

Газодинамические характеристики тлеющего разряда при ионном азотировании

Канд. физ.-мат. наук М. Н. Босьяков¹⁾, А. А. Козлов²⁾

¹⁾Физико-технический институт НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Министерство промышленности Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018

Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Ионно-плазменное азотирование в тлеющем разряде – широко используемый метод поверхностного упрочнения в промышленно развитых странах мира. Ионно-плазменное азотирование – наиболее современный и технологичный вид поверхностного упрочнения деталей машин, пресс-форм, штампов и режущего инструмента. Однако в литературе отсутствует подробное описание технических характеристик и функционирования газовакуумной части установок ионного азотирования, что не позволяет оценить расход электроэнергии на работу газовакуумной системы при оценке эффективности использования данного оборудования. Рассмотрены вопросы взаимосвязи газодинамических параметров процесса азотирования (давление и расход газов) и энергетических характеристик тлеющего разряда (плотность тока, напряжение разряда) при ионном азотировании на установках промышленного типа и их влияние на процесс. На основании расчетно-практического моделирования вакуумной системы установки ионного азотирования показано, что для обеспечения независимого управления скоростью откачки и расходом газовой смеси целесообразно использовать вакуумные агрегаты – последовательно соединенные форвакуумный и двухроторный насосы. Это позволяет проводить процессы азотирования в широком диапазоне давлений при возможности обеспечивать большие расходы плазмообразующего газа при низком давлении в случае обработки больших площадей. Выявлены взаимосвязи температуры, давления в камере и плотности тока тлеющего разряда, обеспечивающие его существование в виде аномального. Показано, что чем ниже рабочее давление при проведении процесса, тем большую степень аномальности разряда можно обеспечить при одинаковой температуре садки и тем самым – большую температурную однородность, обеспечивающую равномерность азотированного слоя на всех деталях садки.

Ключевые слова: ионно-плазменное азотирование, газодинамические параметры, вакуумная система, расчетно-практическое моделирование

Для цитирования: Босьяков, М. Н. Газодинамические характеристики тлеющего разряда при ионном азотировании / М. Н. Босьяков, А. А. Козлов // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 5. С. 368–377. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-368-377>

Gas-Dynamic Specifications of Glow Discharge During Ion Nitriding Process

М. N. Bosyakov¹⁾, A. A. Kozlov²⁾

¹⁾The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Ministry of Industry of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Ion-plasma nitriding in glow discharge is a widely used method of surface hardening in the industrialized countries of the world and it is the most modern and technological type of surface hardening of machine parts, molds, dies and cutting tools. However there is no detailed review in the literature of technical characteristics and operation of a gas-vacuum part in ion nitriding units and it does not allow estimating electric power consumption for operation of a gas-vacuum system

Адрес для переписки

Козлов Алексей Александрович
Министерство промышленности Республики Беларусь
пр. Партизанский, 2, корп. 4
220033, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 330-05-31
alex-ett@tut.by

Address for correspondence

Kozlov Aleksey A.
Ministry of Industry of the Republic of Belarus
2, k. 4 Partizansky Ave.,
220033, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 330-05-31
alex-ett@tut.by

while assessing efficiency of the given equipment. The paper considers problems pertaining to relationship of gas-dynamic parameters of the nitriding process (pressure and gas flow rate) and energy characteristics of the glow discharge (current density, discharge voltage) during ion nitriding at industrial plants and their impact on the process. Calculation-practical modeling of a vacuum system for an ion nitriding installation shows that it is advisable to use vacuum units which represent consistently connected forevacuum and two-rotor pumps in order to ensure independent control of a pumping speed and flow rate of the gas mixture. Such approach makes it possible to carry out nitriding processes in a wide range of pressures with the possibility to provide high plasma gas rates at a low pressure, in particular, when processing large areas. The paper has revealed temperature interrelations, chamber pressure and glow discharge current density that ensure its existence in the abnormal form. It has been shown that at lower operational pressure during the process, higher degree of discharge abnormality can be provided at uniform temperature of the batch. Due to this it is possible to attain higher temperature similarity which ensures uniformity of a nitrided layer on all parts of the batch.

Keywords: ion-plasma nitriding, gas-dynamic parameters, vacuum system, calculation-practical modeling

For citation: Bosyakov M. N., Kozlov A. A. (2018) Gas-Dynamic Specifications of Glow Discharge During Ion Nitriding Process. *Science and Technique*. 17 (5), 368–377. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-368-377> (in Russian)

Введение

Одним из наиболее эффективных и широко применяемых в промышленности методов повышения долговечности многих ответственных деталей является их химико-термическая обработка, воздействующая на поверхностные слои металла, т. е. на те слои, в которых концентрируются максимальные напряжения, возникают трещины, развиваются процессы износа и коррозии.

Химико-термическая обработка металлов и сплавов заключается в нагреве и выдержке их при необходимой температуре в активных газовых, жидких или твердых средах, в результате чего изменяются химический состав, структура и свойства поверхностных слоев металлов и сплавов

Ионное-плазменное азотирование (ИПА) в тлеющем разряде, как один из методов химико-термической обработки, – широко используемый метод поверхностного упрочнения в промышленно развитых странах мира. ИПА является наиболее современным и технологичным видом поверхностного упрочнения деталей машин, пресс-форм, штампов и режущего инструмента.

Для реализации процесса упрочняющей обработки методом ионного азотирования в ряде стран (Германия, Австрия, США, Япония, Болгария, Бразилия, Китай, Беларусь и др.) производится высокотехнологичное автоматизированное оборудование – установки ионного азотирования, – которое позволило избавиться от таких недостатков газового азотирования, как длительное время процесса, повышенная хруп-

кость слоя, трудоемкость процесса, нестабильность получаемых результатов [1–5].

Установки ионного азотирования состоят из следующих основных функциональных систем: вакуумной камеры, оснащенной узлом катодного токоввода; вакуумной системы; электрического блока питания плазмы тлеющего разряда с дугогашением; блока подачи рабочих газов; системы контроля и управления, внешних нагревателей, размещаемых либо снаружи вакуумной камеры, либо внутри; системы теплоизоляции. Современное оборудование для ионного азотирования создается с различными типами вакуумных камер: шахтные, колпаковые и комбинированные, состоящие из двух-трех частей для увеличения высоты рабочего пространства. Полезный диаметр камер (размер рабочего пространства) составляет от нескольких дециметров до 2000 мм и более, высота – от 750 до 7500 мм. Оснастка, размещаемая внутри камеры, может быть разнообразной и определяется конфигурацией упрочняемых изделий [1–5].

Следует отметить, что в литературе отсутствует подробное описание технических характеристик и функционирования газовакуумной части установок ионного азотирования, что не позволяет оценить расход электроэнергии на работу газовакуумной системы при оценке эффективности использования данного оборудования. Для любой вакуумной установки важно определить оптимальное значение коэффициента использования насоса (насосов) из экономических соображений. При этом необходимо учитывать, что при увеличении коэффициента использования насоса уменьшаются затраты,

связанные с приобретением и эксплуатацией вакуумных насосов, но увеличиваются расходы на изготовление трубопроводов и арматуры.

Расчет вакуумной системы

Технологическими факторами, влияющими на эффективность ионного азотирования, являются температура процесса, продолжительность насыщения, давление, состав и расход рабочей газовой смеси. На установках ионного азотирования можно проводить как азотирование, так и карбонитрирование, для чего в состав рабочей смеси газов должен входить углеродсодержащий газ – метан, ацетилен либо пропан-бутан. Для создания тлеющего разряда вокруг поверхности детали можно использовать переменный и постоянный (либо пульсирующий) ток. Мощность блоков питания рассчитывается в соответствии с габаритами рабочего пространства камер и в настоящее время составляет от 20 до 450 кВт·А [6].

Вакуумная система установок ионного азотирования состоит из форвакуумного насоса (золотникового либо пластинчато-роторного) либо откачного агрегата, включающего последовательно соединенные форвакуумный насос и двухроторный насос (насос Рутса), вакуумной магистрали и соответствующих клапанов – электромагнитных либо электропневматических. Время первичной откачки камеры (так называемый неуставившийся режим работы) зависит от производительности откачного агрегата (насоса), объема вакуумной камеры установки, длины вакуумной магистрали и ее диаметра и, как правило, составляет порядка 10–40 мин. Для изменения давления в камере варьируется производительность откачной системы (если такая возможность имеется) либо изменяется расход газовой смеси, используемой для азотирования.

В течение всего процесса азотирования давление регулируется путем поддержания необходимого расхода азотсодержащего газа. Для получения газовой среды, в которой проводится азотирование, либо смешивают соответствующие баллонные газы, либо подводят смесь из специальных газосмесительных установок.

Следует отметить, что детальное рассмотрение взаимосвязи газодинамических парамет-

ров камеры установки (давление газа, расход газов) и энергетических характеристик тлеющего разряда (плотность тока, напряжение разряда, длительность импульса напряжения и паузы между импульсами) в литературе отсутствует. В [6–9] приводятся лишь данные по максимальному расходу газа для конкретной модели установки и диапазон рабочих давлений (как правило, это диапазон давлений от 100 до 800 Па).

Поэтому рассмотрение взаимосвязи данных параметров является важным фактором в понимании процесса ионного азотирования и определении его экономических показателей.

Цикл азотирования в тлеющем разряде включает несколько стадий: вакуумирование камеры до некоторого предельного давления, после чего на катод-садку подается напряжение и между катодом и анодом возбуждается тлеющий разряд: начинается процесс очистки и разогрева садки – это неуставившийся режим откачки, который является вязкостным режимом, поскольку длина свободного пробега молекул газа λ много меньше диаметра трубопровода d ($\lambda \leq d$).

Длина откачной магистрали зависит от конфигурации участка ионного азотирования, т. е. от взаимного расположения вакуумного насоса и рабочей камеры. На практике следует стремиться к обеспечению минимального расстояния между камерой и насосом, а диаметр откачной магистрали выбирать исходя из планируемых величин давления в камере на стадии выдержки и расхода плазмообразующего газа. Следовательно, давление в камере, расход газа и параметры откачной магистрали (длина магистрали и диаметр трубы) находятся в жесткой взаимосвязи. Поэтому необходимо иметь в виду все эти параметры при назначении режима обработки реальной садки деталей на установке промышленного типа, где азотируемая площадь деталей может составлять десятки квадратных метров.

Во время откачки вакуумной системы давление газа в ней уменьшается, и одновременно с этим меняются режимы течения газа в трубопроводах. Вязкостный режим течения наблюдается при низком вакууме, когда выполняется условие

$$Kn = \frac{\lambda}{d} \leq 5 \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где Kn – критерий Кнудсена [10], что соответствует

$$\bar{p}d \geq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}, \quad (2)$$

p – давление, Па; d – диаметр трубопровода, м.

Из этого выражения можно определить величину предельного давления в камере (при известном диаметре трубопровода), при котором режим течения газа будет вязкостным. Тем самым будет обеспечиваться максимальная проводимость магистрали и, следовательно, минимальное время откачки камеры.

Проводимость круглого трубопровода при вязкостном режиме течения газа обратно пропорциональна его длине и коэффициенту динамической вязкости газа, прямо пропорциональна среднему давлению в трубопроводе и четвертой степени радиуса трубопровода [10]. Для воздуха при $T = 293 \text{ К}$ и $\eta = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Н/(м}^2 \cdot \text{с)}$ эту формулу можно преобразовать к виду

$$U_{\text{тв}} = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (3)$$

где d, l – в м; p – в Па; $U_{\text{тв}}$ – в $\text{м}^3/\text{с}$; p_1, p_2 – давление в начале и конце трубопровода.

В рабочем режиме, на стадии изотермической выдержки в зависимости от площади обрабатываемых деталей и марки стали требуется обеспечить расход газа на уровне 100 л/ч и более при рабочем давлении то 80 до 500 Па – это стационарный режим откачки. Таким образом, откачная система установки должна обеспечивать, с одной стороны, минимальное время откачки камеры, с другой – поддержание необходимого давления в достаточно широких пределах расходов рабочих газов.

Производительность откачной системы установки – «насос + вакуумная магистраль» – определяется скоростью откачки насоса (или насосов) и пропускной способностью вакуумной магистрали. Таким образом, регулировка давления в камере может осуществляться тремя способами: изменением расхода плазмообразующего газа, изменением скорости откачки насоса (если таковая возможность имеется) или

изменением пропускной способности магистрали. Если известны длина магистрали, диаметр трубопровода и величина предельного давления, то скорость откачки (производительность) насоса можно вычислить из следующего выражения [10]:

$$S_{\text{н}} = \frac{2,3V \lg p_1 / p_2}{(t_2 - t_1) - \frac{V}{C} \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} \right)}, \quad (4)$$

где V – объем вакуумной камеры, м^3 ; p_1, p_2 – начальное и конечное давление, Па (10^5); t_1 – начало откачки, с; t_2 – время откачки, с; $C = 1360d^4/l$ – константа, зависящая от геометрии трубопровода.

Таким образом, по известным данным относительно параметров откачной магистрали и объема вакуумной камеры рассчитывается необходимая скорость откачки насоса и соответственно выбирается насос с нужной быстротой откачки. Следующим этапом расчета вакуумной системы является определение эффективной скорости откачки в стационарном режиме – на стадии изотермической выдержки. Исходя из закона сохранения потока газа, можно определить взаимосвязь рабочего давления в камере, эффективной скорости откачки вакуумного насоса и расхода газа:

$$p_{\text{атм}} G_{\text{газа}} = p_{\text{раб}} S_{\text{эф}}, \quad (5)$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление (при нормальных условиях это $1013 \cdot 10^2$ Па); $G_{\text{газа}}$ – объемный расход газа при нормальных условиях (л/ч либо $\text{м}^3/\text{с}$); $p_{\text{раб}}$ – рабочее давление в камере (Па); $S_{\text{эф}}$ – эффективная скорость откачки системы «насос + вакуумная магистраль» ($\text{м}^3/\text{с}$ либо л/с).

Расчетные значения необходимой эффективной скорости откачки для поддержания нужного рабочего давления в камере при различных расходах газа (л/ч) приведены на рис. 1.

Как видно из представленных данных, повышение расхода газа при фиксированном давлении в камере требует увеличения скорости откачки, что налагает определенные требования на выбор откачного агрегата – вакуумного насоса и параметров откачной магистрали.

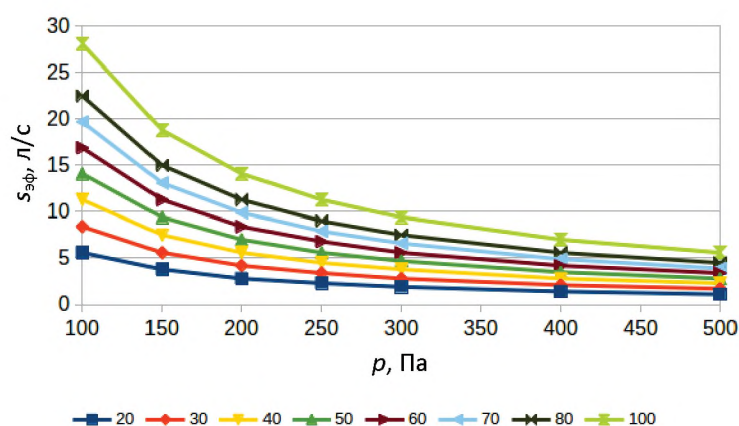


Рис. 1. Взаимосвязь эффективной скорости откачки, расхода газа и давления в камере

Fig. 1. Interrelation of pumping speed, gas consumption and chamber pressure

Из основного уравнения вакуумной техники [10]

$$\frac{1}{S_{\text{эф}}} = \frac{1}{S_{\text{н}}} + \frac{1}{U_{\text{маг}}}, \quad (6)$$

где $S_{\text{н}}$ – скорость откачки насоса; $U_{\text{маг}}$ – производительность вакуумной магистрали.

Откуда следует, что для обеспечения расхода газа на уровне 100 л/ч при давлении 100 Па (рис. 1) эффективная скорость откачки должна быть на около 28 л/с, а номинальная скорость откачки насоса – более 30 л/ч, поскольку коэффициент использования механических насосов имеет величину от 0,7 до 0,9 в зависимости от количества элементов в вакуумной магистрали между рабочей камерой и насосом [10].

Поскольку скорость откачки форвакуумных насосов является постоянной величиной в достаточно большом интервале рабочих давлений [10, 11], суммарная производительность системы будет определяться пропускной способностью магистрали.

Если известны максимальный расход рабочих газов и диапазон рабочих давлений, то из (3) и (4) можно рассчитать необходимую пропускную способность вакуумной магистрали и, следовательно, выбрать нужные характеристики магистрали – диаметр и длину, учитывая условие (2). Как было рассмотрено ранее, диапазон рабочих давлений при ионном азотировании составляет 100–800 Па, а расход рабочих газов – от 20 до 100 л/ч. В соответствии с расчетными данными, представленными на рис. 1,

этим параметрам соответствует эффективная скорость откачки в интервале от 3 до 30 л/с. Следовательно, в большинстве случаев будет достаточно вакуумного насоса с производительностью на уровне 20 л/с, например, АВЗ-20Д, ADVAVAC-75 и др. Но при этом необходимо иметь вакуумную магистраль с внутренним диаметром и длиной такими, чтобы эффективная скорость откачки была близка к скорости откачки вакуумного насоса. Расчетные значения эффективной скорости откачки системы «насос – магистраль» для магистрали длиной 2000 мм и различным внутренним диаметром (при этом скорость откачки насоса при нималась на уровне 20 л/с) представлены на рис. 2.

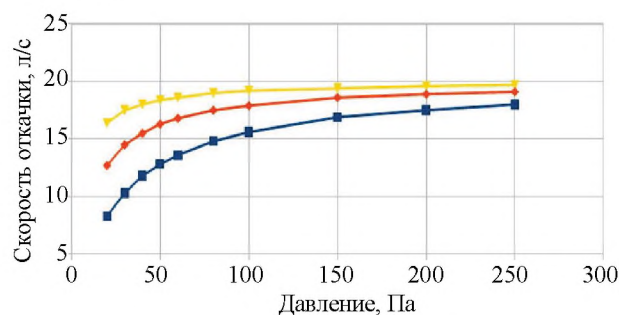


Рис. 2. Эффективная скорость откачки системы «насос – магистраль» при различных давлениях в зависимости от диаметра откачной магистрали: треугольники – диаметр 51 мм; ромбы – 40 мм; квадраты – 32 мм

Fig. 2. Efficient pumping speed of “pump – main line” system at various pressure according to diameter of pumping main line: triangles – diameter 51 mm; rhombs – 40 mm; squares – 32 mm

Представленные данные показывают, что увеличение диаметра откачной магистрали минимизирует влияние магистрали на эффективную скорость откачки.

Первичная откачка камеры проводится, как правило, до такого предельного давления, чтобы режим течения газа был вязкостным, и обеспечивалась максимальная пропускная способность магистрали. Так, для приведенных диаметров трубопроводов предельное давление в соответствии с (2) составляет для диаметра: 32 мм – 42 Па, 40 мм – 33 Па и 51 мм – 26 Па. Время откачки до некоторого предельного давления $p_{\text{пред}}$ определяется объемом камеры $V_{\text{кам}}$ и скоростью откачки насоса $S_{\text{н}}$ из (4) как:

$$t_{\text{отк}} = 2,3 \left(\frac{V_{\text{кам}}}{S_{\text{н}}} \right) \lg \left(\frac{1,013 \cdot 10^5}{p_{\text{пред}}} \right) - \frac{V_{\text{кам}}}{C} \left(\frac{1}{p_{\text{пред}}} - \frac{1}{1,013 \cdot 10^5} \right). \quad (7)$$

Как видно из приведенных на рис. 2 данных, при расчете времени откачки в качестве $S_{\text{эф}}$ можно использовать уменьшенную на 10–12 % скорость откачки насоса. Расчеты по (7) показывают, что время откачки вакуумной камеры с объемом 2 м^3 до предельного давления 30 Па составляет порядка 12–15 мин, а камеры объемом 5 м^3 – 30–35 мин, что является несущественным при выдержке, например, в течение 14–16 ч.

Однако при работе на высоком давлении (250–800 Па) для обеспечения баланса «расход газа – давление» при скорости откачки порядка 20 л/с (рис. 1) необходимо существенно увеличивать расход газа, что, с точки зрения обеспечения необходимого количества химически активной среды (атомарного азота), является совершенно неоправданным и приводит к значительному перерасходу газов. Более оптимальный вариант – управление скоростью откачки путем использования двух насосов – форвакуумного, типа упомянутых выше, и двухроторного, типа ДВН-50 (НВР-200), соединенных последовательно. В таком случае изменением частоты вращения ротора насоса ДВН-50 можно управлять скоростью откачки вакуумного агрегата, состоящего из двух насосов. Зависимость скорости откачки вакуумного агрегата,

состоящего из насосов ADVAVAC-75 и ДВН-50, от частоты вращения электродвигателя насоса ДВН-50 представлена на рис. 3.

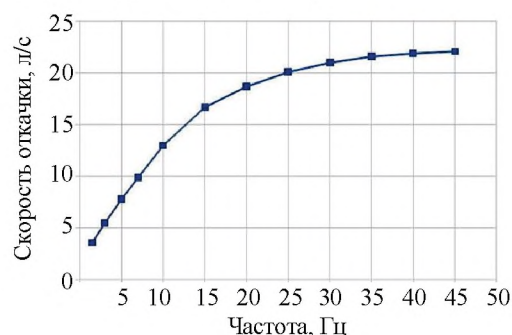


Рис. 3. Частотная зависимость скорости откачки вакуумного агрегата ADVAVAC-75 + ДВН-50

Fig. 3. Frequency dependence of pumping speed for vacuum unit ADVAVAC-75 + ДВН-50

Как видно из представленной зависимости, путем изменения частоты вращения ротора можно в широких пределах управлять скоростью откачки вакуумного агрегата и эффективной скоростью откачки системы «насос – вакуумная магистраль», что обеспечивает независимое управление расходом газа и скоростью откачки, и следовательно, давлением в камере.

Таким образом, на основании проведенного расчетного моделирования вакуумных параметров установки ионного азотирования выявлено, что для обеспечения независимой управляемости расходом газа и давлением в камере необходимо использовать откачной агрегат, состоящий из последовательно соединенных форвакуумного (пластинчато-роторного либо золотниково-го) и двухроторного насосов типа ДВН (или аналогичных). Использование частотного преобразователя для вариации частоты вращения двухроторного насоса обеспечивает достаточно широкий диапазон управления эффективной скоростью откачки. Это позволяет проводить процессы азотирования как при низком давлении и большом расходе газа, так и при высоком давлении в камере при относительно небольших расходах плазмообразующего газа. Все эти факторы в целом обеспечивают широкие пределы параметров процесса азотирования по величине площади обрабатываемых деталей, минимизацию расхода активных газов и электроэнергии для питания вакуумных насосов, поскольку с ростом скорости откачки

насоса увеличивается соответственно и мощность электродвигателя.

Выбор рабочего давления

Таким образом, мы подошли к моменту выбора рабочего давления при проведении процесса ионного азотирования. С одной стороны, давление определяется параметрами насоса, откачной магистрали и расхода газа, с другой – оно должно быть таким, чтобы тлеющий разряд существовал в «аномальном» виде. Это значит, что при увеличении прикладываемого напряжения ток должен возрастать, и весь катод-садка должен быть покрыт свечением разряда.

Тлеющий разряд постоянного или пульсирующего тока, используемый для ионного азотирования, обязательно должен быть «аномального» типа, т. е. рабочий диапазон «ток – напряжение» должен быть в области 2, где имеет место возрастающая вольт-амперная характеристика (рис. 4) [12].

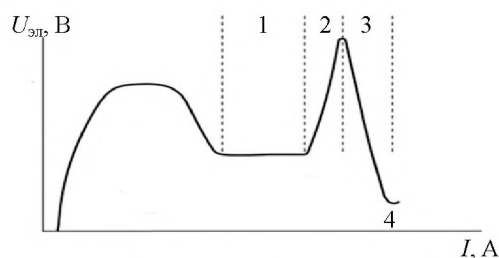


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика тлеющего разряда

Fig. 4. Current-voltage characteristic of glow discharge

В свою очередь, вольт-амперная характеристика разряда зависит от рабочего давления в камере. Как было показано в [13], для обеспечения необходимой температуры садки на стадии выдержки затрачивается определенная мощность разряда, которая не зависит от давления в камере [14], а определяется теплообменом садки со стенками камеры. Аномальный режим тлеющего разряда предполагает определенную взаимосвязь плотности разрядного тока и катодного падения потенциала как функции давления. Эта зависимость для ряда газов показана на рис. 5 [15].

Как следует из приведенных данных, в достаточно большом интервале значений j/p^2 величина катодного падения потенциала незначительно отличается от значений нормального

катодного падения (на графике рис. 5 обозначено кружками). А это означает, что при определенных величинах давления и тока разряд может существовать в двух видах: аномальном и частично нормальном, т. е. увеличение прикладываемого напряжения будет приводить лишь к росту тока и при определенных сочетаниях «ток – давление» на части садки разряд может вообще отсутствовать, что является недопустимым.

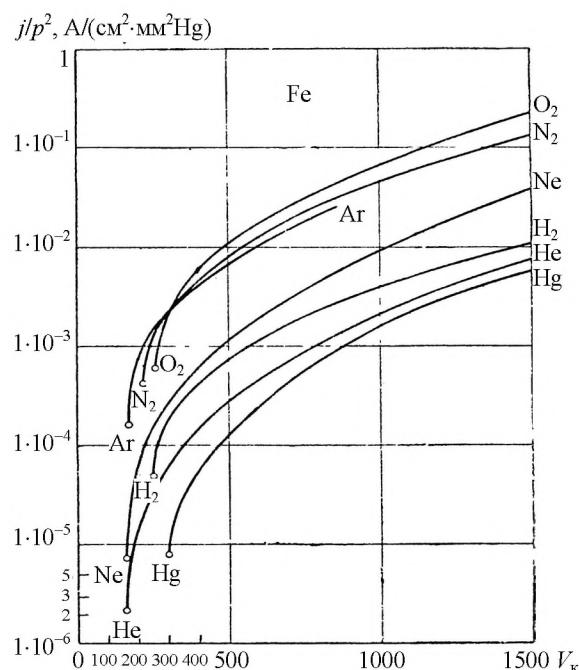


Рис. 5. Зависимость относительной плотности тока тлеющего разряда с железным катодом от катодного падения потенциала

Fig. 5. Dependence of relative current density of glow discharge with iron cathode on cathode potential fall

Рассмотрим типичные значения параметров процесса ионного азотирования на промышленном оборудовании. Например, при обработке садки деталей площадью 24 м² (рис. 6) при температуре 540 °С ток разряда составляет 85 А, напряжение – 380 В.

Какой диапазон давлений обеспечит существование тлеющего разряда в форме аномального, чтобы вся садка была покрыта разрядом? Если считать величину катодного падения потенциала на уровне 85 % от приложенного напряжения [15], то для рассматриваемого случая величина $U_{кпп}$ будет 323 В. Из данных рис. 5 для азота значению $U_{кпп} = 323 В$ соответ-

стствует приведенная плотность тока $j/p^2 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ A}/(\text{см}^2 \cdot \text{мм}^2 \text{ рт. ст.})$. Из этого значения можно вычислить приведенное давление, т. е. давление, соответствующее температуре катода-садки $T = 540^\circ \text{C}$ [16]:

$$p_{\text{прив}} = \frac{p_{\text{изм}} \cdot 300}{T_{\text{кат}}}, \quad (8)$$

где $p_{\text{изм}}$ – давление в камере, измеренное в холодной зоне, Па; $T_{\text{кат}}$ – температура катода-садки, К.



Рис. 6. Садка деталей общей площадью 24 м^2

Fig. 6. Shrinking of parts with total area of 24 м^2

Для приведенных условий обработки $j = 3,54 \text{ A}/\text{м}^2$, $T_{\text{кат}} = 813 \text{ K}$ расчетное значение $p_{\text{изм}} = 130 \text{ Па}$. Следовательно, повышение давления сверх данного значения может привести к тому, что j/p^2 уменьшится и, как это видно из зависимостей на рис. 5, величина катодного падения потенциала будет близка к нормальному. А это может привести к тому, что на части садки разряд может не существовать и, следовательно, не будет обработки.

Полученные в [13] расчетные значения $p_{\text{эл}}$ позволяют определять диапазон рабочих давлений при разогреве и выдержке, чтобы, во-первых, обеспечивалось плотное «облегание» разрядом поверхности изделий и получение равномерного азотированного слоя, и во-вторых, разряд оставался бы аномальным, т. е. чтобы выполнялось условие $J_{\text{разр}} \geq J_{\text{н}}^{\text{N}_2}(P, T)$, где $J_{\text{разр}}$ – плотность разрядного тока; $J_{\text{н}}^{\text{N}_2}$ – нормальная плотность тока для азота – компонента

рабочей смеси, имеющего максимальное значение $J_{\text{н}}$ при конкретных значениях давления в камере и температуры садки. Значения $J_{\text{н}}$ для азота [14], рассчитанные по формуле, применяемой для разрядов с плоскими электродами [17], приведены на рис. 7:

$$J_{\text{н}} = 4 \left(\frac{p}{p_{\text{н}}} \cdot \frac{T_{\text{н}}}{T} \right)^2, \quad (9)$$

где p – рабочее давление; $p_{\text{н}} = 133 \text{ Па}$; $T_{\text{н}} = 300 \text{ K}$; T – температура газа в катодной области разряда, которая принималась равной температуре катода.

Как видно из представленных данных, с одной стороны, по мере повышения температуры в камере плотность тока, обеспечивающая существование разряда в виде аномального при одинаковом давлении, снижается. С другой, при одинаковой температуре рост давления в камере приводит к повышению плотности тока, что необходимо учитывать при выборе режима обработки, как это приведено в примере выше.

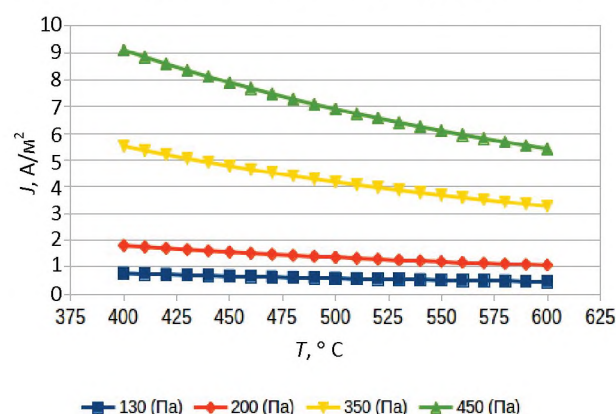


Рис. 7. Расчетные значения нормальной плотности тока при различных давлениях в зависимости от температуры катода

Fig. 7. Calculation values of normal current density at various pressure according to cathode temperature

Приведенные расчетные данные показывают, что повышение давления в камере при постоянной температуре садки приводит к росту плотности тока, поэтому при высоком рабочем давлении существует возможность тлеющему разряду существовать в двух формах – нормальной и аномальной, если катодное падение потенциала близко к нормальному. Согласно

но [15], величина нормального катодного падения потенциала в случае железного катода для азота составляет 215 В, для водорода – 250 В, для аргона – 165 В. Приведенные в [13] данные по сравнению реальной плотностью тока при обработке различных по массе и площади поверхности садок при температуре $T = 530\text{ }^{\circ}\text{C}$ с расчетной для данной температуры показали, что чем ниже рабочее давление, тем большую «степень аномальности» разряда $K = J_{\text{эксп}}/J_{\text{расч}}$ можно обеспечить при одинаковой температуре садки (табл. 1).

Таблица 1

Значения экспериментальных
и рассчитанных величин J
Experimental and calculated values J

p , Па	$J_{\text{эксп}}$, А/м ²	$J_{\text{расч}}$, А/м ²	$K = J_{\text{эксп}}/J_{\text{расч}}$
194	3,36	1,15	2,92
194	3,40	1,15	2,96
196	4,30	1,16	3,70
197	3,60	1,20	3,00
200	4,26	1,30	3,28
313	5,18	3,10	1,67
318	5,68	3,20	1,78
342	5,10	3,70	1,38
362	5,00	4,20	1,19

Таким образом, чем выше рабочее давление при азотировании, тем больше шансов разряду быть частично «аномальным» и частично «нормальным», когда не вся поверхность садки может быть охвачена разрядом, особенно ее верхняя часть. Все эти факторы необходимо учитывать при разработке конкретных режимов азотирования на промышленном оборудовании: а именно – при конкретной мощности разряда на стадии выдержки плотность тока должна быть минимум в два раза больше значения нормальной плотности тока при данном давлении. Это гарантированно обеспечит существование разряда в виде аномального на всей поверхности катода-садки.

ВЫВОДЫ

1. Показана взаимосвязь основных газодинамических параметров установки ионного азотирования – скорости откачки, расхода газа и давления в камере.

2. На основании расчетно-практического моделирования вакуумной системы установки ионного азотирования показано, что для обеспечения независимого управления скоростью откачки и расходом газовой смеси целесообразно использовать вакуумные агрегаты – последовательно соединенные форвакуумный и двухроторный насосы. Это позволяет проводить процессы азотирования в широком диапазоне давлений при относительно небольших расходах плазмообразующего газа, что в целом обеспечивает минимизацию расхода активных газов и электроэнергии для питания вакуумных насосов.

3. Выявлены взаимосвязи температуры, давления в камере и плотности тока, обеспечивающие существование разряда в виде аномального. Показано, что чем ниже рабочее давление при проведении процесса, тем большую степень аномальности разряда можно получить при одинаковой температуре садки и тем самым большую температурную однородность, а также соответственно равномерность азотированного слоя на всех деталях садки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлин, Е. В. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Е. В. Берлин, Н. Н. Коваль, Л. А. Сейдман. М.: Техносфера, 2012. 464 с.
2. Пастух, И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. 364 с.
3. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. М.: Изд-во МГТУ имени Баумана, 1999. 400 с.
4. Теория и технология азотирования. / Ю. М. Лахтин [и др.]. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
5. Grun, R. Pulsed DC-Glow Discharge for PLasma Heat Treatment / R. Grun // Plasma Heat Treatment: International IFHT Seminar. Senlis France: PYC Edition, 1987. P. 417–423.
6. Puls-Plasma Nitriding Units – www.nitron.com.br.
7. Elektropuls Plasma-Nitrieren von Stahlen Mit Nidriger Anlablemperatur // Fachber Huttenprax Metallweiterverarb. 1987. Vol. 25, No 12. P. 1227.
8. RUBIG Driving Success [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.rubig.com/>.
9. Plasma Nitriding Equipment [Electronic resource] // Ionotech LTD. Mode of access: www.ionotech.net/ru/.
10. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника / Л. Н. Розанов. М.: Высш. шк., 2007. 320 с.

11. Вакуумная техника / К. Е. Демихов [и др.]; под общ. ред. К. Е. Демихова, Ю. В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
12. Азотирование в пульсирующей плазме [Электронный ресурс] / ELTROPULS. Режим доступа: http://eltropuls.ru/plasma_nitriding.
13. Босяков, М. Н. Энергетические параметры процессов ионного азотирования на промышленном оборудовании / М. Н. Босяков, А. А. Козлов // Доклады БГУИР. 2013. Т. 73, № 3. С. 76–82.
14. Босяков, М. Н. Выбор режима упрочняющей обработки на установках ионного азотирования промышленного типа / М. Н. Босяков, А. Н. Моисеенко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы VIII МНТК. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. Кн. 2. С. 50–58.
15. Энгель, А. Физика и техника электрического разряда в газах / А. Энгель, М. Штенбек. Т. 2. ОНТИ-НКТП, 1936. 384с.
16. Голубев, В. С. Тлеющий разряд повышенного давления / В. С. Голубев, С. В. Пашкин. М.: Наука, 1990. 335 с.
17. Параметры области катодного падения потенциала самостоятельного нормального тлеющего разряда в гелии при атмосферном давлении / В. И. Архипенко [и др.] // Физика плазмы. 2002. Т. 28, № 10. С. 930–938.
5. Grun R. (1987) Pulsed DC–Glow Discharge for Plasma Heat Treatment. *Plasma Heat Treatment, International IFHT Seminar*. Senlis, France, PYC Edition, 417–423.
6. *Puls-Plasma Nitriding Units*. Available at: www.nitron.com.br.
7. Elektropuls Plasmanitrieren von Stählen mit Niedriger Anblattemperatur. *Fachber. Huttenprax Metallweiterverarb.*, 1987, 25 (12), 1227 (in German).
8. *RUBIG Driving Success*. Available at: <https://www.rubig.com/>
9. Plasma Nitriding Equipment. *Ionotech LTD*. Available at: www.ionotech.net/ru/.
10. Rozanov L. N. (2007) *Vacuum Technique*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 320 (in Russian).
11. Demikhov K. E., Panfilov Yu. V., Nikulin N. K., Avtonomova I. V. (2009) *Vacuum Technique*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 590 (in Russian).
12. Nitriding in Pulsing Plasma. *ELTROPULS*. Available at: http://eltropuls.ru/plasma_nitriding.
13. Bosyakov M. N., Kozlov A. A. (2013) Energetic Parameters of Ion Nitriding Processes in Industrial Equipment. *Doklady BGUIR*, 73 (3), 76–82 (in Russian).
14. Bosyakov M. N., Moiseenko A. N. (2016) Choice of Hardening Treatment Mode for Industrial ion Nitriding Units. *Sovremennye Metody i Tekhnologii Sozdaniya i Obrabotki Materialov: Materialy VIII Mezhdunar. Nauch.-Tekh. Konf. Kn. 2* [Modern Methods and Technologies for Development and Treatment of Materials. Proceedings of 8th International Scientific and Technical Conference. Book 2.] Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 50–58 (in Russian).
15. Engel A., Shtenbek M. (1936) *Physics and Technology of Electric Discharge in Gases. Vol. 2*. Moscow, United Scientific and Technical Publishing House of People's Commissariat of Heavy Industry. 384 (in Russian).
16. Golubev V. S., Pashkin S. V. (1990) *Glow Discharge of Increased Pressure*. Moscow, Nauka Publ. 335 (in Russian).
17. Arkhipenko V. I., Zgirovskii S. M., Kirillov A. A., Simonchik L. V. (2002) Cathode Fall Parameters of a Self-Sustained Normal Glow Discharge in Atmospheric-Pressure Helium. *Plasma Physics Reports*, 28 (10), 858–865. <https://doi.org/10.1134/1.1513839/>.

Поступила 20.04.2018

Подписана в печать 22.06.2018

Опубликована онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Berlin E. V., Koval N. N., Seidman L. A. (2012) *Plasma Chemical-Thermal Treatment of Steel Parts' Surface*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 464 (in Russian).
2. Pastukh I. M. (2006) *Theory and Practice of Non-Hydrogen Nitriding in Glow Discharge*. Kharkov. National Science Center, Kharkov Institute of Physics and Technology. 364 (in Russian).
3. Arzamasov B. N., Bratukhin A. G., Eliseev Yu. S., Panaioti T. A. (1999) *Ionic Chemical-Thermal Treatment of Alloys*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 400 (in Russian).
4. Lakhtin Yu. M., Kogan Ya. D., Shpis G., Bemer Z. (1991) *Theory and Technology of Nitriding*. Moscow, Metallurgiya Publ. 320 (in Russian).

Received: 20.04.2018

Accepted: 22.06.2018

Published online: 28.09.2018