

УДК 544.6

Т. Р. ИДРИСОВ, А. Н. ЗАЙЦЕВ, В. П. ЖИТНИКОВ

ПОВЫШЕНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА АНОДНОГО РАСТВОРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Представлена модель анодного растворения при электрохимической обработке биполярными импульсами микросекундной длительности при плотностях тока до 100 А/см^2 , учитывающая нестационарный характер установления анодного и катодного потенциалов в течение действия импульса и влияния на анодный потенциал предшествующего импульса отрицательной полярности, а также изменение температуры и газонаполнения электролита в межэлектродном пространстве (МЭП). Поставлена и решена задача оптимизации параметров процесса, включая согласование параметров предшествующего импульса обратной полярности и рабочего импульса, для достижения максимальной производительности при заданном коэффициенте локализации. *Электрохимическая обработка; локализация процесса; анодное растворение; электродный потенциал*

Одним из перспективных направлений повышения точности и качества обработанной поверхности при электрохимической обработке является использование импульсов микросекундной длительности [1]. ЭХО с использованием микросекундных импульсов тока осуществляется в условиях нестационарности электродных потенциалов. При этом характер изменения электродных потенциалов определяется амплитудно-временными параметрами импульсов и в значительной степени зависит от интенсивности предварительной поляризации электродов за счет подачи импульсов тока малой плотности в паузе между рабочими импульсами. Корректное решение ряда теоретических и прикладных задач электрохимического формообразования на импульсном токе требует формального математического описания процесса импульсной биполярной ЭХО микросекундными импульсами тока, позволяющего поставить и решить задачу определения оптимальных, с точки зрения точности, условий обработки.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, ОБОСНОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ И КРАЕВЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭХО ПРИ КОПИРОВАНИИ СТУПЕНЧАТОГО ЭИ

Для анализа локализации процесса электрохимической обработки рассматривается задача о моделировании процессов, происходящих в МЭП, состоящем из двух участков с

различной величиной межэлектродного зазора (рис. 1) [2].

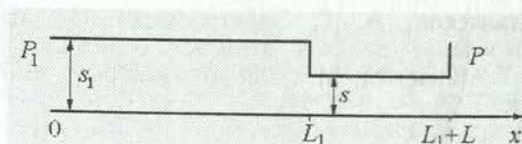


Рис. 1. Схема межэлектродного пространства

Каждый из участков представляет собой пространство, заполненное неподвижным электролитом. На электроды подается импульс напряжения прямоугольной формы. Расчет каждого участка проводится независимо.

Рассмотрим вначале идеальный процесс (анодные и катодные потенциалы являются постоянными величинами, выделение газа и нагрев электролита отсутствуют). В этом случае процесс растворения определяется объединенным законом Фарадея

$$dm = \left(\frac{M}{nF} \right) i \eta dt, \quad (1)$$

где M — молярная масса, n — валентность, F — число Фарадея, t — время, η — выход по току, i — ток.

$$i = \frac{U - \varphi}{R_{\text{эл}}} = \frac{U - \varphi}{s} A \sigma, \quad (2)$$

где U — амплитуда напряжения в прямоугольном импульсе, $R_{\text{эл}}$ — сопротивление

электролита, $\varphi = \varphi_a + \varphi_k$ — сумма анодного и катодного потенциалов, s — величина зазора, A — площадь обрабатываемой поверхности.

Скорость съема массы металла

$$\frac{dm}{dt} = \frac{M}{nF} \sigma \frac{U - \varphi}{S} A \eta. \quad (3)$$

В то же время масса растворенного металла

$$m = \rho A z, \quad (4)$$

где ρ — плотность обрабатываемого металла, z — толщина слоя, снятого с единицы поверхности.

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dz}{dt}. \quad (5)$$

Приравняв правые части выражений (3) и (5)

$$\rho A \frac{dz}{dt} = \frac{M}{nF} \sigma \frac{U - \varphi}{S} A \eta, \quad (6)$$

получим выражение для скорости электрохимического растворения

$$V_{\text{ecm}} = \frac{dz}{dt} = k_{\text{ecm}} \eta \sigma \frac{U - \varphi}{s}, \quad (7)$$

где $k_{\text{ecm}} = \frac{M}{nF\rho}$ — электрохимическая постоянная.

Отметим, что при импульсной обработке в формулах (3)–(7) учитывается только собственное время обработки, т. е. средняя скорость растворения при обработке серией прямоугольных импульсов со скважностью Q будет в Q раз меньше.

Изменение скорости при изменении зазора при постоянных η и φ характеризуется производной

$$\frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} = -k_{\text{ecm}} \eta \sigma \frac{U - \varphi}{s^2}. \quad (8)$$

Процесс локализации более удобно характеризовать отношением производной скорости растворения к скорости

$$\frac{1}{V_{\text{ecm}}} \left| \frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} \right| = \frac{1}{s}. \quad (9)$$

Теперь рассмотрим случай, когда φ , η являются функциями плотности тока j ($\varphi = \varphi(j)$, $\eta = \eta(j)$)

$$j = \frac{i}{A} = \sigma \frac{U - \varphi(j)}{s}. \quad (10)$$

Предполагается, что зависимость потенциалов от времени отсутствует. При этом

$$\frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} = -k_{\text{ecm}} \sigma \left(\eta(j) \frac{U - \varphi(j)}{s^2} + \frac{1}{s} \eta(j) \frac{d\varphi}{dj} \frac{dj}{ds} - \frac{U - \varphi(j)}{s} \frac{d\eta}{dj} \frac{dj}{ds} \right). \quad (11)$$

Согласно (10)

$$\frac{dj}{ds} = -\sigma \left(\frac{U - \varphi(j)}{s^2} + \frac{1}{s} \frac{d\varphi}{dj} \frac{dj}{ds} \right), \quad (12)$$

откуда получим

$$\frac{dj}{ds} = -\sigma \frac{U - \varphi(j)}{s^2} \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{s} \frac{d\varphi}{dj}}. \quad (13)$$

С учетом (11) и (13)

$$\begin{aligned} \frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} &= -k_{\text{ecm}} \sigma \left[\eta(j) \frac{U - \varphi(j)}{s^2} - \frac{1}{s} \eta(j) \frac{d\varphi}{dj} \sigma \frac{U - \varphi(j)}{s^2} \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{s} \frac{d\varphi}{dj}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{U - \varphi(j)}{s} \frac{d\eta}{dj} \sigma \frac{U - \varphi(j)}{s^2} \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{s} \frac{d\varphi}{dj}} \right] = \\ &= -k_{\text{ecm}} \sigma \eta(j) \frac{U - \varphi(j)}{s^2} \left[1 - \frac{\sigma}{s} \frac{d\varphi}{dj} \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{s} \frac{d\varphi}{dj}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{U - \varphi(j)}{\eta s} \frac{d\eta}{dj} \sigma \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{s} \frac{d\varphi}{dj}} \right] = \\ &= -k_{\text{ecm}} \sigma \eta(j) \frac{U - \varphi(j)}{s^2} \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{s} \frac{d\varphi}{dj}} \left(1 + \frac{j}{\eta} \frac{d\eta}{dj} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Отношение производной к скорости равно

$$\frac{1}{V_{\text{ecm}}} \left| \frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} \right| = \frac{1}{s} \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{s} \frac{d\varphi}{dj}} \left(1 + \frac{j}{\eta} \frac{d\eta}{dj} \right). \quad (15)$$

В качестве числового безразмерного параметра, характеризующего локализацию растворения, удобно выбрать отношение величины $\frac{1}{V_{\text{ecm}}} \left| \frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} \right|$ для исследуемого процесса к этой же величине, которая имела бы место при идеальном процессе (9), т. е. комбинацию [6]

$$k_{\text{loc}} = \frac{\frac{1}{V_{\text{ecm}}} \left| \frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} \right|}{\frac{1}{V_{\text{ecm}}} \left| \frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} \right|_{\text{ideal}}} = \frac{s}{V_{\text{ecm}}} \left| \frac{dV_{\text{ecm}}}{ds} \right|. \quad (16)$$

Для случая зависимости выхода по току и электродных потенциалов от плотности тока коэффициент локализации определяется формулой

$$k_{loc} = \left(1 + \frac{j}{\eta} \frac{d\eta}{dj}\right) \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{s} \frac{d\varphi}{dj}}. \quad (17)$$

Отсюда следует, что при $\eta = \text{const}$, $\frac{d\varphi}{dj} > 0$ значение $k_{loc} < 1$, т. е. процесс имеет меньшее значение коэффициента локализации, чем идеальный (т. е. разность скоростей растворения меньше, чем при идеальном процессе, что потребует большего припуска для достижения заданной точности копирования). С другой стороны, при $\frac{d\eta}{dj} > 0$, $\varphi = \text{const}$ величина $k_{loc} > 1$. Тем самым, реальные зависимости выхода по току и электродных потенциалов имеют противоположное влияние на коэффициент локализации.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СНИМАЕМОГО ПРИПУСКА ПРИ КОПИРОВАНИИ СТУПЕНЬКИ

Рассмотрим процесс обработки, при котором для нижней части ступеньки выполняются условия стационарности

$$V_t = V_{\text{ecm}}(s), \quad (18)$$

где V_t — скорость подачи ЭИ.

Предположим, что в начальный момент времени обрабатываемая поверхность является плоской. Задача заключается в определении величины припуска, которую необходимо снять, для того чтобы погрешность копирования ступеньки не превышала заданной величины ε , т. е. чтобы выполнялось условие

$$\Delta s(t) = s_1(t) - s(t) \leq \varepsilon. \quad (19)$$

Поскольку в силу стационарности нижней части ступеньки $\frac{ds}{dt} = 0$, скорость изменения $\Delta s(t)$ равна

$$\frac{d\Delta s}{dt} = \frac{ds_1}{dt} = V_{\text{ecm}}(s_1) - V_t, \quad (20)$$

где скорость растворения определяется по формуле (7).

Перемещение электрода-инструмента представляется дифференциальным равенством

$$V_t dt = \frac{V_t d\Delta s}{V_{\text{ecm}}(s_1) - V_t}. \quad (21)$$

Выделим в правой части этого равенства составляющую, связанную непосредственно с изменением зазора вследствие перемещения ЭИ. Согласно (7) и (10) при $V_t = V_{\text{ecm}}(s)$

$$\begin{aligned} \frac{V_{\text{ecm}}(s)}{V_{\text{ecm}}(s_1) - V_{\text{ecm}}(s)} &= \\ &= \frac{k_{\text{ecm}} \eta(j) \sigma \frac{U - \varphi(j)}{s}}{k_{\text{ecm}} \eta(j_1) \sigma \frac{U - \varphi(j_1)}{s + \Delta s} - k_{\text{ecm}} \eta(j) \sigma \frac{U - \varphi(j)}{s}} = \\ &= \frac{\eta(j) j}{\eta(j_1) j_1 - \eta(j) j} = \frac{\eta(j_1) j_1}{\eta(j_1) j_1 - \eta(j) j} - 1. \end{aligned} \quad (22)$$

Преобразуем отношение

$$\begin{aligned} \frac{\eta(j_1) j_1 - \eta(j) j}{\eta(j_1) j_1} &= \\ &= \frac{\eta(j_1) j_1 - \eta(j_1) j + \eta(j_1) j - \eta(j) j}{\eta(j_1) j_1} = \\ &= \frac{j_1 - j}{j_1} \left\{ 1 + \frac{j [\eta(j_1) j - \eta(j) j]}{\eta(j_1) (j_1 - j)} \right\}. \end{aligned} \quad (23)$$

При подстановке в (23) выражения для Δs , вытекающего из (10)

$$\frac{j_1 - j}{j_1} = - \frac{1}{1 + \frac{\sigma [\varphi(j_1) - \varphi(j)]}{s (j_1 - j)}} \frac{\Delta s}{s}.$$

(23) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{\eta(j_1) j_1 - \eta(j) j}{j_1 \eta(j_1)} &= - \frac{1}{1 + \frac{\sigma [\varphi(j_1) - \varphi(j)]}{s (j_1 - j)}} \times \\ &\times \left\{ 1 + \frac{j [\eta(j_1) j - \eta(j) j]}{\eta(j_1) (j_1 - j)} \right\} \frac{\Delta s}{s} = \\ &= -k_{loc}(j_1, j) \frac{\Delta s}{s}. \end{aligned} \quad (24)$$

Тем самым мы вводим в рассмотрение разностный коэффициент локализации $k_{loc}(j_1, j)$. При малых разностях $s_1 - s$ это определение коэффициента локализации совпадает с (17).

Подставляя (24) в (21)-(23), получим дифференциальное уравнение

$$V_t dt = - \left[1 + \frac{1}{k_{loc}(j_1, j)} \frac{s}{\Delta s} \right] d\Delta s. \quad (25)$$

Приблизительно заменим зависимость $\frac{1}{k_{loc}(j_1, j)}$ константой $\frac{1}{k_{loc}}$ (17) и проинтегрируем дифференциальное уравнение (25)

$$V_t t = - \frac{s}{k_{loc}} \ln \Delta s - \Delta s + c. \quad (26)$$

Для формулирования начальных условий зададимся конкретным видом зависимости выхода по току. При этом учтем принципиальную разницу этих зависимостей для активирующих и пассивирующих электролитов. Для активирующих электролитов величина выхода по току изменяется мало, и электрохимическое растворение происходит практически при любых зазорах и плотностях тока. В этом случае начальным условием для задачи Коши является равенство $\Delta s(0) = h$, где h — высота ступеньки. С учетом этого решение задачи Коши запишется в виде

$$V_t t = \frac{s}{k_{loc}} \ln \frac{h}{\Delta s} + h - \Delta s. \quad (27)$$

При ЭХО интерес вызывает величина припуска d , т. е. сдвига ЭИ, превышающего высоту ступеньки h (точнее, разность $V_t t - h + \Delta s$). Из (27) получим

$$d = V_t t - h + \Delta s = \frac{s}{k_{loc}} \ln \frac{h}{\Delta s}. \quad (28)$$

Используя условие точности (9) из (28), найдем

$$d \geq \frac{s}{k_{loc}} \ln \frac{h}{\varepsilon}, \quad (29)$$

т. е. величина припуска обратно пропорциональна коэффициенту локализации.

На рис. 2 показаны кривые, полученные путем точного численного решения дифференциального уравнения (15) и по приближенной формуле (28). При расчете выход по току считался постоянным, в качестве зависимости суммарного электродного потенциала от плотности тока использовалась функция $\varphi(j) = 0,17 \ln(1+j)$. (При этом j измеряется в $\Lambda/\text{м}^2$; при условиях данного численного эксперимента $h = 100 \text{ с}$, в стационарном режиме $\varphi = 2,17$, $k_{loc} = 0,96$).

Результаты приведены в виде зависимостей припуска (отнесенного к s) $Y = d/s$ от десятичного логарифма относительной погрешности копирования $X = -\lg \frac{\Delta s}{s}$. Видно, что кривые, соответствующие точному (сплошная линия) и приближенному решениям совпадают с достаточной точностью. Обе кривые имеют асимптоты с одинаковым углом наклона к оси абсцисс, определяемым дифференциальным коэффициентом локализации (16), что говорит о высокой информативности этой величины. Этот факт можно объяснить тем, что хотя при больших зазорах потенциал отличается от стационарного,

но вклад в общую величину снятого припуска, внесенный на этапе обработки при больших зазорах, достаточно мал. Погрешность, обусловленная упрощением модели при этих условиях, не приводит к существенной потере точности.

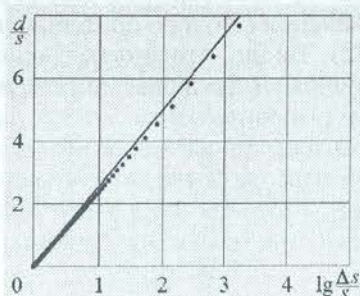


Рис. 2. Сравнение приближенного и точного решений (сплошная линия — точное численное решение, точки — приближенное решение (28))

Для моделирования свойств пассивирующих электролитов использовалась зависимость

$$\eta(j) = \begin{cases} 0, & j \leq \beta, \\ \eta_0 \frac{j-\beta}{j-\gamma}, & j > \beta, \end{cases} \quad (30)$$

где η_0, β, γ — постоянные, определяемые из эксперимента ($\gamma < \beta$).

Представим процесс состоящим из двух этапов. На первом при достаточно больших зазорах s_1 плотность тока $j_1 < \beta$. При этом растворения на второй части ступеньки не происходит и изменение зазора s_1 определяется только движением ЭИ. В момент достижения плотностью тока значения $j_1 = \beta$ начинается процесс растворения. При этом в соответствии с (10) величина зазора

$$s_1 = s_b = \sigma \frac{U - \varphi(\beta)}{\beta}. \quad (31)$$

Время, при котором зазор достигает этого значения, определяется скоростью ЭИ: $t_0 = (h - s_b + s) / V_t$. Тогда величина $\Delta s(t_0) = s_b - s$. Это условие используем в качестве начального. Тогда из (26) имеем

$$V_t(t - t_0) = \frac{s}{k_{loc}} \ln \frac{s_b - s}{\Delta s} + s_b - s - \Delta s.$$

Величина припуска

$$d = V_t t - h - \Delta s = \frac{s}{k_{loc}} \ln \frac{s_b - s}{\Delta s}. \quad (32)$$

Условие точности (19) запишется в виде неравенства

$$d \geq \frac{s}{k_{loc}} \ln \frac{s_b - s}{\varepsilon}.$$

На рис. 3, а показаны результаты, полученные путем точного решения дифференциального уравнения (25) и по приближенной формуле (32). Видно, что кривые, соответствующие точному (сплошная линия) и приближенному решениям, хотя имеют параллельные асимптоты, но различаются более значительно, чем на рис. 2. Разница объясняется существенным отличием процесса ЭХО от стационарного при малых значениях η .

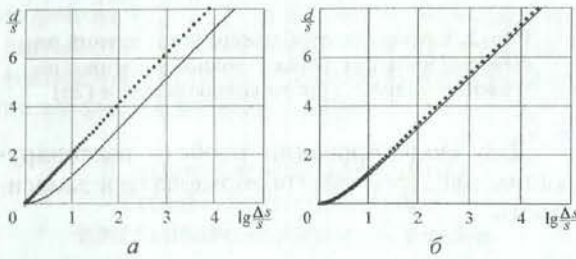


Рис. 3. Сравнение приближенных и точного решений для пассивирующего электролита (сплошная линия — точное численное решение, а — точки — приближенное решение (32), б — точки — уточненное решение (33))

Чтобы уменьшить погрешность, предлагается несколько модернизировать формулу (30). Нетрудно заметить, что производная функции $Y(X)$ в начальной точке равна нулю. В связи с этим добавим к правой части (32) линейную функцию $a(s_b - s - \Delta s)$ так, чтобы при $\Delta s = s_b - s$ выполнялось условие

$$\frac{d}{d\Delta s} \left[\frac{s}{k_{loc}} \ln \frac{s_b - s}{\Delta s} + a(s_b - s - \Delta s) \right] = -\frac{s}{k_{loc}} \frac{1}{\Delta s} - a = 0,$$

т. е. $a = -\frac{s}{k_{loc}} \frac{1}{s_b - s}$. Тогда уточненная зависимость (32) примет вид

$$d = \frac{s}{k_{loc}} \left[\ln \frac{s_b - s}{\Delta s} - \frac{s_b - s - \Delta s}{s_b - s} \right]. \quad (33)$$

Из рис. 3, б следует, что результаты точного и уточненного решений практически совпадают.

Таким образом, коэффициент локализации, определенный в данном разделе, является важным параметром, характеризующим точность процесса ЭХО.

3. ОЦЕНКА СКОРОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ ВЫСОТЫ МИКРОНЕВНОСТЕЙ

Для оценки скорости уменьшения высоты микронеровностей можно использовать модель, аналогичную рассмотренной выше. Отличие заключается в том, что ступенька, высота которой в начальный момент времени равна h , находится на обрабатываемой поверхности, а электрод-инструмент — плоский. Разница зазоров $\Delta s(t) = s_1(t) - s(t)$ в этом случае равна текущей высоте ступеньки (величине шероховатости), а разность $d = V_t t - h + \Delta s$ по-прежнему представляет собой величину припуска.

При этом справедливы все полученные выше выражения. Тогда, обращая (28), найдем

$$\Delta s = h e^{-k_{loc} \frac{d}{s}}. \quad (34)$$

Для получения зависимости $\Delta s(t)$ необходимо прологарифмировать (28)

$$\Delta s e^{k_{loc} \frac{\Delta s}{s}} = h e^{k_{loc} \frac{h - V_t t}{s}}. \quad (35)$$

При больших t (малых Δs) зависимость (35) имеет асимптотику

$$\Delta s = h e^{k_{loc} \frac{h - V_t t}{s}}. \quad (36)$$

При больших k_{loc} (когда растворения на большем зазоре s_1 практически не происходит) зависимость (35) приближается к линейной функции

$$\Delta s = h - V_t t.$$

Зависимости $\Delta s(t)$ при разных значениях k_{loc} приведены на рис. 4.

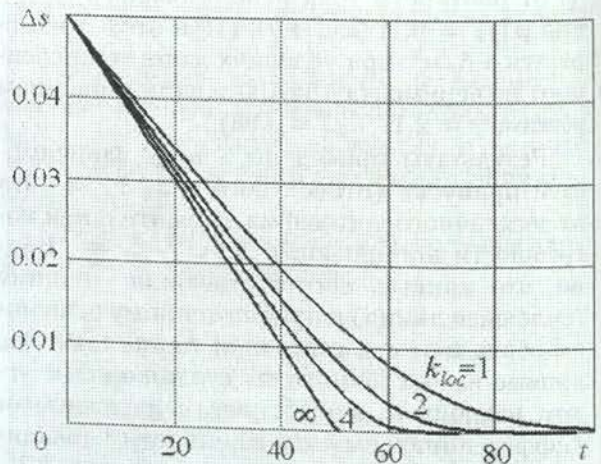


Рис. 4. Зависимости для высоты микронеровностей $\Delta s(t)$ для $h = 0,05$ мм, $s = 0,01$ мм, $v_t = 0,001$ мм/с

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРИ УЧЕТЕ НАГРЕВА ЭЛЕКТРОЛИТА И ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ

Для расчета скорости растворения применяется модель, учитывающая выделение газа и повышение температуры электролита, обусловленное протеканием электрического тока

$$V_i = \frac{dz_i}{dt} = k_{\text{ecm}} \sigma_i \frac{U - \varphi(t, j_i)}{s_i} \eta(j_i, \varphi_{a_i}), \quad (37)$$

$$\frac{dC_{g_i}}{dt} = \frac{\varepsilon_H R T_i}{\mu P_1 s} j_i, \quad (38)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{U - \varphi(t, j_i)}{\rho C_{el} s_i (1 - C_{g_i})} j_i, \quad (39)$$

где $i = 0; 1$ — номер участка ступеньки; ε_H — электрохимический эквивалент водорода; R — универсальная газовая постоянная; μ — молярная масса водорода; P_1 — давление в МЭП; ρ — плотность электролита; C_{el} — теплоемкость электролита; C_g — объемное газонаполнение; T — температура.

Рассмотрим сначала случай стационарных потенциалов $\varphi_i = \varphi_i(j)$ (т.е. длительность импульса тока достаточна велика — порядка нескольких миллисекунд и больше). Выход по току определяется формулой (30), электропроводность электролита σ_i — по формуле

$$\sigma_i = \sigma_b [1 + \alpha (T_i - T_b)] [1 - C_{g_i}]^{3/2}, \quad (40)$$

где α — постоянная величина, σ_b, T_b — эталонные значения электропроводности и температуры. Начальные условия: $z_1 = 1,02 z_0, c_g(0) = 0, T_0 = T_2 = 293 \text{ K}$.

Значения плотностей тока определяются при решении нелинейных уравнений

$$j_i = \sigma_i \frac{U - \varphi(j_i)}{s_i}. \quad (41)$$

Значения коэффициента локализации при высоте ступеньки $h \ll s_i$ приближенно определяется через конечные разности

$$k_{loc} = \frac{s_1}{\Delta z_2} \frac{\Delta z_2 - \Delta z_1}{s_1 - s_2}. \quad (42)$$

Результаты расчетов для двух значений зазоров приведены на рис. 5.

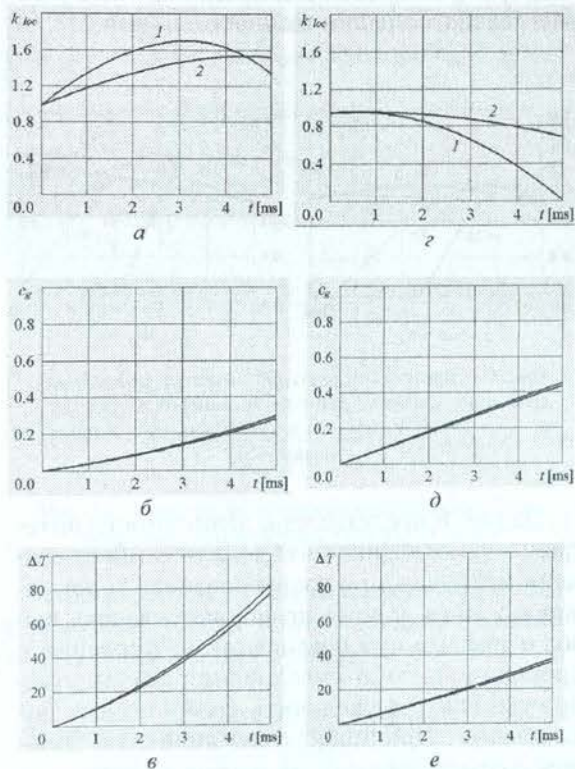


Рис. 5. Результаты расчета коэффициента локализации с учетом нагрева электролита и выделения газа на катоде: а, б, в — при большем зазоре (200 мкм), г, д, е — при меньшем зазоре (50 мкм)

На рис. 5 показаны параметры двух процессов ЭХО, отличающихся значением стационарного зазора. На рис. 5,а,г приведены зависимости двух видов коэффициента локализации: локального (1) и интегрального по импульсу (2). Первый из них характеризует разность скоростей растворения в данный момент времени, второй — разницу снятых припусков с начала импульса.

На рис. 5, б, д даны зависимости газонаполнения, а на рис. 5, е, е — температуры от времени для обеих частей ступеньки.

Результаты численных исследований показывают, что нагрев электролита увеличивает, а выделение газа снижает коэффициент локализации. При этом в начале импульса обычно преобладает влияние нагрева, и величина коэффициента локализации k_{loc} увеличивается. При увеличении времени импульса начинает преобладать влияние газонаполнения. Тогда величина k_{loc} начинает уменьшаться и при некоторых условиях может стать меньше нуля. Это означает, что на более малом зазоре скорость электрохимического растворения становится меньше, чем на большем. Это объясняется меньшим значением

электропроводности смеси электролита и газа в связи с большим газонаполнением.

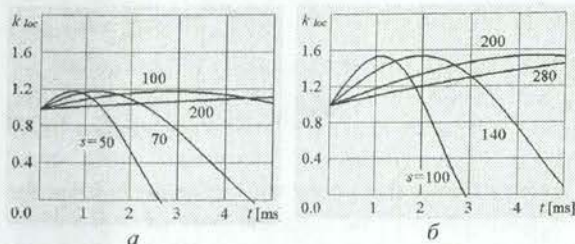


Рис. 6. Зависимости коэффициента локализации при разных зазорах и напряжениях U : а — $U = 10$ В, б — $U = 20$ В (зазоры s даны в мкм)

На рис. 6 представлены зависимости интегрального коэффициента локализации от времени импульса при разных зазорах и напряжениях. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что при повышении напряжения и пропорционального увеличения зазора можно существенно увеличить коэффициент локализации. Причиной этого являются большие затраты энергии на нагрев электролита по сравнению с затратами энергии на выделение газа, что сказывается положительно на точность копирования ступеньки.

Таким образом, было исследовано влияние различных факторов на точность обработки. Показано, что параметром, определяющим величину припуска, необходимую для достижения заданной точности копирования является коэффициент локализации, который представляет собой отношение относительной скорости растворения при реальном процессе ЭХО к относительной скорости растворения при идеальном процессе (при постоянных потенциалах поляризации электродов и выходе по току).

Результаты численных исследований показали, что за счет соответствующего выбора параметров процесса (напряжение, величина стационарного зазора) точность может быть существенно увеличена.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛОКАЛИЗАЦИИ С УЧЕТОМ ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПОТЕНЦИАЛОВ

Перейдем к общему случаю, когда величины анодного и катодного потенциалов зависят как от плотности тока, так и от времени. На рис. 7 и 8 изображены экспериментальные зависимости $\varphi_a(t, j)$ и $\varphi_k(t, j)$ [7].

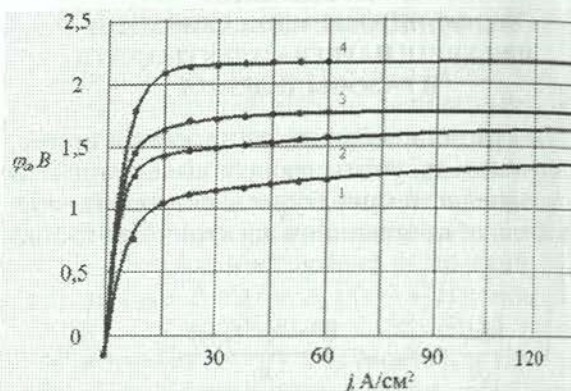


Рис. 7. Экспериментальные зависимости анодного потенциала от плотности тока при длительности импульса t : 1 (1), 5 (2), 10 (3) и 50 мкс (4)

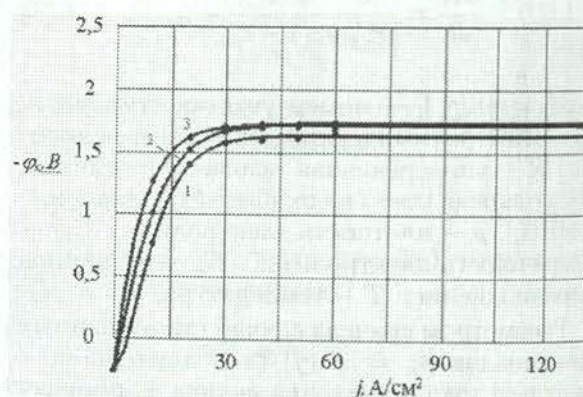


Рис. 8. Экспериментальные зависимости катодного потенциала от плотности тока при длительности импульса t : 5 (1), 10 (2), 100 мкс (3)

Для аппроксимации экспериментальных зависимостей по плотности рабочего тока использовалось представление

$$\begin{aligned} \varphi(t_i, j) &= \varphi_0 + ae^{-bj} + ce^{-dj}, \\ a &= a(t_i), \\ b &= b(t_i), \\ c &= c(t_i), \\ d &= d(t_i) \end{aligned} \quad (43)$$

Для получения зависимостей ЭП от времени использовалась кусочно-линейная интерполяция или аппроксимация экспоненциальной зависимостью методом наименьших квадратов.

В течение импульса рабочего тока происходит увеличение ЭП, в паузе между импульсами — уменьшение (рис. 9). При выключении тока эта функция аппроксимируется экспоненциальной зависимостью

$$\varphi_a(t) = 1,67 - e^{0,11} (1 - e^{-0,02t}). \quad (44)$$

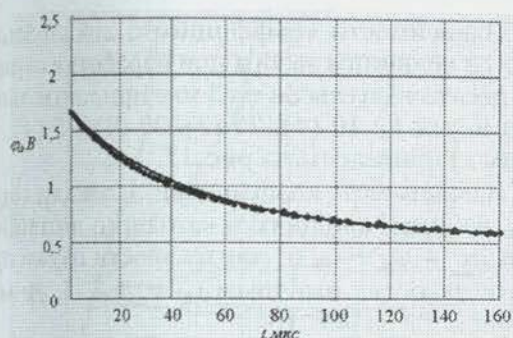


Рис. 9. Зависимости потенциала от длительности паузы

При подаче серии импульсов происходит изменение формы зависимости анодного потенциала (рис. 10). Предполагается, что электрохимическое растворение начинается с момента, когда анодный потенциал достигает некоторого критического значения потенциала φ_{cr} . При малой длительности импульса это может являться причиной увеличения коэффициента локализации (рис. 16). Однако при уменьшении длительности паузы между импульсами t_{II} значение потенциала при увеличении номера импульса в серии возрастает (рис. 14), что приводит к уменьшению эффекта локализации.

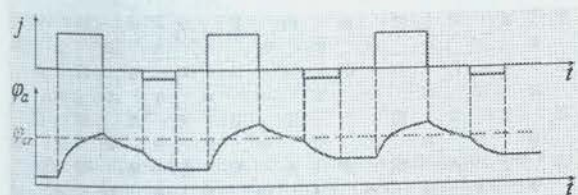


Рис. 10. Изменение анодного потенциала при обработке серией биполярных импульсов тока

Скорость растворения с учетом выделения газа и повышения температуры электролита определяется при решении уравнений (37)–(39), а выход по току — зависимостью

$$\eta(j, \varphi_a) = \begin{cases} 0, & \varphi_a < \varphi_{cr}, \\ \eta(j), & \varphi_a \geq \varphi_{cr}. \end{cases} \quad (45)$$

Значения плотностей тока определяются при каждом t из решения нелинейных уравнений

$$j_i = \sigma_i \frac{U - \varphi(t, j_i)}{s_i}. \quad (46)$$

Для использования аппроксимированных экспериментальных зависимостей при

переходе от импульса к паузе необходимо находить величины сдвигов по времени (см. рис. 11) Δt_{ai} и Δt_{ki} из условия

$$\begin{aligned} \varphi_a^k(\Delta t_{ai}) &= \varphi_a^k(t, j_i), \\ \varphi_k^k(\Delta t_{ki}) &= \varphi_k^k(t, j_i). \end{aligned} \quad (47)$$

где k — номер импульса.

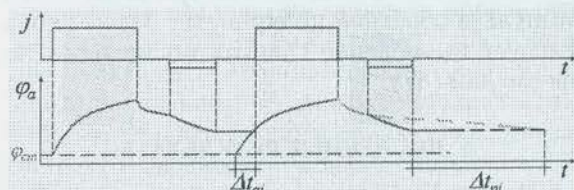


Рис. 11. Изменение анодного потенциала φ под действием биполярных импульсов тока j

При переходе от паузы к следующему импульсу необходимо найти начальные плотности тока из решения уравнений

$$j_i = \sigma_i \frac{U - \varphi_a^k(\Delta t_{ai} + t_p) - \varphi_k^k(\Delta t_{ki} + t_p)}{s_i}, \quad (48)$$

а затем сдвиги по времени экспериментальных зависимостей анодного и катодного потенциалов δt_{ai} , δt_{ki}

$$\begin{aligned} \varphi_a(j_i, \delta t_{ai}) &= \varphi_a^k(\Delta t_{ai} + t_{II}), \\ \varphi_k(j_i, \delta t_{ki}) &= \varphi_k^k(\Delta t_{ki} + t_{II}). \end{aligned} \quad (49)$$

Затем полагаем

$$\begin{aligned} \varphi_a^{k+1}(j_i, t) &= \varphi_a(j_i, t + \delta t_{ai}), \\ \varphi_k^{k+1}(j_i, t) &= \varphi_k(j_i, t + \delta t_{ai}). \end{aligned} \quad (50)$$

Значения коэффициента локализации приближенно определяется через конечные разности

$$k_{loc} = \frac{s_1}{s_2} \cdot \frac{z_2 - z_1}{s_1 - s_2}. \quad (51)$$

Для расчета процесса при подаче в паузу импульса обратной полярности используется видоизмененный вариант алгоритма.

После вычисления сдвигов по времени по формулам (47) вычисляются плотности тока согласно (48), где в качестве времени паузы t_{II} используется время первой части паузы t_{II1} , а в качестве U — напряжение обратного импульса. Затем необходимо решить систему уравнений (49), где вместо зависимостей анодного и катодного потенциалов $\varphi_a(t, j)$,

$\varphi_k(t, j)$ используются аналогичные зависимости, полученные экспериментально для импульсов обратной полярности

$$\varphi = 2,004 - 0,00686j - 0,00937t - 0,00101jt,$$

где j — плотность тока (A/cm^2), t — время (мкс).

Далее по этой же формуле рассчитываются изменения потенциалов за время действия импульса обратной полярности. Затем снова следует вычисление сдвигов по времени по формулам (47).

6. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 12, 13 приведены зависимости объемного газонаполнения и изменения температуры электролита от времени для серии из десяти импульсов.

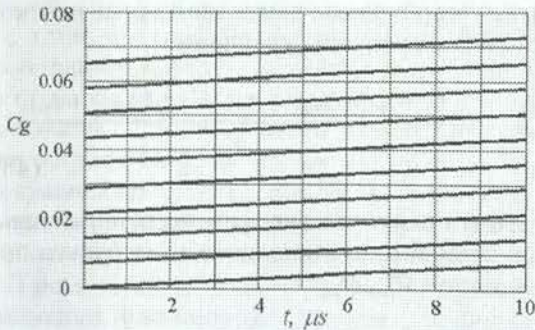


Рис. 12. Зависимости газонаполнения от длительности импульса при обработке серией из десяти импульсов

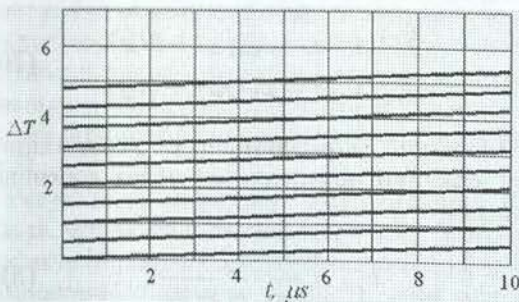


Рис. 13. Зависимости изменения температуры электролита от длительности импульса при обработке серией из десяти импульсов

Графики изменения анодного и катодного потенциалов при двух длительностях паузы: $t_{п} = 2$ мкс и $t_{п} = 20$ мкс приведены на рис. 14, 15.

Зависимости коэффициента локализации k_{loc} от длительности паузы при длительностях импульса $t = 3$ мкс и зазорах, равных 5, 10, 20, 50 мкм приведены на рис. 16.

Зависимости коэффициента локализации k_{loc} от величины зазора при обработке серией из десяти импульсов по 3 мкс при длительности паузы $t_{п}$: 10 (1), 20 (2), 30 (3), 35 (4), 40 мкс (5) приведены на рис. 17.

Зависимости коэффициента локализации k_{loc} и суммы анодного и катодного потенциалов $\varphi_{\Sigma} = \varphi_a + \varphi_k$ от длительности паузы при длительностях импульса $t_{и} = 3, 4, 5, 10$ мкс приведены на рис. 18.

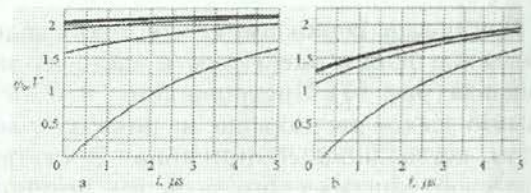


Рис. 14. Зависимости изменения анодного потенциала от времени при обработке серией из десяти импульсов по 5 мкс при $t_{п} = 2$ мкс (а) и 20 мкс (б)

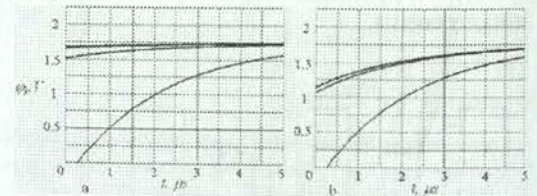


Рис. 15. Зависимости изменения катодного потенциала от времени при обработке серией из десяти импульсов по 5 мкс при $t_{п} = 2$ мкс (а) и 20 мкс (б)

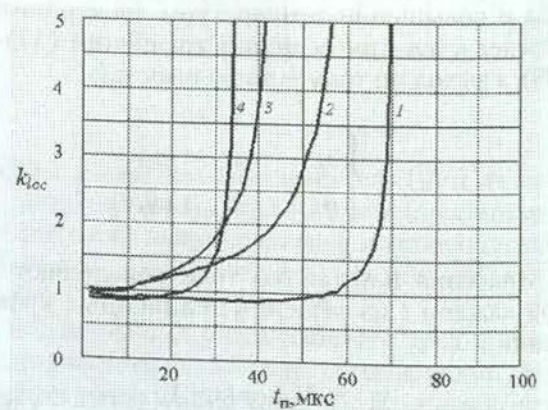


Рис. 16. Зависимости коэффициента локализации от длительности паузы при обработке серией из десяти импульсов по 3 мкс при величине зазора s : 5 (1), 10 (2), 20 (3), 50 мкм (4)

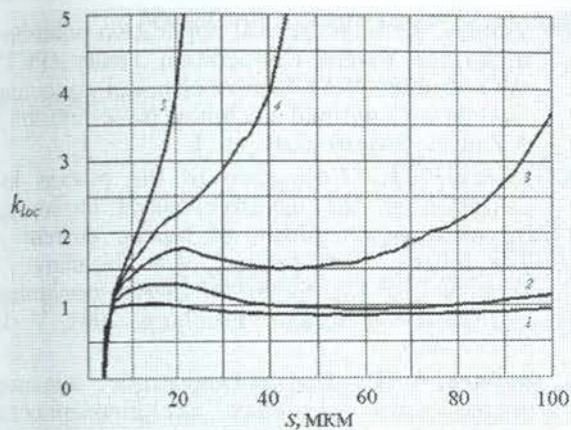


Рис. 17. Зависимости коэффициента локализации от зазора при обработке серий из десяти импульсов по 3 мкс при длительности паузы t_{π} : 10 (1), 20 (2), 30 (3), 35 (4), 40 мкс (5)

7. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРИ ЗАДАННОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА

С уменьшением длительности импульса тока и увеличением длительности паузы между импульсами растет коэффициент локализации k_{loc} , но падает производительность обработки. Задача оптимизации может быть поставлена следующим образом: определить условия (значения амплитуды и длительности рабочего и отрицательного импульсов, длительности паузы) достижения максимальной производительности при обеспечении заданного коэффициента локализации.

$$\begin{cases} V_i = k_{есм} \sigma_i \frac{U - \varphi(t, j_i)}{s_i} \eta(j_i, \varphi_{a_i}) \rightarrow \max, \\ k_{loc} \geq k^*_{loc} \end{cases} \quad (52)$$

В частном случае задача оптимизации может быть сформулирована так: определить длительность паузы t_{π} и длительность рабочего импульса тока t_{π} (при прочих равных условиях), при которых достигаются максимальная производительность и заданный коэффициент локализации. Из рис. 19 видно, что существуют оптимальные длительности импульса и паузы между ними, при которых обеспечиваются заданный коэффициент локализации и максимальная производительность.

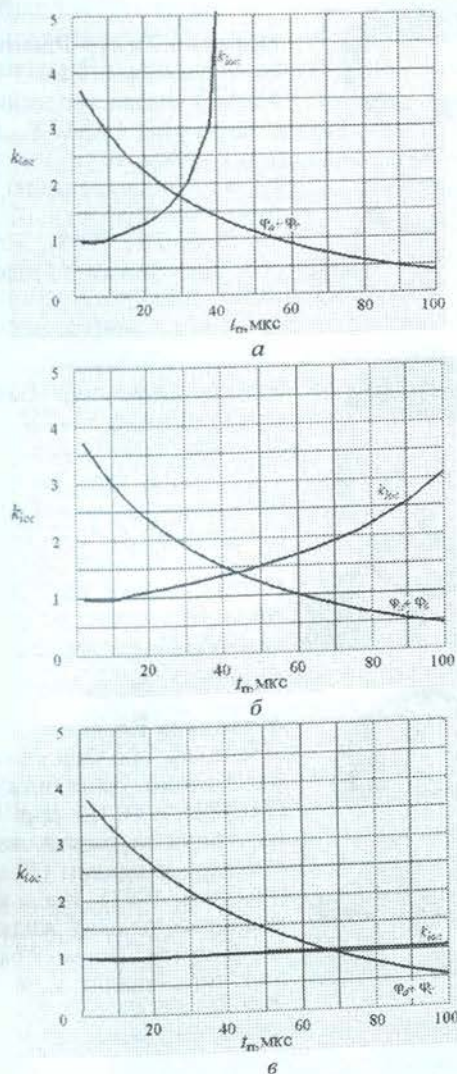


Рис. 18. Зависимости коэффициента локализации от длительности паузы при обработке серий из десяти импульсов по: 3 (а), 4 (б) и 10 мкс (в)

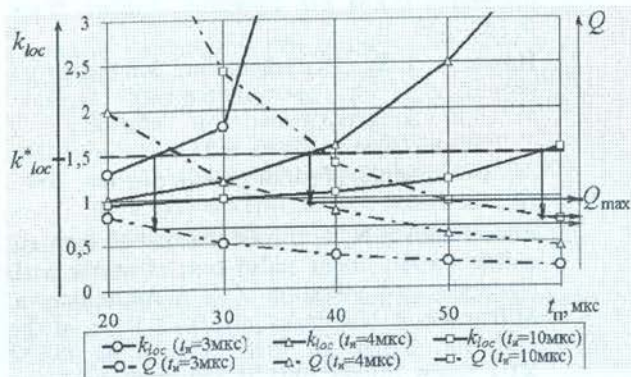


Рис. 19. Зависимости коэффициента локализации и производительности от длительности паузы между импульсами при различных длительностях импульсов; k^*_{loc} — заданный коэффициент локализации

ВЫВОДЫ

Разработана модель формообразования при ЭХО биполярными импульсами микросекундной длительности, учитывающая нестационарный характер установления

анодного и катодного потенциалов в течение действия импульса и влияния на анодный потенциал предшествующего импульса отрицательной полярности, а также изменение температуры и газонаполнения электролита в МЭП.

Проведенные исследования показали высокую информативность предложенного критерия оценки локализации k_{loc} . Зависимости k_{loc} от различных параметров обработки (длительности импульса, паузы между импульсами, межэлектродного зазора и др.) могут носить экстремальный характер, например, нагрев электролита увеличивает, а выделение газа снижает коэффициент локализации. При увеличении длительности импульса начинает преобладать влияние газонаполнения. В этом случае величина k_{loc} начинает уменьшаться и при некоторых условиях может стать меньше единицы, т. е. будет происходить ухудшение точности копирования.

Поставлена и решена задача оптимизации параметров процесса, включая согласование параметров предшествующего и рабочего импульса, для достижения максимальной производительности при заданном коэффициенте локализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zaitsev, A. N.** Performing holes of small diameter in steel foil using method of multi-electrode precise electrochemical machining / A. N. Zaitsev, A. L. Belogorsky, I. L. Agafonov [etc.] // Proc. of the 12th Int. Symp. for Electro-machining ISEM XII. Germany, Aachen, 1998. P. 555-564.
2. **Идрисов, Т. Р.** Исследование электродных потенциалов в нестационарных условиях при электрохимической обработке / Т. Р. Идрисов, А. П. Зайцев, П. А. Амирханова // Электронная обработка материалов. 2001. № 1. С. 4-8.
3. **Amirchanova, N. A.** Investigation of cathode sedimentation under pulse ccm of steels with electrode tool vibration / N. A. Amirchanova, M. Brussec, A. N. Zaitsev [et al] // Proc. of the 13th Int. Symp. for Electromachining ISEM XIII. Spain, Bilbao. 2001. P. 313-325.
4. **Zaitsev, A.** International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 02/090029 A1 Method For a removal of Cathode Depositions by Means of Bipolar Pulses / A. Zaitsev, N. Gimaev, V. Kutsenko [et al].

5. **Zaitsev, A.** International application published under the Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 02/090030 A1 Electro-chemical machining method with optimal machining pulse duration / A. Zaitsev, S. Bezroukov [etc.].
6. **Idrisov, T. R.** Estimation of the process localization at the electro-chemical machining by microsecond pulses of bipolar current / T. R. Idrisov, A. N. Zaitsev, V. P. Zhitnikov // Proc. of 14th Int. Symp. for Electro-machining ISEM XIV. Scotland, Edinburg, 2004. V. 1, P. 479-485.
7. **Зайцев, А. Н.** Высокоскоростное анодное растворение в условиях нестационарности электродных потенциалов / А. Н. Зайцев, В. П. Житников, Т. Р. Идрисов, М. С. Смирнов [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. А. П. Зайцева. Уфа: Гилем, 2005. 220 с.

ОБ АВТОРАХ



Идрисов Тимур Рашитович, ст. науч. сотр. НИИШТЭХО УГАТУ, магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999), канд. техн. наук по технологии и оборудованию механич. и физико-техн. обработки (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. электрохим. методов обработки.



Зайцев Александр Николаевич, проф. каф. ОиТСП УГАТУ. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1972). Д-р техн. наук по процессам физ.-техн. обработки и САПР (защ. в Воронежск. политехн. ин-те, 1991). Иссл. в обл. процессов электрофиз. и электрохим. обработки материалов.



Житников Владимир Павлович, проф., зав. каф. компьютер. математики. Дипл. инж.-физ. (МФТИ, 1973). Д-р физ.-мат. наук по механ. жидкости, газа и плазмы (Казанск. гос. ун-т, 1993). Иссл. в обл. волновых течений жидкости, электрохим. формообразования, числ.-аналит. методов.