

**МОДЕЛЬ РАЗМЕРНОГО СЪЕМА МАТЕРИАЛА
ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

*Канд. техн. наук АЛЕКСЕЕВ Ю. Г., инженеры КОРОЛЁВ А. Ю., ПАРШУТО А. Э.,
канд. техн. наук, доц. НИСС В. С.*

Белорусский национальный технический университет

Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) широко применяется для очистки поверхности, снижения шероховатости и снятия заусенцев на изделиях, изготовленных из различных металлических материалов. ЭПО является безопасной и более производительной технологией по сравнению с альтернативными видами (электрохимическая, механическая обработка).

Сущность процесса заключается в следующем. Вокруг поверхности обрабатываемой детали-анода, погруженной в электролит, происходит локальное пленочное вскипание электролита и образование стабильной парогазовой оболочки (ПГО). Сформировавшаяся таким образом оболочка из пара и газа отжимает электролит от поверхности детали и значительно увеличивает электрическое сопротивление в цепи деталь – электролит. При этом сила тока резко уменьшается и напряжение источника питания почти полностью прикладывается к образовавшейся парогазовой оболочке. Таким образом, из-за высокой локальной напряженности электрического поля возникает частичная ионизация газа с протеканием электрического тока через парогазовую оболочку в виде импульсных и диффузных электрических разрядов [1].

Экспериментальные исследования показали, что при увеличении продолжительности ЭПО возможно применение технологии для точной размерной обработки деталей вращения. Размерная ЭПО не требует создания сложных схем обработки и осуществляется в обычной ванне-катоде без использования электродов – инструментов специальной формы. При этом в отли-

чие от размерной электрохимической обработки не требуется осуществлять прокачку электролита через межэлектродное пространство.

Производительность размерного съема при ЭПО можно охарактеризовать скоростью анодного растворения металла, выражаемой в линейных (мм/мин) или в объемных (мм³/мин) единицах. При обработке деталей вращения целесообразно использовать объемные единицы.

Разработка модели размерного съема материала. Для количественной оценки размерного съема в процессе ЭПО установим связь интенсивности размерной ЭПО с технологическими параметрами процесса и геометрией обрабатываемой детали вращения. В качестве детали вращения рассмотрим цилиндр.

Согласно закону Фарадея масса (или объем) вещества ΔV , растворенного на электроде, прямо пропорциональна электрическому заряду, прошедшему через электролит. Применительно к процессам электрохимической обработки, в том числе и для ЭПО, закон Фарадея можно представить в следующем виде [2]:

$$\Delta V = k_V \eta_a I t, \quad (1)$$

где k_V – объемный электрохимический эквивалент вещества, см³/(А·мин); η_a – коэффициент выхода по току (для процессов ЭПО составляет 0,215); I – сила тока, проходящего через электролит, А; t – продолжительность обработки, мин.

Из закона следует, что с повышением силы тока, проходящего через обрабатываемую поверхность за одинаковый промежуток времени,

размерный сьем металла увеличивается. Соответственно чем выше плотность тока, тем интенсивнее идет процесс обработки. Поэтому плотность тока является величиной, определяющей интенсивность размерного съема металла в процессе ЭПО.

Плотность тока в свою очередь определяется технологическими параметрами процесса ЭПО (напряжение, температура электролита, глубина погружения, концентрация электролита), а также формой обрабатываемой поверхности. Замечено, что обработка на выступающих частях заготовок, таких как острые кромки, заусенцы, закругления, идет значительно интенсивнее, чем на плоских и тем более вогнутых участках. Причем скорость съема металла зависит от радиуса кривизны: чем меньше радиус кривизны, тем интенсивнее сьем. Это явление затрудняет расчеты процессов формообразования цилиндрических поверхностей методом размерной ЭПО, поскольку при такой обработке происходит постепенное уменьшение радиуса цилиндра и изменение скорости съема.

Определим зависимость, характеризующую влияние кривизны обрабатываемой цилиндрической поверхности на плотность тока. Для этого рассмотрим анод, на котором присутствуют прямо- и криволинейный участки (рис. 1). Толщина ПГО на прямолинейном участке l_0 , на криволинейном l_1 .

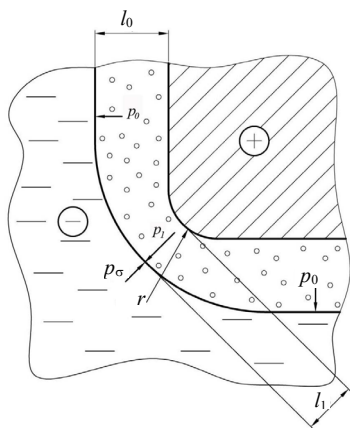


Рис. 1. Расчетная схема

Будем считать, что гидростатическое давление, действующее на парогазовую оболочку вокруг всех участков анода, одинаково. Систему анод – ПГО – электролит будем рассматривать как плоский конденсатор. На плоском участке внешнее гидростатическое давление

компенсируется давлением p_0 , создаваемым силой воздействия поверхности анода с поверхности электролита, которое определяется по формуле [3]

$$p_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}{2l_0^2}, \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость ПГО; ε_0 – электрическая постоянная; U – напряжение, приложенное к аноду.

На криволинейном участке гидростатическое давление компенсируется давлением p_1

$$p_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}{2l_1^2} \quad (3)$$

и давлением p_σ , создаваемым силой поверхностного натяжения, которое для поверхности с наружным радиусом r составит

$$p_\sigma = \frac{\sigma}{r}, \quad (4)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Давление p_σ прижимает ПГО к поверхности анода, т. е. действует в направлении, противоположном p_1 . Поэтому толщина ПГО на криволинейном участке поверхности будет меньше, чем на прямолинейном $l_1 < l_0$.

Исходя из сказанного выше справедливо равенство

$$p_0 = p_1 - p_\sigma. \quad (5)$$

Подставим в равенство (5) значения p_0 , p_1 и p_σ из формул (2)–(4). После преобразований получим уравнение

$$\frac{1}{2l_1^2} = \frac{1}{2l_0^2} + \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0 U^2 r}. \quad (6)$$

Рассмотрим участок прямолинейной поверхности площадью ΔS_0 , через который протекает ток силой I_0 . Плотность тока на прямолинейном участке j_0 составит

$$j_0 = \frac{I_0}{\Delta S_0}. \quad (7)$$

Воспользовавшись законом Ома, (7) можно записать в виде

$$j_0 = \frac{U}{R_0 \Delta S_0}, \quad (8)$$

где R_0 – сопротивление парогазовой оболочки на прямолинейном участке.

Выразим сопротивление ПГО через удельное сопротивление парогазовой оболочки ρ

$$R_0 = \rho \frac{l_0}{\Delta S_0}. \quad (9)$$

После подстановки (9) в выражение (8) и преобразования получим

$$j_0 = \frac{U}{\rho l_0}. \quad (10)$$

Плотность тока на криволинейном участке j_1 можно представить аналогично (10)

$$j_1 = \frac{U}{\rho l_1}. \quad (11)$$

Выразив из (10) и (11) значения l_0 и l_1 и подставив их в (5), после преобразования получим

$$j_1 = \sqrt{j_0^2 + \frac{2\sigma}{\rho^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}. \quad (12)$$

Анализ уравнений (10) и (11) позволяет утверждать, что произведение плотности тока и толщины парогазовой оболочки является равной величиной для любого участка поверхности. Назовем эту величину k . Тогда

$$k = j_0 l_0 = j_1 l_1 = \frac{U}{\rho}. \quad (13)$$

Из (13) выразим удельное сопротивление через напряжение и коэффициент k и подставим в выражение (12). Получим

$$j_1 = \sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2 \sigma}{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}. \quad (14)$$

Данная формула описывает влияние радиуса кривизны обрабатываемой поверхности и рабочего напряжения на плотность тока и позволяет определить плотность тока вокруг цилиндриче-

ской поверхности на любой стадии размерной обработки.

Величина j_0 характеризует плотность тока на плоской поверхности при равных с цилиндрической поверхностью условиях обработки (температура электролита, рабочее напряжение, глубина погружения). Ее значение определяется из полученных экспериментальным путем номограмм в зависимости от напряжения, температуры и глубины погружения (рис. 2).

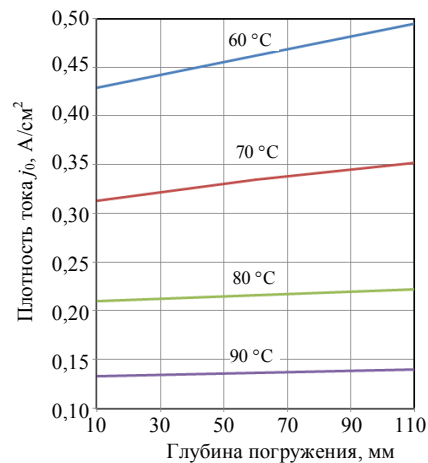


Рис. 2. Зависимость j_0 от температуры электролита и глубины погружения при рабочем напряжении 280 В

Для экспериментальной проверки зависимости (14) проводили измерение рабочего тока при обработке цилиндрических образцов из стали 12Х18Н9 длиной 50 мм диаметром 0,5; 1,0; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5; 4,0 и 6,0 мм. Обработку осуществляли в 4%-м растворе сульфата аммония при рабочем напряжении 280 В. Температура электролита составляла (80 ± 2) °С. Глубина погружения образцов в электролит – 20 мм. Измерения силы тока проводили с помощью цифрового амперметра, последовательно включенного в цепь.

По измеренным значениям силы тока была рассчитана плотность тока для каждого из образцов. На основании полученных данных построена зависимость, характеризующая влияние радиуса кривизны на плотность тока (рис. 3). Экспериментальная зависимость подтверждает данные, полученные расчетным методом по формуле (14). При расчетах величина j_0 согласно вышеприведенной номограмме (рис. 2) принималась равной 0,21 А/см², а также использо-

вался коэффициент $m = \frac{2k^2\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$, состоящий из постоянных величин. Его экспериментально установленное значение составляет $8,02 \cdot 10^3$.

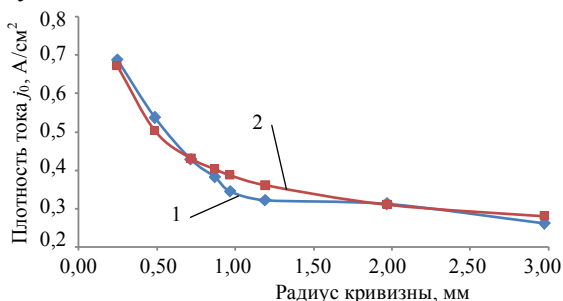


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная зависимости плотности тока от радиуса кривизны: 1 – экспериментальные; 2 – расчетные данные

Из формулы (1) следует, что объемная скорость размерного съема при обработке составляет

$$v = Ik_V \eta_a \quad (15)$$

Заменяя в (15) силу тока I произведением плотности тока j_1 на площадь поверхности цилиндра, после преобразований получим

$$v_{\text{цил}} = 2\pi r L k_V \eta_a \sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2\sigma}{U^2 \epsilon\epsilon_0 r}}, \quad (16)$$

где L – длина цилиндра.

Выведем формулу для расчета продолжительности размерной обработки. Пусть за промежуток времени dt с цилиндрической поверхности радиусом r удаляется бесконечно малый слой металла толщиной dr .

Объемную скорость размерного съема можно представить как отношение объема удаляемого слоя к промежутку времени, за который этот слой удаляется:

$$v_{\text{цил}} = \frac{2\pi r L dr}{dt} \quad (17)$$

После подстановки (17) в (16) и преобразования получим

$$dt = \frac{1}{k_V \eta_a} \frac{dr}{\sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2\sigma}{U^2 \epsilon\epsilon_0 r}}} \quad (18)$$

Общее время, необходимое для съема металла с цилиндра с исходным радиусом R_0 до конечного радиуса R_1 , определится по формуле

$$t = \frac{1}{k_V \eta_a} \int_{R_1}^{R_0} \frac{dr}{\sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2\sigma}{U^2 \epsilon\epsilon_0 r}}} \quad (19)$$

ВЫВОДЫ

1. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования размерного съема показывают, что плотность тока является величиной, определяющей интенсивность последнего.

2. Плотность тока зависит от технологических параметров процесса ЭПО и уменьшается с ростом температуры и повышением рабочего напряжения. С увеличением глубины погружения плотность тока возрастает.

3. Фактором, оказывающим основное влияние на плотность тока на размерный съем при ЭПО цилиндрических поверхностей, является радиус кривизны. Зависимость плотности тока от радиуса кривизны носит гиперболический характер. При уменьшении радиуса кривизны значительно увеличивается плотность тока. При температуре электролита 80°C , глубине погружения 20 мм и рабочем напряжении 280 В плотность тока для цилиндра диаметром 6 мм составляет $0,28 \text{ А/см}^2$, а для цилиндра диаметром 1 мм – $0,50 \text{ А/см}^2$.

4. Полученные математические зависимости позволяют выполнять расчеты при разработке технологических процессов формообразования точных деталей вращения методом ЭПО. Результаты работы были использованы при создании технологии изготовления цилиндрических многоступенчатых ультразвуковых волноводов для разрушения тромбов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Способ** электрохимической обработки: а. с. 1314729 СССР / В. К. Станишевский, А. Э. Паршутто, А. А. Кособуцкий // Бюл. изобр. – 1985. – № 17.
2. **Справочник** по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В. А. Волосатова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с.
3. **Шубин, А. С.** Курс общей физики / А. С. Шубин. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1976. – 480 с.

Поступила 21.11.2011