

тивность сглаживания поверхности деталей из углеродистых конструкционных сталей, являются время обработки и высота исходного микропрофиля.

2. Предложенная математическая модель в совокупности с ранее проведенными исследованиями позволяет с высокой достоверностью прогнозировать в процессе обработки обеспечение заданного качества поверхности, управлять величиной съема металла и скоростью сглаживания, что позволит широко использовать ЭИП для обработки прецизионных деталей.

Список литературы: 1. Синькевич Ю.В. Электроимпульсное полирование деталей из коррозионностойких и углеродистых конструкционных сталей: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.03.01; 05.02.08 / Ю.В. Синькевич; Белорус. государств. политехн. акад. – Мн., 1998 – 23 с. 2. Грилихес С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойства металлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 232 с. 3. Исследование параметров шероховатости поверхности стальных деталей после электроимпульсного полирования и нанесения тонкопленочных покрытий / Головкина Е.Я., Синькевич Ю.В., Иващенко С.А., Фролов И.С. // Извест. ВУЗов СССР. Сер. Машиностроение. – 1989, – Вып. 6. – С. 134 – 138. 4. H.Dagnall M.A. Exploring surface texture. – Great Britain.: Rank Taylor Hobson, 1980. – 170 p.

Сдано в редакцию 4.05.06

Рекомендовано д.т.н., проф. Тока А.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ

Синькевич Ю.В., Янковский И.Н. (БНТУ, Минск, Беларусь)

The physical and mathematical model of anode process featuring behavior of an electrolyte in a steam gas shell for four modes is offered: switching, a heating plasma of an electrolyte, electro-magnet hydrodynamic and discharge of an electrolyte.

Введение

Анодный и катодный процессы в электролитах имеют ряд существенных различий в природе явлений, протекающих около активного электрода, под которым понимают электрод с меньшей площадью поверхности. Анодный процесс сопровождается растворением металла, а катодный при определенных напряжениях электрического тока – эрозией. Поскольку анодное растворение металла приводит к сглаживанию поверхности, то для оптимизации существующих и разработки новых технологий электрополирования научно-практический интерес представляют исследования анодного процесса и сопровождающих его физико-химических явлений.

Анализ анодных эффектов при увеличении напряжения от 0 до 550 В показал, что процесс последовательно проходит через пять режимов (стадий): классический электролиз, коммутационный, нагрев электролитной плазмой, электрогидродинамический и электролитно-разрядный [1]. Высокое качество поверхности можно обеспечить только в режимах электролиза (электрохимическое полирование (ЭХП)) и электрогидродинамическом (электроимпульсное полирование (ЭИП)). По сравнению с ЭХП ЭИП обладает рядом существенных преимуществ, одним из которых является использование в качестве электролита экологически безопасных водных растворов солей низкой концентрации. Широкое про-

мышленное внедрение ЭИП требует разработки научно обоснованной теории процесса ЭИП.

Целью настоящей работы является разработка физико-математической модели процесса ЭИП. В статье приведены некоторые результаты экспериментальных и теоретических исследований физических явлений, протекающих в парогазовой оболочке (ПГО), отделяющей поверхность анода от электролита.

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе исследований были построены и изучены вольт-амперные характеристики (ВАХ) анодного процесса при плавном изменении напряжения $0 - 360 - 0$ В, а также построены зависимости динамического сопротивления от приложенного напряжения. Для четырех режимов (коммутационного, нагрева электролитной плазмой, электрогидродинамического и электролитно-разрядного) было установлено наличие на ВАХ гистерезиса и участков с отрицательным динамическим сопротивлением. На основании этого можно сделать вывод о том, что при анодной обработке при повышенных напряжениях могут быть выполнены условия баланса фаз и амплитуд, необходимые и достаточные для возникновения генерации, которой можно объяснить спонтанно возникающую неустойчивость процесса для всех режимов, кроме электролиза.

На следующем этапе были выполнены осциллографические и частотные исследования электрогидродинамического режима с помощью запоминающего осциллографа С8-13 и частотомера ЧЗ-34. Экспериментальные данные были сняты с безиндуктивного сопротивления величиной $3,75 \cdot 10^{-3}$ Ом. Они показали наличие в электрической цепи наряду с постоянной составляющей высокочастотных колебаний тока (рис. 1 и 2) с частотой $10^5 \dots 10^6$ Гц, амплитуда которых изменялась в достаточно широких пределах, а частота оставалась стабильной для конкретных условий эксперимента и изменялась при изменении последних.

Постоянную составляющую в электрическом токе большинство исследователей [2 и др.] связывают с возникновением в ПГО газового электрического разряда типа тлеющего, по поводу же переменной составляющей общего мнения у них нет до настоящего времени. Большинство авторов [2 др.] связывают ее с возникновением в ПГО наряду с тлеющим разрядом искровых разрядов. В.С.Мурас [3] предложил механизм прохождения электрического тока через ПГО исключительно по электролитным мостикам, замыкающим ПГО. Однако, не смотря на наличие большого количества экспериментальных данных, свидетельствующих о приближении отдельных участков электролита в ПГО к аноду [4 и др.], замыкании электролитом разрядного промежутка [5] и переносе электролита через него [6], большинство исследователей [4, и др.] отвергают возможность контакта электролита с анодом через ПГО по электролитным мостикам. Они объясняют это тем, что в режиме нагрева электролитной плазмой высокая температура анода приводит к мгновенному испарению и отбрасыванию от анода приближающегося к нему мостика, а также высокой инертностью электролита. Учитывая полученные нами данные, а также то, что в электрогидродинамическом режиме температуры анода и электролита одинаковы, а инертность жидкости в условиях высоковольтного электрического разряда не препятствует протеканию сверхбыстрых гидродинамических процессов [7], мы предлагаем следующую физическую модель прианодной зоны (рис. 3), которая справедлива как для ЭИП, так и для режимов коммутационного, нагрева электролитной плазмой и электролитно-разрядного. Для случая, когда радиус кривизны поверхности анода значительно превышает толщину ПГО (обработка плоской поверхности), систему электролит – ПГО – поверхность анода можно рассматривать как плоский конденсатор. Напряженность электрического поля в ПГО достигает значений $10^6 \dots 10^8$ В·м⁻¹. За счет высокой концентрации электрической энергии в ПГО протекают интенсивные физико-электрохимические процессы.

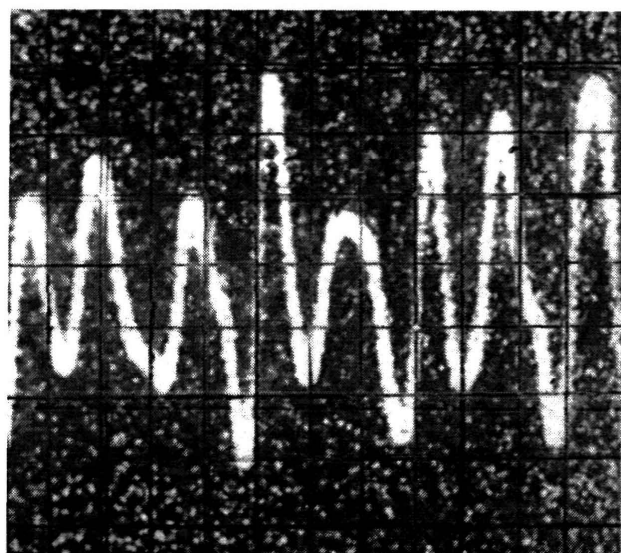


Рис. 1. Осциллограмма переменной составляющей электрического тока (0,5 мкс/дел; 5,33 А/дел)

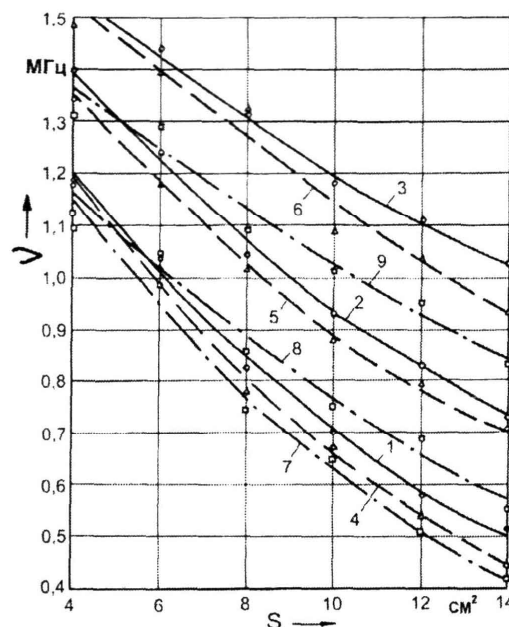


Рис. 2. Зависимость частоты переменного тока от площади образца, напряжения и температуры электролита:

$U=280$ В, $t=60^{\circ}\text{C}$ (1); $t=70^{\circ}\text{C}$ (2); $t=80^{\circ}\text{C}$ (3);
 $U=310$ В, $t=60^{\circ}\text{C}$ (4); $t=70^{\circ}\text{C}$ (5); $t=80^{\circ}\text{C}$ (6);
 $U=340$ В, $t=60^{\circ}\text{C}$ (7); $t=70^{\circ}\text{C}$ (8); $t=80^{\circ}\text{C}$ (9)

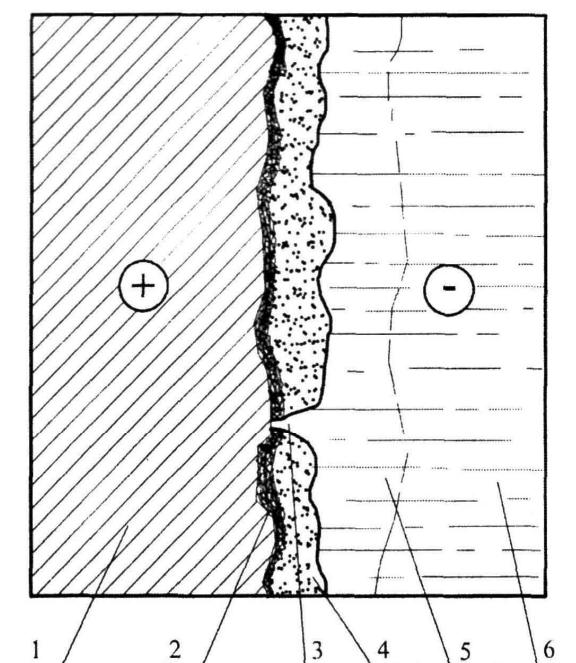


Рис. 3. Модель прианодной зоны:
 1 — анод; 2 — продукты анодного растворения; 3 — электролитный мостик; 4 — ПГО;
 5 — пограничный слой электролита;
 6 — электролит

ПГО представляет собой крайне неравновесную систему, в которой присутствуют ионы электролита, кислорода, водорода и гидроксильной группы, имеющие энергию порядка 2,5...40 эВ. Это приводит к возникновению в ПГО низкотемпературной священной плазмы. Возникающая в системе электролит – ПГО – анод электростатическая пондеромоторная сила втягивает электролит в ПГО в области случайных неоднородностей электрического поля, образуя микроскопические электролитные мостики, которые при замыкании ПГО взрываются из-за выделяющейся в них в соответствии с законом Джоуля - Ленца тепловой энергии. Образование электролитных мостиков наиболее вероятно на микровыступах поверхности анода из-за повышенной на них напряженности электрического поля. В результате микровзрыва образуется ударная волна, воздействующая на поверхности анода и электролита в ПГО. Как следствие, в зонах 5 и 6 (рис. 3) возможно возникновение кавитации. Под действием ударной

волны и кавитации разрушается слой шламовых продуктов в непосредственной близости от микровзрыва. В электролит из ПГО поступают продукты анодного растворения, представляющие собой в случае стального анода мелкодисперсные частицы углерода, карбиды металлов, коагулят окислов и гидроокислов металлов. Представляя собой полупроводниковые соединения и находясь в непосредственной близости от ПГО, эти частицы могут являться центрами эмиссии электронов и создавать дополнительные псевдокатоды. Разность потенциалов между частицей шлама и поверхностью анода может оказаться достаточной для возникновения искрового разряда. Этим объясняется тот факт, что искровые разряды в ПГО начинают появляться при определенных значениях напряжения электрического тока, с ростом которого их интенсивность возрастает. Визуально это проявляется в виде микро всплеск на фоне общего свечения ПГО.

Согласно предложенной модели, электрический ток в прианодной зоне протекает в результате электрических разрядов типа тлеющего и искровых, а также замыкания ПГО электролитными мостиками. Эта модель дает логичные объяснения физическим явлениям, сопровождающим анодный процесс при повышенных напряжениях.

Поскольку ПГО предопределяет интенсивность физико-электрохимических анодных процессов, оценим ее толщину. Сила пондеромоторного взаимодействия поверхностей анода и электролита без учета ее направления определяется из выражения:

$$F = \frac{\partial W}{\partial l}, \quad (1)$$

где W – энергия электрического поля в ПГО; l – толщина ПГО.

В свою очередь, энергию электрического поля можно определить из соотношения:

$$W = \omega \cdot V = \omega \cdot S \cdot l = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot S \cdot l}{2} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot S}{2 \cdot l}, \quad (2)$$

где ω – плотность энергии электрического поля в ПГО; V – объем ПГО; S – площадь поверхности одной обкладки конденсатора (площадь анода); ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – электрическая постоянная; E – напряженность электрического поля в ПГО; U – падение напряжения на ПГО.

Подставив в (1) значение W из (2) и взяв частную производную, получим:

$$F = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot S}{2 \cdot l^2}, \quad (3)$$

Эта сила вызывает дополнительное давление электролита ΔP_1 на ПГО, которое можно определить из соотношения:

$$\Delta P_1 = \frac{F}{S} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2}{2 \cdot l^2}, \quad (4)$$

С другой стороны, поведение электролитного мостика в ПГО можно описать с помощью уравнения Бернулли, которое для данного случая примет вид:

$$\Delta P_1 = \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (5)$$

где ρ – плотность электролита; v – скорость движения электролитного мостика.

Толщину ПГО можно определить как :

$$l = v \cdot \tau = v \cdot T = \frac{v}{\nu}, \quad (6)$$

где τ – время прохождения электролитным мостиком ПГО; T – средний период колебаний переменной составляющей электрического тока; ν – частота переменной составляющей электрического тока.

Преобразовав формулу (6) с учетом (4) и (5), получим теоретическую зависимость для расчета толщины ПГО для случая ЭИП плоской поверхности:

$$l = \sqrt{T \cdot U \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\rho}}} = \sqrt{\frac{U}{\nu} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\rho}}} \quad (7)$$

На рис. 4 представлены зависимости толщины ПГО от рабочего напряжения, рассчитанные по формуле (7) при $\nu=0,2 \cdot 10^6$ Гц (кривая 1), $\nu=0,5 \cdot 10^6$ Гц (кривая 2) и $\nu=1,0 \cdot 10^6$ Гц (кривая 3). Полученные теоретические данные хорошо согласуются с экспериментальными [3,4].

Многими исследователями было обнаружено влияние кривизны обрабатываемой поверхности на толщину ПГО. Оценим это влияние.

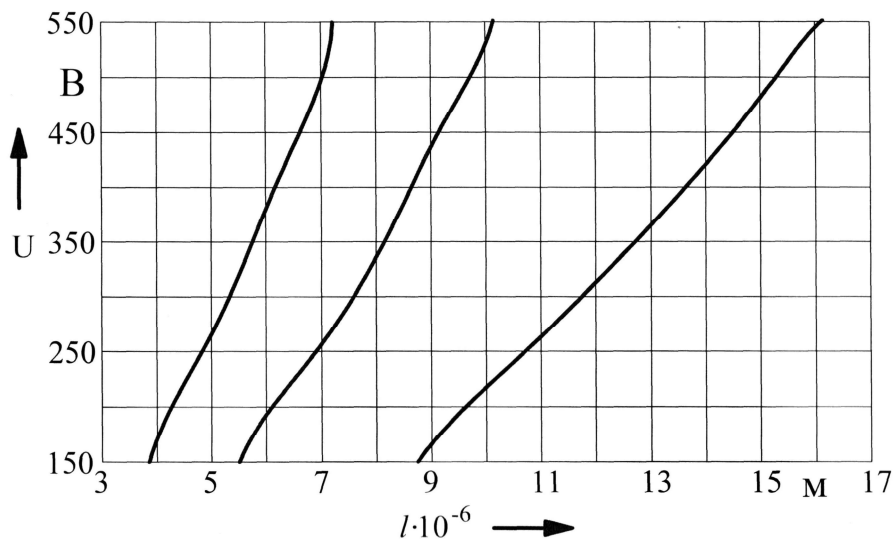


Рис. 4. Расчетная зависимость толщины ПГО от напряжения

Давление в ПГО над плоской поверхностью с учетом (4) определяется соотношением

$$P_1 = P_0 + P_c + \Delta P_1 = P_0 + P_c + \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2}{2 \cdot l^2}, \quad (8)$$

где P_0 – внешнее давление; P_c – давление слоя электролита.

Согласно закону Лапласа, давление в ПГО над криволинейной поверхностью может быть определено по формуле:

$$P_2 = P_0 + P_c + \Delta P_2 + P_R, \quad (9)$$

где ΔP_2 – дополнительное давление электролита на ПГО в области кривизны; P_R – дополнительное давление, вызванное кривизной поверхности электролита на границе раздела ПГО – электролит.

В соответствии с (4):

$$\Delta P_2 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2}{2 \cdot l_1^2}, \quad (10)$$

где l_1 – толщина ПГО в области кривизны поверхности анода.

Дополнительное давление P_R определяется по формуле:

$$P_R = \sigma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (11)$$

где σ – поверхностное натяжение электролита; R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны поверхности электролита на границе раздела ПГО – электролит.

При одновременной обработке плоской и криволинейной поверхностей равновесное состояние ПГО характеризуется равенством:

$$P_1 = P_2 \quad (12)$$

Подставив в (12) значения P_1 и P_2 из (8), (9) с учетом (10), (11) и преобразовав равенство, получим выражение для расчета толщины ПГО в области кривизны обрабатываемой поверхности:

$$l_1 = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{2 \cdot l^2 \cdot \sigma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2}}} \quad (13)$$

Рассмотрим некоторые характерные случаи ЭИП простых криволинейных поверхностей. Над острой кромкой ПГО имеет вид цилиндрической поверхности, для которой:

$$R_1 = R < 0 \text{ и } R_2 = \infty \quad (14)$$

В этом случае выражение (13) с учетом (14) примет вид:

$$l_1 = \frac{l}{\sqrt{1 + \frac{2 \cdot l^2 \cdot \sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot R}}} \quad (15)$$

В случае ЭИП кромки паза $R > 0$ и выражение (13) примет вид:

$$l_1 = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{2 \cdot l^2 \cdot \sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot R}}} \quad (16)$$

ЭИП конической поверхности с некоторым радиусом закругления вершины конуса сопровождается образованием над вершиной сферической ПГО, для которой

$$R_1 = R_2 = R < 0 \quad (17)$$

Тогда толщина ПГО в области кривизны с учетом (17) описывается выражением

$$l_1 = \frac{l}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot l^2 \cdot \sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot R}}} \quad (18)$$

Анализ формул (15), (16) и (18) показывает, что при ЭИП выпуклых криволинейных поверхностей толщина ПГО в области кривизны меньше по сравнению с плоским участком анода ($l_1 < l$), что приводит к возрастанию в области кривизны напряженности электрического поля и интенсивности съема металла. Этим можно объяснить высокую эффективность при ЭИП удаления заусенцев, притупления острых кромок и невозможность заточки изделий типа игл. Полирование вогнутых криволинейных поверхностей сопровождается увеличением толщины ПГО ($l_1 > l$) и снижением производительности обработки вогнутого участка поверхности.

Выводы

1. Разработанная физико-математическая модель анодного процесса описывает поведение электролита в ПГО для четырех режимов анодной обработки: коммутационного, нагрева электролитной плазмой, электрогидродинамического и электролитно-разрядного.

2. Частота импульсных электрических разрядов может быть использована в качестве функции контроля и управления источником технологического тока установки ЭИП.

Список литературы: 1. Мрочек Ж.А., Пархутик А.П., Синькевич Ю.В. Анодные эффекты в электролитах // POROUS SEMICONDUCTORS – SCIENCE AND TECHNOLOGY. – Tenerife, Spain, 10 – 15 march, 2002. – р. 106 – 108. 2. Лазаренко Б.Р., Фурсов С.П., Факторович А.А., Галанина Е.К., Дураджи В.Н. Коммутация тока на границе металл – электролит. – Кишинев: Ред. – изд. отд АН МССР, 1971. – 74 с. 3. Мурас В.С. Некоторые элементы процесса электролитического нагрева // Сб. трудов ФТИ АН БССР. – Мн., 1956. – Вып. 3. – С. 53 – 58. 4. Лазаренко Б.Р., Дураджи В.Н., Факторович А.А., Брянцев И.В. Об особенностях электролитного нагрева при анодном процессе // Электронная обработка материалов. – 1974. – №3. – С. 37 – 40. 5. Фиргер И.В. Термическая обработка сплавов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 304 с. 6. Лазаренко Б.Р., Дураджи В.Н., Факторович А.А., Брянцев И.В. Исследование пробоя между металлическим и электролитным электродами // Электронная обработка материалов. – 1970. – № 4. – С. 18 – 21. 7. Королева С.Н., Остроумов Г.А. Роль инертности жидкости в развитии электрического пробоя // Электронная обработка материалов. – 1966. – №3. – С. 20 – 27.

Сдано в редакцию 4.05.06

Рекомендовано д.т.н., проф. Тока А.

ПОБУДОВА І ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТЕЙ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ СТРУМИННІЙ ОБРОБЦІ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ

Стоцько З.А., Стефанович Т.О. (НУ"ЛПІ", м. Львів, Україна)

Correlation between velocity of the working medium and the characteristics of equipment for jetting process is given and analysed. Distribution of the characteristics along the cross-sections of jet is taken into consideration. The theoretical diagram of velocity distribution in the perpendicular to the jet axis cross-section formed by Math CAD are given. Proposed algorithm is a part of the general mathematical model of jetting process.

Вступ.

Методи струминної обробки поверхонь виробів відносяться до прогресивних технологій і можуть використовуватися у виробництві для вирішення різнопланових задач. До таких задач, зокрема, відносяться: