

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-407-414

УДК 621.923.7:537.528

Концептуальная модель коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки в режиме электроимпульсного полирования

Докт. техн. наук, доц. Ю. В. Синькевич¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Электрическая проводимость парогазовой оболочки в режиме электроимпульсного полирования тесно связана с механизмами физико-химических процессов, протекающих на поверхности анода и в прианодной области электролита, съема металла, сглаживания неровностей профиля поверхности и технологическими режимами, влияющими на производительность и точность обработки. Представлена экспериментально обоснованная концептуальная модель механизма электрической проводимости парогазовой оболочки, согласно которой электрический ток, протекающий в оболочке и имеющий квазипостоянную и высокочастотную составляющие, обеспечивается за счет ионной проводимости в электролитных мостиках, замыкающих оболочку, и ионной проводимости в газовой фазе оболочки. Показано, что квазипостоянная составляющая тока представляет собой композицию электрического тока от перекрывающихся во времени импульсов тока от электролитных мостиков, замыкающих оболочку с частотой 0,01–0,90 кГц, и тока в газовой фазе оболочки. Высокочастотная составляющая тока обусловлена ионной проводимостью в мостиках, коммутирующих оболочку с частотой порядка 2,5 МГц. Теоретически обоснована аномально высокая электропроводность электролита в электролитных мостиках. Показано, что образование парогазовой оболочки и ее обновление связаны с тепловым взрывным механизмом разрушения электролитных мостиков. Вибрация оболочки и гидродинамические потоки в объеме электролита возникают в результате воздействия на приграничный с оболочкой слой электролита ударных волн от взрывов электролитных мостиков и схлопывания кавитационных пузырьков в прианодной области электролита.

Ключевые слова: электроимпульсное полирование, электролит, парогазовая оболочка, электролитный мостик, импульс тока, ионная проводимость

Для цитирования: Синькевич, Ю. В. Концептуальная модель коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки в режиме электроимпульсного полирования / Ю. В. Синькевич // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 407–414

Conceptual Model of Commutation Mechanism for Electric Conductivity of Vapor-Gas Envelope in Electro-Impulse Polishing Mode

Yu. V. Sinkevitch¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Electric conductivity of vapor-gas envelope in electro-impulse polishing mode is closely connected with mechanisms of physical and chemical processes occurring on an anode surface and in pre-anode area of electrolyte, metal removing, smoothing-out of surface profile irregularities and technological regimes influencing on productivity and processing accuracy.

Адрес для перепискиСинькевич Юрий Владимирович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-97
metech@bntu.by**Address for correspondence**Sinkevitch Yuriy V.
Belarusian National Technical University
9 B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-97
metech@bntu.by

The paper presents experimentally substantiated conceptual model of a mechanism for electric conductivity of vapor-gas envelope. According to the model an electric current passing in the envelope and having quasi-constant and high-frequency components is provided by ionic conductivity in electrolyte envelope-enclosing bridges and ionic conductivity in gas envelope phase. It has been shown that quasi-constant of the current component represents a composition of electric current consisting of overlapping time current impulses from electrolyte bridges that enclose the envelope with frequency of 0.01–0.90 kHz and current in a gas phase of the envelope. High-frequency current component is pre-conditioned by ionic conductivity in bridges that commutate the envelope with frequency of 2.5 MHz. The paper theoretically substantiates excessive electrical conductivity of electrolyte in the electrolyte bridges. It has been demonstrated that formation of vapor-gas envelope and its renovation are connected with thermal burst mechanism for destruction of electrolyte bridges. Envelope vibration and hydrodynamic flows within the electrolyte occur due to impulse wave impact on electrolyte layer which is on the border of the envelope. The waves are caused by bursts of electrolyte bridges and cavitation bubble collapse in pre-anode electrolyte area.

Keywords: electro-impulse polishing, electrolyte, vapor-gas envelope, electrolyte bridge, current impulse, ionic conductivity

For citation: Sinkevitch Yu. V. (2016) Conceptual Model of Commutation Mechanism for Electric Conductivity of Vapor-Gas Envelope in Electro-Impulse Polishing Mode. *Science & Technique*. 15 (5), 407–414 (in Russian)

Закономерности физико-химических процессов, характерные для разных режимов электролитной анодной обработки, определяют области практического применения разработанных технологий [1]. В частности, в электрогидродинамическом режиме реализуется процесс электроимпульсного полирования (ЭИП) металлов и сплавов, который широко используется в промышленных масштабах в Республике Беларусь и за рубежом. Научная и практическая значимость изучения механизма прохождения электрического тока через парогазовую оболочку (ПГО) вытекает из тесной связи электрической проводимости оболочки с механизмами физико-химических процессов, протекающих на поверхности анода и в прианодной области электролита, съема металла, сглаживания неровностей профиля поверхности и технологическими режимами, влияющими на производительность и точность обработки. Анализ литературных данных [2] выявил многообразие и противоречивость предложенных гипотез об электрической проводимости оболочки. Согласно одной из гипотез [3], основанной на результатах осциллографических исследований электрического тока в ПГО, ток в своем составе имеет постоянную и высокочастотную составляющие. В [3] показано, что зависимости уровня постоянной и амплитуды переменной составляющих тока от температуры электролита, рабочего напряжения и площади поверхности образца имеют сложный характер. Постоянную составляющую тока автор работы связывает с ионной проводимостью ПГО, переменную – с замыканием оболочки электролитными мостиками.

При изучении механизма электрической проводимости оболочки большое значение имеют данные о ее толщине. Согласно имеющимся теоретическим и экспериментальным данным, толщина оболочки при разных режимах анодной обработки может находиться в диапазоне от 0,003 до 1,200 мм. В результате математического моделирования динамической системы «анод – ПГО – электролит», представленной в виде квазистационарной плоскопараллельной модели – аналога плоского конденсатора, получено выражение для расчета толщины оболочки [4]

$$l_0 = \sqrt{\frac{U}{2f}} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0}{\rho}}, \quad (1)$$

где l_0 – толщина оболочки, м; U – падение напряжения на оболочке, В; f – частота колебаний тока в оболочке, Гц; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 – электрическая постоянная, Ф/м; ρ – плотность раствора электролита, кг/м³.

Оценим толщину ПГО, приняв $\epsilon = 1,0$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\rho = 0,97 \cdot 10^3$ кг/м³ при температуре электролита $T_{эл} = 80$ °С [5]. Данные о толщине оболочки для экспериментально установленного мегагерцового диапазона частот колебаний электрического тока [3, 6] представлены на рис. 1.

Дополнительно, используя экспериментальные данные о толщине оболочки, оценим вероятную частоту колебаний тока. Для чего выражение (1) перепишем в виде

$$f = \frac{U}{2l_0^2} \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\rho}}$$

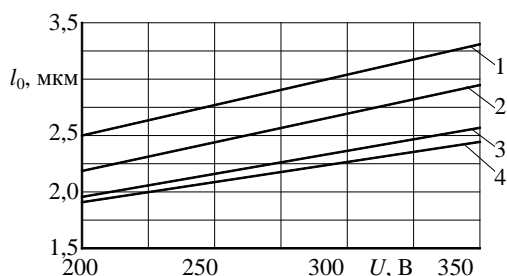


Рис. 1. Толщина парогазовой оболочки в зависимости от частоты колебаний электрического тока, МГц:
1 – 1,5; 2 – 2,0; 3 – 2,5; 4 – 3,0

Fig. 1. Thickness of vapor-gas envelope according to frequency of electric current oscillations, MHz:
1 – 1.5; 2 – 2.0; 3 – 2.5; 4 – 3.0

Расчетные данные о вероятной частоте колебаний электрического тока в ПГО, из которого следует, что в структуре тока возможны низкочастотные гармоники тока, в виде графиков представлены на рис. 2.

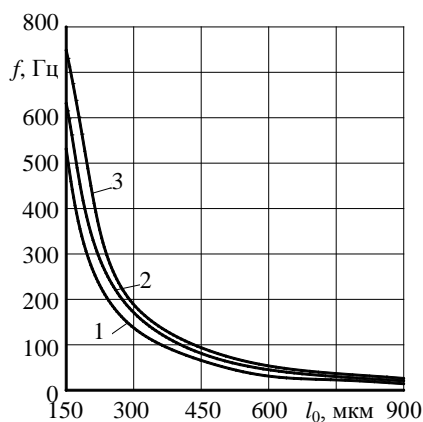


Рис. 2. Зависимость частоты колебаний электрического тока от толщины парогазовой оболочки:
1 – $U = 250$ В; 2 – 300 В; 3 – 350 В

Fig. 2. Dependence of electric current oscillation frequency on vapor-gas envelope thickness:
1 – $U = 250$ V; 2 – 300 V; 3 – 350 V

При разработке концептуальной модели механизма электрической проводимости ПГО использовали данные, полученные в ходе осциллографических, частотных и спектральных исследований тока [6–8]. Осциллограммы тока снимали с помощью электронного запоминающего

осциллографа С8-13. Частотомером ЧЗ-34 измеряли частоту высокочастотной составляющей тока. Следует отметить, что каждая из полученных осциллограмм представляет собой одну из возможных реализаций процесса ЭИП в конкретный момент времени продолжительностью 2 мкс, а сам процесс, выраженный в виде осциллограмм, – это бесконечная совокупность таких реализаций, образующих статистический ансамбль. В то же время частота колебаний высокочастотной составляющей тока, измеренная частотомером ЧЗ-34, представляет собой величину, усредненную на значительно более продолжительном интервале времени по сравнению с 2 мкс. Спектральные характеристики тока в диапазоне частот от 0,01 до 60,00 кГц исследовали с использованием гетеродинного анализатора спектра СК4-56.

Анализ осциллограмм показал, что амплитуда и частота колебаний высокочастотной составляющей тока в режиме ЭИП являются квазипостоянными величинами, равными в среднем соответственно 0,65 А и 2,50 МГц, и несущественно зависят от параметров процесса обработки. Однако данные, полученные с помощью частотомера, выявили более сложный характер зависимости частоты колебаний тока от температуры электролита (рис. 3а), рабочего напряжения (рис. 3б) и площади поверхности образца (рис. 3с).

Анализ полученных спектров тока показал, что в режиме ЭИП гармоники тока по амплитуде распределены неравномерно в диапазоне частот от 0,01 до 60,00 кГц. Гармоники с наибольшими амплитудами сосредоточены в полосе частот от 0,01–0,02 до 0,80–0,90 кГц. На частотах более 0,90 кГц спектры тока подобны спектру белого шума с низким уровнем амплитуд спектральных составляющих. В областях частот 0,05–0,15 и 0,40–0,70 кГц гармоники тока сосредоточены в виде совокупных пиков, уровень которых зависит от условий проведения процесса обработки. Увеличение температуры электролита, рабочего напряжения, площади поверхности образца и принудительное перемешивание электролита приводят к росту амплитуды совокупного пика гармоник в области частот от 0,4 до 0,7 кГц. Уровень

гармоник тока в области белого шума зависит от режима анодной обработки, причем наибольший уровень гармоник характерен для режимов электролитно-плазменного и электролитно-разрядного нагревов.

На основе известных и полученных данных можно предложить следующую концептуальную модель коммутационного механизма электрической проводимости ПГО в режиме ЭИП. Схема пробоя оболочки единичным электролитным мостиком представлена на рис. 4.

Пробой оболочки проходит через несколько стадий. На первой стадии (рис. 4а) в области случайной неоднородности электрического поля на поверхности электролита, граничащей с ПГО, под действием пондеромоторной силы формируется микровыступ, и электролит начинает втягиваться в оболочку. Происходит за-

рождение электролитного мостика (рис. 4б), который назовем основным электролитным мостиком. По мере приближения мостика к поверхности анода возрастает локальная напряженность электрического поля и, соответственно, увеличивается пондеромоторная сила, что придает ускорение движению электролитного мостика. При подходе мостика к поверхности анода на расстояние порядка 1,8–3,3 мкм (рис. 1) на его поверхности зарождаются многочисленные дополнительные электролитные мостики (рис. 4с) по аналогии с первой стадией пробоя ПГО основным мостиком. Поверхность основного электролитного мостика как бы прорастает множеством дополнительных мостиков. При этом размеры дополнительных мостиков существенно меньше размера основного мостика.

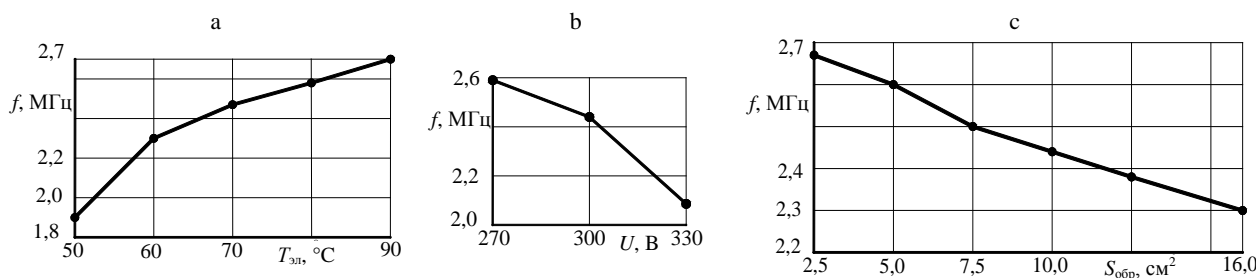


Рис. 3. Зависимость частоты колебаний высокочастотной составляющей тока от: а – температуры электролита при $U = 300$ В и $S_{обр} = 16$ см²; б – рабочего напряжения при $T_{эл} = 80$ °С и $S_{обр} = 10$ см²; с – площади поверхности образца при $T_{эл} = 60$ °С и $U = 300$ В

Fig. 3. Dependence of oscillation frequency for high-frequency current component on: а – electrolyte temperature at $U = 300$ V and $S_{formation} = 16$ cm²; б – operational voltage at $T_{electrolyte} = 80$ °C and $S_{formation} = 10$ cm²; с – specimen surface area at $T_{electrolyte} = 60$ °C and $U = 300$ V

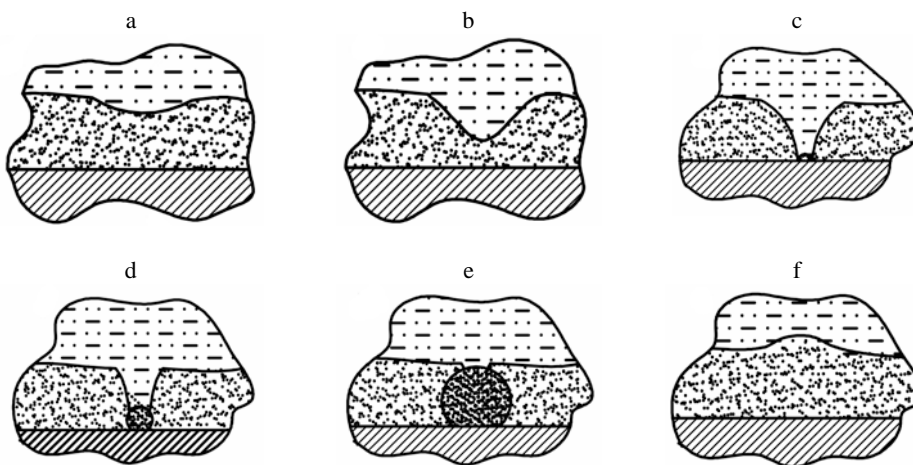


Рис. 4. Схема пробоя парогазовой оболочки электролитным мостиком

Fig. 4. Scheme of vapor-gas envelope burst by electrolyte bridge

Физическое состояние основного и дополнительных электролитных мостиков определяется их инерцией и напряженностью электрического поля. Дополнительные мостики достигают поверхности анода за время порядка 0,2–0,3 мкс и первыми касаются поверхности анода, замыкая ПГО. Основные мостики по сравнению с дополнительными обладают большей инерцией. Для достижения поверхности анода им требуется время порядка 0,5–50,0 мс. По мере джоулевого нагрева температура электролита в области контакта мостика с поверхностью анода достигает точки кипения. Поскольку температура продолжает быстро возрастать, то условия не соответствуют равновесному пузырьковому кипению, и имеет место перегрев локальной микроскопической области электролита. Величина перегрева при атмосферном давлении, достаточная для реализации механизма взрывного вскипания воды, не превышает 205 °С [9]. В конечном итоге подведенной энергии оказывается достаточно для преодоления фазового барьера – дополнительные электролитные мостики, а затем и основной мостик взрываются (рис. 4d). В электрической цепи появляется импульс тока, представляющий собой композицию импульса тока от основного мостика и многочисленных импульсов тока от дополнительных мостиков (рис. 5). Высокочастотный сигнал электрического тока, фиксируемый с помощью осциллографа, является следствием коммутации ПГО дополнительными электролитными мостиками, эмитированными с поверхности основного мостика.

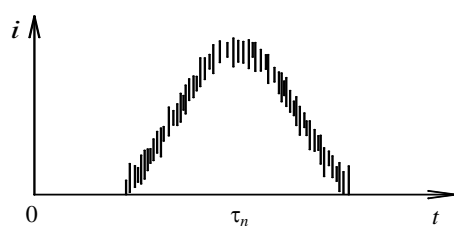


Рис. 5. Структура единичного импульса электрического тока

Fig. 5. Structure of single impulse for electric current

Интересным фактом, установленным в ходе осциллографических исследований тока и требующим объяснения, является аномально высокая амплитуда импульсов тока от дополнительных мостиков. Известно [10], что водные растворы электролитов – проводники электрического тока II рода, в которых ток обеспечива-

ется перемещением положительно и отрицательно заряженных ионов под действием электрического поля. Сила общего тока, равная сумме токов, вызванных противоположным движением катионов и анионов раствора, зависит от подвижности ионов. При одинаковых условиях подвижности большинство ионов мало отличаются друг от друга за исключением ионов водорода и гидроксидов, подвижность которых больше в 3–8 раз [10]. Подвижность ионов существенно зависит от вязкости раствора, которая, в свою очередь, зависит от его температуры. Повышение температуры приводит к снижению вязкости раствора и увеличению подвижности ионов. С другой стороны, скорость движения иона в растворе под действием внешнего электрического поля ограничивается силой трения, связанной с существованием ионной атмосферы, окружающей ион и перемещающейся в сторону, противоположную движению иона [10]. Эффект торможения называется электрофоретическим эффектом. На скорость движения иона также оказывает влияние релаксационный эффект [10], связанный с образованием и разрушением ионной атмосферы при движении иона. В условиях ЭИП в момент касания дополнительным электролитным мостиком поверхности анода температура электролита в мостике быстро возрастает, что приводит к резкому снижению вязкости раствора и значительному повышению подвижности ионов в локальном объеме дополнительного мостика. Кроме того, при расчетной напряженности электрического поля порядка 10^7 В/м в области дополнительного мостика реализуется эффект Вина [10], который заключается в том, что при напряженности поля более 10^5 В/м движущийся ион выходит за пределы ионной атмосферы, которая не успевает вновь образовываться в каждом новом месте нахождения иона и ее тормозящий эффект на скорость движения иона не проявляется. В результате электропроводность электролита в дополнительном мостике резко возрастает и достигает предельно возможной величины для данного раствора.

Аномально высокую амплитуду импульсов электрического тока при замыкании ПГО дополнительными электролитными мостиками можно объяснить совокупным действием высокой температуры электролита в локальном объеме мостика и реализацией эффекта Вина. При пробое оболочки основными мостика-

ми расчетная напряженность электрического поля в локальных областях составляет порядка $4 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$ В/м. Следовательно, и в этом случае возможна реализация эффекта Вина.

Взрывы основного и дополнительных электролитных мостиков сопровождаются ударной волной и образованием микроскопического парагазового пузырька в ПГО (рис. 4е). Под действием ударной волны давление на электролит со стороны оболочки резко возрастает, и электролит, граничащий с оболочкой, отбрасывается от поверхности анода (рис. 4ф). Толщина оболочки увеличивается. В тонком приграничном слое электролита зарождается микропоток. В начальный момент времени скорость движения микропотока достаточно высока, что приводит к снижению давления в микропотоке. На некотором расстоянии от ПГО в результате снижения скорости движения микропотока под действием сил трения давление в микропотоке повышается до уровня, близкого к давлению в основном объеме электролита. Перепад давлений может привести к возникновению в прианодной области электролита гидродинамической кавитации. Кавитационный пузырек, перемещаясь с микропотоком в область с более высоким давлением, схлопывается, излучая ударную волну. Совокупное действие ударных волн от взрывов электролитных мостиков и схлопывания кавитационных пузырьков способствует возникновению вибрации ПГО и формированию гидродинамических потоков в электролите.

При взрыве электролитных мостиков в оболочку попадают водяной пар, растворенные в электролите газы, нейтральные кластеры, состоящие преимущественно из молекул воды, молекулы компонентов раствора и ионы. Отрицательно заряженные ионы под действием электрического поля начинают двигаться в ПГО

в направлении анода, положительно заряженные ионы – в направлении катода (электролита). Возникает электрический ток, обусловленный ионной проводимостью в газовой фазе оболочки. Его доля в общем токе, протекающем через оболочку в режиме ЭИП, не превышает 2 % [11].

Авторы [12, 13] представляют ПГО в виде эквивалентной электрической схемы, включающей конденсатор с параллельно подключенным нелинейным сопротивлением. По данным [12], удельная емкость оболочки $150 - 300$ пФ/см². В условиях ЭИП зарождение основных электролитных мостиков является статистически независимым случайным событием. Мостики могут иметь разные размеры и соответственно различную величину электрического сопротивления. С учетом пренебрежимо малой величины электрического сопротивления металлического анода систему «анод – ПГО – электролит» можно представить в виде эквивалентной электрической схемы, включающей конденсатор $C_{ПГО}$, электрические сопротивления электролита $R_{эл}$, газовой фазы оболочки $R_{ПГО}$ и электролитных мостиков R_1, R_2, \dots, R_n (рис. 6а). Для данной схемы в общем случае справедливо неравенство

$$R_{ПГО} \neq R_1 \neq R_2 \neq \dots \neq R_n.$$

Из эквивалентной электрической схемы (рис. 6а) следует, что постоянная составляющая тока, протекающего через ПГО, обеспечивается за счет ионной проводимости в газовой фазе оболочки. Основные электролитные мостики, замыкая оболочку в моменты времени $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$, шунтируют электрическое сопротивление газовой фазы оболочки $R_{ПГО}$, что приводит к появлению в электрической цепи импульсов тока, обусловленных ионной проводимостью в электролитных мостиках.

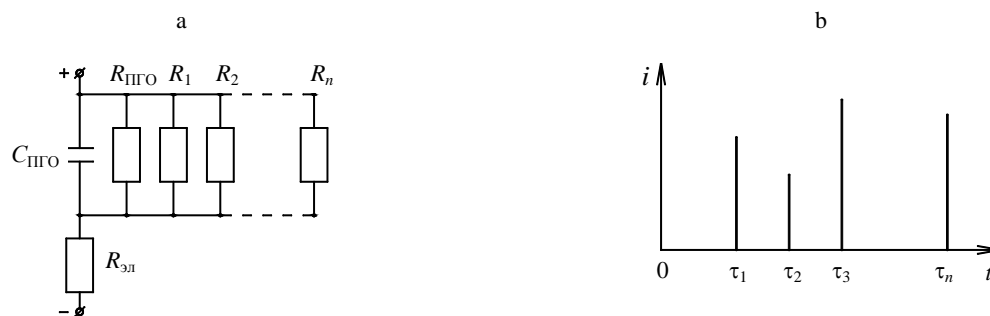


Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема (а) системы «анод – парагазовая оболочка – электролит» и схема единичных импульсов тока (б)

Fig. 6. Equivalent electric diagram (a) system “anode – vapor-gas envelope – electrolyte” and diagram of single current impulses (b)

На рис. 6b они условно представлены в виде коротких импульсов с разной амплитудой. Очевидно, что основные мостики могут зарождаться с равной вероятностью в одинаковые моменты времени на разных участках поверхности электролита, граничащего с ПГО. Следовательно, электрические сопротивления отдельных мостиков оказываются подключенными параллельно, что в соответствии с законом Ома приводит к снижению общего сопротивления оболочки и росту силы тока в электрической цепи. Этот эффект наглядно проявляется при увеличении площади обрабатываемой поверхности.

Таким образом, так называемая постоянная составляющая электрического тока, фиксируемая с помощью осциллографа и амперметра постоянного тока, на самом деле представляет собой композицию тока в газовой фазе ПГО и тока от перекрывающихся во времени импульсов тока от основных электролитных мостиков, коммутирующих оболочку с частотой 0,01–0,90 кГц. Схема, поясняющая эффект перекрытия во времени импульсов тока от основных мостиков, представлена на рис. 7.

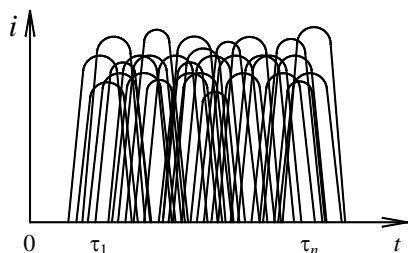


Рис. 7. Эффект перекрытия импульсов тока во времени

Fig. 7. Effect of impulse overlapping in time

В рамках предложенной концептуальной модели можно объяснить разнообразные физические явления, наблюдаемые при реализации процесса ЭИП, например появление звука с частотой 0,4–0,7 кГц. При увеличении площади обрабатываемой поверхности высота звука не меняется, но его уровень возрастает. Звуковые колебания возникают в результате воздействия на электролит ударных волн от взрывов основных электролитных мостиков. Колебания в электролите передаются на стенки ванны установки ЭИП и далее в воздух в виде звуковых колебаний. Чем больше площадь обрабатываемой поверхности, тем больше электролитных мостиков, замыкающих ПГО, и выше уровень звука. Высота звука зависит от того, с какой преобладающей частотой основные электролитные мостики коммутируют оболочку.

ВЫВОДЫ

1. Согласно экспериментально обоснованной концептуальной модели коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки в режиме электроимпульсного полирования, электрический ток, имеющий квазипостоянную и высокочастотную составляющие, обеспечивается за счет ионной проводимости в электролитных мостиках и газовой фазе оболочки.

2. Квазипостоянная составляющая электрического тока представляет собой композицию тока от перекрывающихся во времени импульсов тока от основных электролитных мостиков, коммутирующих оболочку с частотой 0,01–0,90 кГц и тока в газовой фазе парогазовой оболочки. Высокочастотная составляющая тока является составной частью импульсов тока от основных мостиков и обусловлена ионной проводимостью в дополнительных электролитных мостиках, замыкающих оболочку с частотой порядка 2,5 МГц.

3. Аномально высокая электропроводность электролита в электролитных мостиках обеспечивается за счет высокой подвижности ионов вследствие сверхбыстрого разогрева электролита джоулевой теплотой и реализации эффекта Вина.

4. Образование парогазовой оболочки и ее обновление связаны с тепловым взрывным механизмом разрушения электролитных мостиков. Вибрация оболочки и гидродинамические потоки в объеме электролита возникают в результате воздействия на приграничный с оболочкой слой электролита ударных волн от взрывов электролитных мостиков и схлопывания кавитационных пузырьков в прианодной области электролита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синькевич, Ю. В. Применение электролитной анодной обработки в металлообрабатывающей промышленности / Ю. В. Синькевич // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 29. С. 92–96.
2. Синькевич, Ю. В. Современные представления о механизме электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электролитной анодной обработки / Ю. В. Синькевич // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 29. С. 102–107.
3. Янковский, И. Н. Электроимпульсное полирование коррозионностойких и углеродистых конструкционных сталей с обеспечением заданного комплекса свойств обрабатываемых поверхностей / И. Н. Янковский. Минск, 2008. 187 с.
4. Синькевич, Ю. В. Физико-математическая модель процесса электроимпульсного полирования / Ю. В. Синькевич, И. Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр.

- Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2006. Вып. 32. С. 206–212.
5. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А. А. Равделя, А. М. Пономаревой. 9-е изд. СПб: Спец. лит., 1998. 232 с.
 6. Собственные радиоизлучение и ток электрического разряда как инструмент контроля и управления процессом электроимпульсного полирования / Г. Н. Здор [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2009. № 2. С. 111–119.
 7. Янковский, И. Н. Осциллографические исследования электрического тока в парогазовой оболочке при анодном процессе / И. Н. Янковский, Ю. В. Синькевич, Г. Я. Беляев // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г.: в 3 т. Новополоцк: Полоцкий гос. ун-т, 2009. Т. 3. С. 13–17.
 8. Синькевич, Ю. В. Исследование механизма прохождения электрического тока через парогазовую оболочку при анодном процессе / Ю. В. Синькевич, И. Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. Донецк: Донецкий национ. техн. ун.-т, 2011. Вып. 41. С. 287–292.
 9. Советников, В. П. О возможности взрывного вскипания на достриммерной стадии электрического разряда в воде / В. П. Советников, Л. Л. Теляшов // Электронная обработка материалов. 1979. № 4. С. 46–49.
 10. Антропов, Л. И. Теоретическая электрохимия / Л. И. Антропов. М.: Высш. шк., 1975. 560 с.
 11. Синькевич, Ю. В. Оценка адекватности физико-математической модели парогазовой оболочки в условиях электроимпульсного полирования / Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В. Л. Кирпичева и 45-летию ПГУ, Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. Новополоцк: Полоцкий гос. ун-т, 2013. С. 47–50.
 12. Дураджи, В. Н. Нагрев металлов в электролитной плазме / В. Н. Дураджи, А. С. Парсадаян; под общ. ред. А. С. Парсадаяна. Кишинев: Штиинца, 1988. 216 с.
 13. Исследование электрической устойчивости системы «источник питания – нагрузка» при электролитной обработке / В. К. Станишевский [и др.] // Электронная обработка материалов. 1988. № 1. С. 26–29.
- Поступила 04.04.2016
 Подписана в печать 06.06.2016
 Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Sinkevich Yu. V. (2015) Application of Electrolytic Anode Treatment in Metal-Working Industry. *Mashinostroenie. Resp. Mezhved. Sb. Nauch. Tr.* [Mechanical Engineering. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, Issue 29, 92–96 (in Russian).
2. Sinkevich Yu. V. (2015) Modern Concept for Mechanism of Electrical Vapor-Gas Envelope Conductivity under Conditions of Electrolytic Anode Treatment. *Mashinostroenie. Resp. Mezhved. Sb. Nauch. Tr.* [Mechanical Engineering. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, Issue 29, 102–107 (in Russian).
3. Yankovsky I. N. (2008) *Electrical Impulse Polishing of Corrosion-Resistant and Carbon Structural Steel by En-*
4. *suring Specified Complex of Properties for Treated Surfaces.* Minsk. 187 (in Russian).
5. Sinkevich Yu. V., Yankovsky I. N. (2006) Physical and Mathematical Model of Electrical Impulse Polishing Process. *Progressivnye Tekhnologii i Sistemy Mashinostroeniia. Mezhdunar. Sb. Nauch. Tr.* [Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. International Collection of Research Papers]. Donetsk, Donetsk National Technical University, Issue 32, 206–212 (in Russian).
5. Ravdel A. A., Ponomariova A. M. (1998) *Quick-Reference Guide for Physical and Chemical Values.* 9th Edition. Saint-Petersburg: Publishing House Special Literature. 232 (in Russian).
6. Zdor G. N., Timoshevich V. B., Sinkevich Iu. V., Yankovskii I. N. (2009) Intrinsic Radio Emission and Current of Electrical Discharge as Control and Management Tool for Electrical Impulse Polishing Process. *Izvestiia Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Seriia Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Science Series], (2), 111–119 (in Russian).
7. Yankovsky I. N., Sinkevich Yu. V., Belyaev G. Ya. (2009) Oscillographic Investigations on Electric Current in Vapor-Gas Envelope During Anode Process. *Materialy, Tekhnologii i Oborudovanie v Proizvodstve, Eksploatatsii, Remonte i Modernizatsii Mashin: Sb. Nauch. Tr. VII Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 3* [Materials, Technologies and Equipment in Production, Operation, Repair and Modernization of Machines: Collection of Research Papers of 7th International Scientific and Technical Conference. Vol. 3]. Novopolotsk, Polotsk State University, 13–17 (in Russian).
8. Sinkevich Yu. V., Yankovsky I. N. (2011) Investigations on Mechanism of Electric Current Passage Through Vapor-Gas Envelope During Anode Process. *Progressivnye Tekhnologii i Sistemy Mashinostroeniia. Mezhdunar. Sb. Nauch. Tr.* [Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. International Collection of Research Papers]. Donetsk, Donetsk National Technical University, Issue 41, 287–292 (in Russian).
9. Sovetnikov V. P., Telyashov L. L. (1979) On Possibility of Boil-Off at Pre-Streamer Stage of Electric Discharge in Water. *Elektronnaiia Obrabotka Materialov* [Electronic Material Processing], (4), 46–49 (in Russian).
10. Antropov L. I. (1975) *Theoretical Electrochemistry.* Moscow, Vysshaya Shkola. 560 (in Russian).
11. Sinkevich Yu. V., Sheleg V. K., Yankovsky I. N. (2013) Evaluation of Adequateness for Physical and Mathematical Model of Vapor Gas Envelope Under Conditions of Electrical Impulse Polishing. *Innovatsionnye Tekhnologii v Mashinostroeniia: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posviashch. Pamiati Prof. V. L. Kirpicheva i 45-letiiu PGU* [Innovation Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Dedicated to the Memory of prof. V. L. Kirpichev and 45th Anniversary of the Polotsk State University]. Novopolotsk, Polotsk State University, 47–50 (in Russian).
12. Duradji V. N., Parsadanyan A. S. (1988) *Heating of Metals in Electrolytic Plasma.* Kishinev: Publishing House “Stiintsa”. 216 (in Russian).
13. Stanishevskii V. K., Parshuto A. E., Semchenko A. A., Kosobutskii A. A. (1988) Investigations on Electric Stability of “Power Source – Load” System During Electrolytic Treatment. *Elektronnaiia Obrabotka Materialov* [Electronic Material Process], (1), 26–29 (in Russian).

Received: 04.04.2016

Accepted: 06.06.2016

Published online: 26.09.2016