

# **ВЛИЯНИЕ ВАКУУММЕТРИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО- ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ И ЖЕСТКОСТИ**

**В. С. Нисс<sup>1</sup>, Ю. Г. Алексеев<sup>2</sup>, А. Ю. Королев<sup>2</sup>, А. Э. Паршут<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь, тел.: +375 17 296-67-22, e-mail: niss@metolit.by*

*<sup>2</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,  
Минск, Беларусь, тел./факс: +375 17 292-25-98,  
e-mail: korolyov@metolit.by*

Для выполнения финишных операций (удаление заусенцев и полирование) при производстве изделий малого сечения и жесткости разработан метод электролитно-плазменной обработки в условиях вакуумметрического давления. В машино-, приборостроении, при производстве изделий медицинского назначения существует широкий перечень изделий, финишная обработка которых физико-техническими методами затруднена из-за особенностей геометрии, а также из-за применения специальных материалов, характеристики которых не должны меняться в процессе обработки от силового воздействия или теплового действия тока. К таким изделиям относятся, например, изделия с малой площадью поперечного сечения и изделия малой жесткости.

В случае, когда площадь поперечного сечения обрабатываемого изделия существенно мала по сравнению с общей площадью обрабатываемой поверхности, происходит нагрев материала из-за теплового действия проходящего через изделие тока, поскольку плотность тока на обрабатываемой поверхности достигает 1–2 А/см<sup>2</sup>. Нагрев приводит к окислению поверхности изделия, изменению структуры и свойств материала и, в ряде случаев, к неисправимому браку. Существует ряд ответствен-

ных изделий, для которых в результате финишной обработки не допускается изменение прочностных, акустических характеристик, изменение микроструктуры и фазового состава поверхности. Это, прежде всего, компоненты различных датчиков, детали ультразвуковых приборов, изделия медицинского назначения.

При обработке изделий, обладающих малой жесткостью, обычно возникают трудности, связанные с закреплением их на оснастке и обеспечением надежного токоподвода. Такие изделия характеризуются малой площадью сечения при относительно большой площади обрабатываемой поверхности (например, изделия из листов и лент толщиной менее 0,2 мм, полученные штамповкой или лазерной резкой, сетчатые и плетеные изделия). При монтаже на оснастку такие изделия часто деформируются из-за большого распорного усилия элементов оснастки, необходимого для обеспечения надежного токоподвода. Другой проблемой, возникающей при обработке изделий с малой жесткостью, является малая площадь контакта оснастки с изделием, что вызывает подгорание и плавление контактной поверхности.

Разработанный метод обеспечивает качественную финишную электролитно-плазменную обработку изделий малого сечения и жесткости без изменения их начальной формы изделия, с сохранением исходной структуры и характеристик материала. Данный метод заключается в уменьшении давления среды ниже атмосферного, при котором обеспечивается существенное снижение удельной мощности, необходимой для пленочного кипения и поддержания стабильной парогазовой оболочки вокруг обрабатываемого изделия.

Целью работы является анализ влияния вакуумметрического давления на толщину парогазовой оболочки и исследование влияния вакуумметрического давления на массообменные процессы при электролитно-плазменной обработке поверхностей.

При атмосферном давлении основное влияние на процесс образования и поддержание парогазовой оболочки вокруг обрабатываемого изделия оказывают такие параметры электролитно-плазменной обработки, как температура электролита, глубина

погружения, рабочее напряжение, концентрация электролита. Основным параметром, который оказывает влияние на производительность обработки и стабильность парогазовой оболочки, является температура электролита [1], которая обычно поддерживается в диапазоне от 70 до 95 °С.

Уменьшение давления среды в процессе электролитно-плазменной обработки приводит к изменению условий формирования парогазовой оболочки вокруг изделия, поскольку ее возникновение основано на процессе пленочного кипения. Известно, что с уменьшением давления температура кипения жидкостей (в том числе электролитов) понижается. На рис. 1 в качестве примера представлена зависимость температуры кипения воды от давления среды [2].

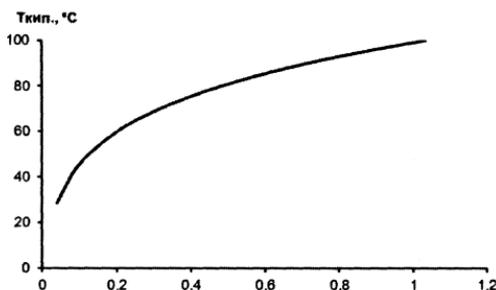


Рис. 1. Влияние давления среды на температуру кипения воды

Для создания вакуума использовали водокольцевой вакуумный насос ВВН-6, обеспечивающий по сравнению с насосом ЗНВР-1Д более широкий диапазон значений давления в рабочей камере при рабочих значениях температуры электролита. Насосы такого типа специально предназначены для откачки воздуха, газов, паров и парогазовых смесей. Исследования рабочего диапазона вакуумметрического давления проводили при значениях температуры электролита от 20 до 90 °С. Рабочее напряжение при этом составляло 260–300 В.

На рис. 2 представлена экспериментально полученная зависимость, характеризующая влияние температуры электролита на величину вакуумметрического давления, достигаемую с

помощью водokolцевого насоса до наступления кавитации. Объем рабочей камеры составлял 15 л при объеме электролита в ванне 11 л. Данные получены при обработке плоского образца из стали 12X18H10T общей площадью 8 см<sup>2</sup>.

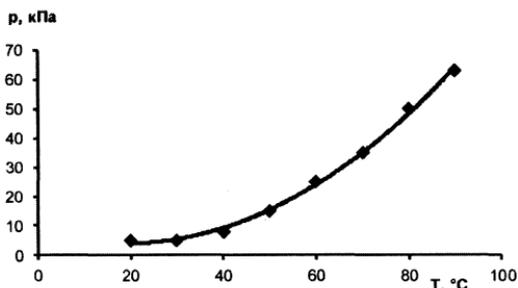


Рис. 2. Влияние температуры электролита на изменение величины достигаемого давления

Работа вакуумной камеры с насосом ВВН-6 при приведенных значениях вакуумметрического давления обеспечивает постоянную надежную откачку парогазовой смеси в процессе электролитно-плазменной обработки. Полученные экспериментальные данные являются основой для разработки процессов электролитно-плазменной обработки изделий малой жесткости и малого сечения.

Снижение плотности тока и, соответственно, массового съема при электролитно-плазменной обработке в условиях вакуумметрического давления является следствием увеличения толщины парогазовой оболочки в результате снижения на нее общего давления (рис. 3). Давление на парогазовую оболочку состоит из давления среды, гидростатического давления и давления  $\Delta p$  (1), создаваемого пондеромоторными силами – силами взаимодействия поверхности анода и электролита [3].

$$\Delta p = \frac{\epsilon \epsilon_0 U^2}{2l^2}, \quad (1)$$

где  $l$  – толщина парогазовой оболочки, м;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость парогазовой оболочки;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная ( $8,85 \cdot 10^{-5}$  Ф/м);  $U$  – рабочее напряжение, В.

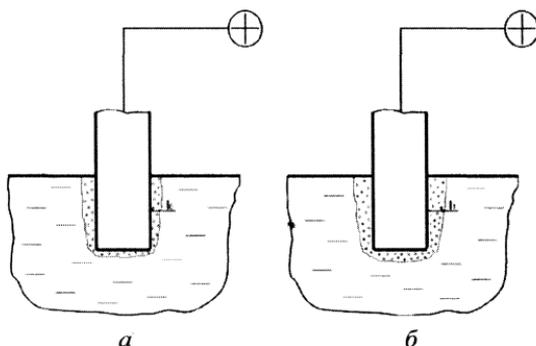


Рис. 3. Изменение толщины парогазовой оболочки в условиях вакуумметрического давления: *а* – при атмосферном давлении; *б* – при вакуумметрическом давлении

Поскольку гидростатическое давление при уменьшении давления среды не меняется, то изменение размеров парогазовой оболочки происходит вследствие воздействия на нее давления среды и давления, создаваемого силами пондеромоторного взаимодействия. При увеличении толщины парогазовой оболочки в результате снижения давления среды ниже атмосферного силы пондеромоторного взаимодействия ослабевают. Это видно из выражения (1).

Исходя из баланса давлений, действующих на парогазовую оболочку, логично предположить, что рост толщины парогазовой оболочки в результате изменения давления среды приводит к соответствующему уменьшению давления, вызываемого силами пондеромоторного взаимодействия. Таким образом, справедливо равенство (2):

$$\Delta p_0 = \Delta p_1 + P_{\text{вак}}, \quad (2)$$

где  $\Delta p_0$  – давление на парогазовую оболочку, создаваемое силами пондеромоторного взаимодействия при атмосферном давлении, Па;  $\Delta p_1$  – давление на парогазовую оболочку, создаваемое силами пондеромоторного взаимодействия при вакуумметрическом давлении, Па;  $P_{\text{вак}}$  – величина вакуумметрического давления, Па.

Представим  $\Delta p_0$  и  $\Delta p_1$  в виде:

$$\Delta p_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2l_0^2}; \Delta p_1 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2l_1^2}. \quad (3)$$

Тогда выражение (2) запишется в виде:

$$\frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2l_0^2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2l_1^2} + p_{\text{вак}}. \quad (4)$$

После преобразований получим:

$$\frac{l_1}{l_0} = \sqrt{1 + \frac{2p_{\text{вак}} l_1^2}{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}}; \quad (5)$$

$$l_1 = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2 l_0^2}{\varepsilon \varepsilon_0 U^2 - 2p_{\text{вак}} l_0^2}}. \quad (6)$$

Анализ уравнения (5) показывает, что отношение толщины парогазовой оболочки при вакуумметрическом давлении к толщине при атмосферном давлении всегда больше единицы, т. е.  $l_1$  всегда больше, чем  $l_0$ .

Для установления влияния вакуумметрического давления на массообменные процессы на границе электролит–анод исследовались зависимости массового съема и плотности тока от величины вакуумметрического давления и рабочего напряжения. Исследования проводили при значениях вакуумметрического давления 0 кПа; –20 кПа; –40 кПа и –60 кПа. Температура электролита поддерживалась в диапазоне 70–73 °С. Рабочее напряжение составляло 240 В; 260 В; 280 В и 300 В.

В качестве образцов использовались плоские заготовки из стали 20Х13 толщиной 0,3 мм с общей площадью поверхности 8 см<sup>2</sup>. Масса образцов до и после обработки измерялась на аналитических весах Pioneer Ohaus 214РА с дискретностью 0,0001 г. Для измерения силы тока использовались токовые клещи UNIT.

На основании полученных экспериментальных данных построены зависимости, характеризующие изменение плотности тока и массовой скорости съема (масса удаленного металла

с единицы площади за единицу времени) от величины вакуумметрического давления при различных значениях рабочего напряжения (рис. 4, 5).

Полученные зависимости имеют линейный характер. При изменении вакуумметрического давления от 0 до  $-60$  кПа плотность тока в зависимости от рабочего напряжения уменьшается с  $0,39-0,61$  А/см<sup>2</sup> до  $0,13-0,31$  А/см<sup>2</sup>, скорость массового съема уменьшается с  $1,92-2,97$  мг/см<sup>2</sup>мин до  $0,41-0,93$  мг/см<sup>2</sup>мин. Очевидно, что представленные зависимости коррелируют друг с другом. Таким образом вакуумметрическое давление одновременно со снижением плотности тока приводит к снижению скорости массового съема, что является вполне логичным, поскольку к процессам электролитно-плазменной обработки так же, как и к классическим электрохимическим процессам, применяем закон Фарадея [4].

Перспективная экспраполяция зависимостей, представленных на рис. 4 и 5, показывает, что достижение вакуумметрического давления значений около  $-80...-90$  кПа приведет к снижению плотности тока и скорости массового съема до нулевых значений, т. е. к прекращению процесса электролитно-плазменной обработки. Прекращение процесса в таком случае будет связано с закипанием электролита, при котором образец оказывается окруженным не парогазовой оболочкой, а сплошной оболочкой из пены, которая не обладает проводимостью. Поскольку ток в электрохимической системе не протекает, то на границе электродит-анод в таком случае отсутствуют массообменные процессы. Чем выше значение рабочего напряжения, тем меньше величина допустимого вакуумметрического давления, при котором сохраняется процесс электролитно-плазменной обработки.

**Выводы.** 1. Увеличение вакуумметрического давления одновременно со снижением плотности тока приводит к снижению скорости массового съема, что связано с действием закона Фарадея. Так, при изменении вакуумметрического давления от 0 до  $-60$  кПа плотность тока в зависимости от рабочего напряжения уменьшается с  $0,39-0,61$  до  $0,13-0,31$  А/см<sup>2</sup>, скорость массового съема уменьшается с  $1,92-2,97$  до  $0,41-0,93$  мг/см<sup>2</sup>мин.

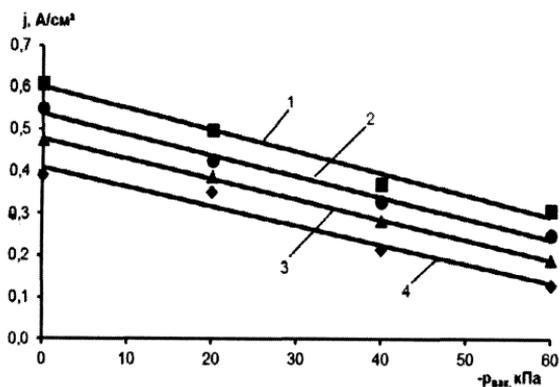


Рис. 4. Влияние вакуумметрического давления на изменение плотности тока при различных значениях рабочего напряжения: 1 – 240 В; 2 – 260 В; 3 – 280 В; 4 – 300 В

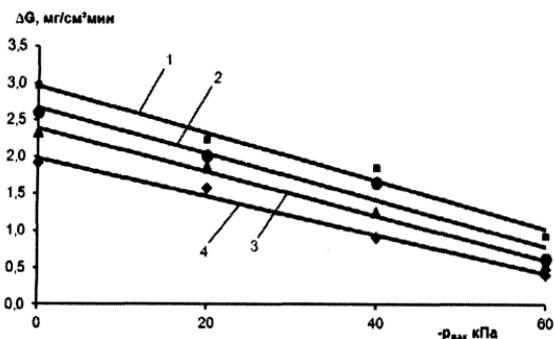


Рис. 5. Влияние вакуумметрического давления на изменение массовой скорости съема при различных значениях рабочего напряжения: 1 – 240 В; 2 – 260 В; 3 – 280 В; 4 – 300 В

2. Достижение вакуумметрического давления значений  $-80...-90$  кПа приводит к снижению плотности тока и скорости массового съема до нулевых значений, т. е. к прекращению процесса электролитно-плазменной обработки. Прекращение процесса в этом случае связано с закипанием электролита, при котором образец оказывается окруженным не парогазовой оболочкой, а сплошной оболочкой из пены, которая не обладает проводимостью.

## Литература

1. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Вашенко, А. Я. Каменев. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 232 с.
2. <http://www.sci.aha.ru/ALL/b17.htm>
3. Синькевич, Ю. В. Электроимпульсное полирование деталей из коррозионностойких и углеродистых конструкционных сталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / Ю. В. Синькевич. – Минск, 1998. – 163 с.
4. Королев, А. Ю. Технология получения сложнопрофильных длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра электролитно-плазменной обработкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / А. Ю. Королев. – Минск, 2013. – 229 с.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

**И. Г. Олешук, И. Л. Поболь, М. Н. Босяков, Д. В. Жук,  
О. И. Назарова, А. Н. Моисеенко**

*Физико-технический институт.*

*Минск, Беларусь, тел. +375 17 263-51-25, e-mail: oleshuk@fut.by*

**Введение.** Большая часть изделий ведущих зарубежных фирм, изготавливаемых из инструментальных сталей (сверла, метчики, штампы, пресс-формы, литевая оснастка, матрицы, пуансоны, развертки, фрезы, прошивки, протяжки, долбяки, резцы и др. ), подвергается поверхностному упрочнению методом ионно-плазменного азотирования (ИПА). ИПА нашло широкое применение для увеличения долговечности штампового инструмента из сталей 5ХНМ, 4Х4ВМФС, 3Х2В8, Х12М, Х12Ф1 и др.

Стали для штампов испытывают интенсивное ударное нагружение, периодический нагрев и охлаждение, т. е. циклические ударные и тепловые нагрузки. Основные причины потери работоспособности штампов для горячего деформирования – износ и смятие отдельных участков поверхности инструмента и появление трещин или сетки трещин. Поэтому к сталям этого