой «Булат-6».

Улучшение технико-экономических характеристик установок обеспечивается также соответствующим выбором отдельных устройств и материалов, обеспечивающих надежную и долговременную их эксплуатацию. Так, например, в качестве датчика давления целесообразно использовать ионизационный манометр ПМИ-10-2, который предназначен для работы в диапазоне давлений  $10^{-5} \dots 10^{-1}$  Торр, не столько из-за того, что этот диапазон характерен для всех технологических режимов, реализуемых на установках [6], но больше из-за ресурса этого датчика, превосходящего на порядок в указанной области давлений ресурс традиционно используемого манометра ПМИ-2. В качестве другого примера отметим, что в ряде случаев целесообразно также использование в качестве рабочих жидкостей пароструйных насосов кремнийорганических жидкостей и различных эфиров, чему способствует постоянно снижающаяся их стоимость. Указанная замена вследствие высокой термоокислительной стойкости таких рабочих жидкостей [13] значительно снижает затраты на ремонт и обслуживание диффузионных насосов.

## **4. Заключение**

1. Проведенный анализ ресурсных затрат при реализации ионно-плазменных технологий показал, что применяемое оборудование и режим его функционирования во многих случаях не обеспечивают оптимальное потребление энергии и материалов. Он же позволил с учетом физики протекающих процессов определить пути их снижения за счет разработки новых комплексных технико-экономических решений, оптимизирующих затраты при условиях обеспечения качества покрытий при ионно-плазменной обработке на заданном уровне.

2. Для снижения потребления энергии разработана система прогрева вакуумной камеры, в основу работы которой положены принципиально новые технические решения: основной нагрев теплоносителя энергией, отводимой от источников плазмы; дополнительный подогрев теплоносителя нагревателем небольшой мощности; использование циркуляции теплоносителя позволяют экономить до

80% электроэнергии по сравнению со штатной системой прогрева камеры установки «Булат-6».

3. Применение принципа переменного расхода охлаждающей жидкости в процессе работы энергопотребляющих узлов установки позволяет существенно сократить общее потребление воды и одновременно за счет сокращения времени прогрева отдельных устройств повысить производительность установки. Сравнительные параметры расхода воды в стандартной и модернизированной на основе разработанных решений установках «Булат-6» показывают, что при сохранении всех функциональных возможностей стандартной установки, модернизированная установка позволяет в 2 – 3 раза уменьшить расход охлаждающей воды при одновременном снижении потребления энергии и вспомогательного времени.

4. Охлаждение катода по его боковой поверхности позволяет использовать катоды с запасом материала, в несколько раз превышающем запас материала катода в источнике плазмы установки «Булат-6», и одновременно увеличивает  $\eta_{кон}$  до 90% и выше.

### Список литературы

1. Сисоев, А.Ю. Розробка та дослідження генератора сумішей газів для отримання складнокомпозиційних іонно-плазмових покриттів [Текст]: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.03.07 / А.Ю. Сисоев; Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАИ». – Х., 2011. – 20 с.

2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации установки «Булат-6» [Электронный ресурс] / Заглавие с экрана. Режим доступа <http://bulat-6.narod.ru/1.htm>, свободный. Дата доступа 05.04.2013.

3. Anders, A. Cathodic Arcs – From Fractal Spots to Energetic Condensation [Текст] / A. Anders. – Springer, 2008. – 540 p.

4. Исследование эрозии катода стационарной вакуумной дуги: Препринт ХФТИ 84-6 [Текст] / И.И. Аксенов и др. – М.: ЦНИИатоминформ, 1984. – 23с.

5. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование [Текст] / И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус и др. – К.: Наукова думка, 2012. – 727 с.

6. Аксёнов, И.И. Высокопроизводительная вакуумно-дуговая установка для осаждения покрытий [Текст] / И.И. Аксёнов, В.А. Белоус // ВАНТ, Сер. Физ. радиац. повреждений и радиац. материаловедение (92). – 2008. – № 2. – С. 108 – 118.

7. Потапьевский, А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом [Текст] / А.Г. Потапьевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 240 с.

8. Теория сварочных процессов : учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» [Текст] / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В. В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1988. – 559 с.

9. Гитлевич, А.Е. Электроискровое легирование металлических поверхностей [Текст] / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов и др. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 196 с.

10. Бугрова, А.И. Современное состояние физических исследований в ускорителях с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения [Текст] / А.И. Бугрова, В.П. Ким // В кн. Плазменные ускорители и ионные инжекторы: – М.: Наука, 1984. – С. 107 – 129.

11. Костюк, Г.И. Технологические робототехнические комплексы для электрофизической обработки [Текст] / Г.И. Костюк . – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2005. – 149 с.

12. Институт физики прочности и материаловедения. Установка ионно-плазменного нанесения покрытия «Микра» [Электронный ресурс] / Заглавие с экрана. Режим доступа <http://www.ispms.ru/ru/production/65/>, свободный. Дата доступа 15.04.2013.

13. Амосова, Л.М. Рабочие жидкости для вакуумных насосов [Текст] / Л.М. Амосова, А.Б. Цейтлин, А.Т. Ширяев. – ЦИНТИхимнефтемаш, 1989. – 27 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 08.02.2013

## **Економічні аспекти застосування іонно-плазмових технологій**

У роботі виконано аналіз іонно-плазмових технологій, що використовуються в машинобудуванні для модифікації поверхневих шарів виробів з метою поліпшення їх функціональних характеристик. Аналіз виконаний з точки зору техніко-економічної ефективності використовуваних процесів і обладнання, що застосовується. Розглянуто питання економічної оптимізації роботи установок за рахунок зниження енерго- і матеріаломісткості за умови забезпечення необхідної якості покриттів. Запропоновано ряд нових рішень щодо підвищення техніко-економічних характеристик використовуваного обладнання.

**Ключові слова:** іонно-плазмова обробка, іонно-плазмові технології, температура катода

## **Economic aspects of ion-plasma technologies**

In the analysis of ion-plasma technologies used in engineering for the modification of the surface layers of products to improve their functional characteristics. The analysis is performed in terms of technical and economic efficiency of the processes used and the equipment used. The problems of economic optimization of the systems by reducing energy and materials while ensuring the required quality coatings. A number of new solutions to improve the technical and economic characteristics of the equipment used.

**Keywords:** ion-plasma treatment, ion-plasma technologies, temperature of the cathode.