

Обоснование выбора длительностей импульсов напряжения при электрохимической размерной микрообработке нано- и микросекундными импульсами

* В. В. Любимов, В. М. Волгин, И. В. Гнидина

Тульский государственный университет,
г. Тула, 300012, Россия, *e-mail: lvv@tsu.tula.ru

Поступила 22.07.2019

После доработки 17.09.2019

Принята к публикации 20.09.2019

Обосновывается выбор рационального диапазона длительностей импульсов напряжения на основе сравнения времени начала анодного растворения с временем заряжения двойного электрического слоя при электрохимической размерной микрообработке. Подтвержден диапазон времени развития коротких замыканий как предела максимальной длительности импульса напряжения. Выполнено моделирование размерной электрохимической обработки при использовании ультракоротких импульсов напряжения без учета изменения свойств межэлектродной среды и в предположении, что кинетика анодного растворения определяется уравнением Батлера-Фольмера. Выявлены зоны импульсов плотности тока, различно влияющие на процесс размерной электрохимической микрообработки. Предложен подход к выбору эффективной длительности импульса напряжения на основе анализа характера временных зон процесса.

Ключевые слова: электрохимическая микрообработка, длительность импульса, двойной электрический слой, ток заряжения, фарадеевский ток.

УДК 621.9.047

DOI: 10.5281/zenodo.3528144

ВВЕДЕНИЕ

Электрохимическая размерная микрообработка (ЭХРМО) является высокоэффективным методом обработки современных конструкционных материалов, особенно труднообрабатываемых [1–4].

Современная ЭХРМО обеспечивается энергетически и кинематически в основном в импульсном или импульсно-циклическом режиме [4–6]. По мере развития названных режимов повышения точности обработки применяются меньшие межэлектродные зазоры (МЭЗ) (до десятков микрометров) и ультракороткие импульсы напряжения [7, 8].

Уменьшение межэлектродных зазоров (МЭЗ) до названных величин привело к существенному уменьшению рабочего объема межэлектродного промежутка (МЭП), увеличению количества продуктов анодного растворения в единице объема МЭП, повышению плотности тока (до 200–2000 А/см²), температуры межэлектродной среды [7].

В результате таких явлений возросла вероятность нарушения стабильности процесса и возникновения коротких замыканий [9, 10]. Короткие замыкания между электродами приводят к разрушению электрода-инструмента и электрода-заготовки. Это явление стало основным недостатком ЭХРМО. Существующие методы борьбы с короткими замыканиями при ЭХРМО опираются в основном на прерывание возникшего короткого замыкания [9, 10]. Более радикальным представляется исключение этого

явления за счет применения более коротких импульсов напряжения по сравнению с временем развития короткого замыкания и выбора рациональных диапазонов скважности импульсов напряжения в пакете импульсов напряжения и межпакетной скважности после периодического контроля МЭЗ. Время развития плазменных каналов в жидкостях исследовано в работах [11–14].

В то же время уменьшение длительности импульсов напряжения $t_{\text{имп}}$ привело к ее сравнимости со временем заряжения двойного электрического слоя (ДЭС) [15–23]. Это вызвало необходимость учета преобладания токов заряжения ДЭС над фарадеевскими токами, которые характеризуют скорость анодного растворения материала обрабатываемой заготовки. Современная элементная база источников питания позволяет получать импульсы напряжения большой мощности при длительности порядка десятков наносекунд.

Таким образом, цель работы – обоснование эффективного диапазона длительностей импульсов напряжения, нижняя граница которого определяется временем заряжения ДЭС, а верхняя граница определяется временем развития короткого замыкания.

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Поставленная задача распадается на две подзадачи определения:

1) минимально допустимой длительности импульса напряжения, исходя из условия максимальной скорости выравнивания исходной погрешности;

2) максимально допустимой длительности импульса напряжения, исходя из условия предотвращения возникновения предусловий развития короткого замыкания.

Начальная стадия импульса напряжения характеризуется конкурентными токами заряжения двойного электрического слоя и фарадеевскими токами.

Во время заряжения ДЭС в электрохимической ячейке протекают максимальные токи заряжения $i_{дЭС}$ и минимальные фарадеевские токи i_{ϕ} . Время заряжения ДЭС $t_{дЭС}$ различно для зон обрабатываемой поверхности с различными межэлектродными зазорами s , то есть $t_{дЭС}^0 < t_{дЭС}^1$.

Для описания процесса ЭХРМО в условиях сравнимости $t_{имп}$ и $t_{дЭС}$ выполнено моделирование процесса с ультракороткими импульсами.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭХРМО УЛЬТРАКОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ

При получении математической модели будем учитывать омическое сопротивление электролита R , емкость двойного электрического слоя на аноде (заготовке) C_a и сопротивление, обусловленное протеканием электрохимической реакции r (рис. 1).

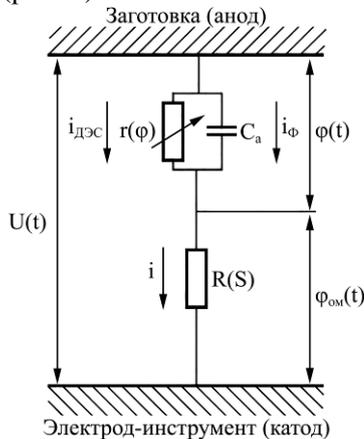


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема ЭХРМО с ультракороткими импульсами с учетом двойного слоя только на аноде (заготовке).

Для упрощения математического описания будем использовать локально-одномерное приближение, в рамках которого омические потери в объеме раствора могут быть определены с использованием следующего соотношения:

$$\varphi_{ом} = \frac{i \cdot S}{\sigma}, \quad (1)$$

где $i = i_{дЭС} + i_{\phi}$ – плотность тока; $i_{дЭС} = C_a d\varphi_a / dt$ – плотность тока заряжения

двойного электрического слоя;

$$i_{\phi} = i_{0,a} \left[\exp\left(\frac{(1-\alpha)nF}{RT} \varphi_a\right) - \exp\left(-\frac{\alpha nF}{RT} \varphi_a\right) \right] -$$

фарадеевская плотность тока (плотность тока анодного растворения металла обрабатываемой заготовки); S – межэлектродный зазор; σ – удельная электропроводность раствора электролита.

Если пренебречь эффектом ДЭС на катоде и не учитывать его поляризацию (рис. 1), то математическая модель ЭХРМО ультракороткими импульсами сведется к одному дифференциальному уравнению:

$$C_a \frac{d\varphi_a}{dt} + i_{0,a} \left[\exp\left(\frac{(1-\alpha)nF}{RT} \varphi_a\right) - \exp\left(-\frac{\alpha nF}{RT} \varphi_a\right) \right] = \sigma \frac{U(t) - \varphi_a}{S}. \quad (2)$$

Начальное условие для уравнения (2) следует задавать в следующем виде:

$$\varphi_a \Big|_{t=0} = \varphi_{a,0}. \quad (3)$$

В математической модели не учитывается изменение свойств межэлектродной среды из-за тепло- и газовыделения, а также образование на поверхности обрабатываемой заготовки поверхностных слоев различной природы, например оксидных. Допустимость использования таких упрощений обусловлена тем, что, несмотря на достижение нано- и микросекундными импульсами при ЭХРМО большой плотности тока в импульсе (до 1000 А/см² и более), ввиду малой длительности импульсов за время одного импульса в МЭЗ выделяется весьма небольшое количество энергии, что приводит к повышению температуры всего на несколько градусов, а газовые пузырьки вообще не успевают образовываться. Для обеспечения высокой локализации ЭХРМО обычно проводят при большой скважности, чтобы за время паузы успевало произойти существенное уменьшение заряда двойного электрического слоя. При таких условиях обеспечивается практически полное восстановление свойств межэлектродной среды, в том числе и ее температуры. В связи с этим при моделировании ЭХРМО нано- и микросекундными импульсами можно не учитывать термокинетические явления [24, 25], характерные для высокоскоростных электродных процессов. Кроме того, ЭХРМО обычно проводят в активирующих электролитах, в которых достаточно хорошо растворяются продукты обработки. Это позволяет в значительной степени облегчить процесс эвакуации продуктов обработки и исключить образование поверхностных слоев,

Таблица 1. Зависимости постоянной времени заряжения двойного электрического слоя от плотности тока обмена и установившегося значения фарадеевского тока

$i_0, \text{A}/\text{m}^2$	Постоянная времени заряжения ДЭС (при различных значениях i_Φ^∞), нс				
	$i_\Phi^\infty = 10 \text{ A}/\text{cm}^2$	$i_\Phi^\infty = 50 \text{ A}/\text{cm}^2$	$i_\Phi^\infty = 100 \text{ A}/\text{cm}^2$	$i_\Phi^\infty = 250 \text{ A}/\text{cm}^2$	$i_\Phi^\infty = 500 \text{ A}/\text{cm}^2$
10^{-4}	1036,16	223,33	115,13	47,88	24,64
10^{-3}	921,03	200,30	103,62	43,28	22,33
10^{-2}	805,90	177,28	92,10	38,67	20,03
10^{-1}	690,78	154,25	80,59	34,07	17,73
10^0	575,65	131,22	69,08	29,46	15,42
10^1	460,52	108,20	57,56	24,86	13,12
10^2	345,39	85,17	46,05	20,25	10,82
10^3	230,26	62,15	34,54	15,65	8,52
10^4	115,13	39,12	23,03	11,04	6,21

препятствующих нормальному протеканию процесса. В связи с этим для описания кинетики анодного растворения металла заготовки допустимо использование уравнения Батлера-Фольмера, которое позволяет достаточно точно учитывать кинетику электрохимической реакции как при малых, так и при больших потенциалах электрода.

В общем случае решение уравнений (2) возможно лишь с использованием численных методов. Однако при использовании дополнительных допущений можно получить аналитическое решение. Будем считать, что $\alpha = 0,5$, $i_0 = i_{0,a}$, $C = C_a$, $\varphi = \varphi_a$ и $\varphi_0 = \varphi_{a,0}$. При этом уравнение (2) может быть записано в следующем виде:

$$C \frac{d\varphi}{dt} + 2i_0 \sinh(A\varphi) = \sigma \frac{U(t) - \varphi}{S}, \quad (4)$$

где $A = \frac{nF}{2RT}$ – параметр;

$\sinh(A\varphi) = [\exp(A\varphi) - \exp(-A\varphi)]/2$ – гиперболический синус.

Часто потенциал электрода имеет существенно меньшее значение, чем приложенное напряжение. В этом случае потенциалом электрода в правой части уравнения (4) можно пренебречь. Если, кроме того, пренебречь передним фронтом импульса напряжения, то уравнение (4) можно записать в следующем виде:

$$C \frac{d\varphi}{dt} + 2i_0 \sinh(A\varphi) = i_\Phi^\infty, \quad (5)$$

где $i_\Phi^\infty = \sigma \frac{U}{S}$ – установившееся значение фарадеевской плотности тока.

Аналитическое решение уравнения (5), удовлетворяющее начальному условию (4), имеет следующий вид:

$$\varphi(t) = \frac{1}{A} \ln \left[\frac{1}{2i_0} \left(\tanh \left(\frac{At}{2C} \sqrt{(i_\Phi^\infty)^2 + 4i_0^2} - \arctan h \left(\frac{i_\Phi^\infty - 2i_0 \exp(A\varphi_0)}{\sqrt{(i_\Phi^\infty)^2 + 4i_0^2}} \right) \right) \sqrt{(i_\Phi^\infty)^2 + 4i_0^2 + i_\Phi^\infty} \right) \right]. \quad (6)$$

Из уравнения (5) следует, что начальная скорость изменения потенциала ДЭС равна i_Φ^∞ / C , а стационарное значение потенциала после полного заряжения ДЭС (в предположении, что катодной составляющей можно пренебречь) $\varphi^\infty = \frac{1}{A} \ln \frac{i_\Phi^\infty}{i_0}$, тогда выражение для постоянной времени заряжения ДЭС:

$$\tau = \frac{C}{A i_\Phi^\infty} \ln \frac{i_\Phi^\infty}{i_0}. \quad (7)$$

В табл. 1 приведены значения постоянной времени при различных значениях плотности тока обмена i_0 и установившемся значении фарадеевской плотности тока i_Φ^∞ , рассчитанные при $C = 0,2 \text{ Ф}/\text{м}^2$ и $A = 40$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При моделировании производилось численное решение уравнения (2) при следующих значениях параметров: $\sigma = 5 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, $U_{\text{имп}} = 4 \text{ В}$, $U_{\text{п}} = 0 \text{ В}$, $t_{\text{имп}} = 10 \text{ нс}$, $t_{\text{п}} = 50 \text{ нс}$, $t_{\text{фронт}} = 2 \text{ нс}$, $\alpha = 0,5$, $n = 2$, $C = 0,2 \text{ Ф}/\text{м}^2$, $i_0 = 100 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$.

Были выполнены расчеты общего тока i , тока заряжения ДЭС $i_{\text{ДЭС}}$, фарадеевского тока i_Φ для двух межэлектродных зазоров расчетной ступеньки $s_0 = 2 \text{ мкм}$ и $s_1 = 10 \text{ мкм}$ (рис. 2).

Рассмотрено соотношение токов заряжения ДЭС и фарадеевских токов для ступеньки с

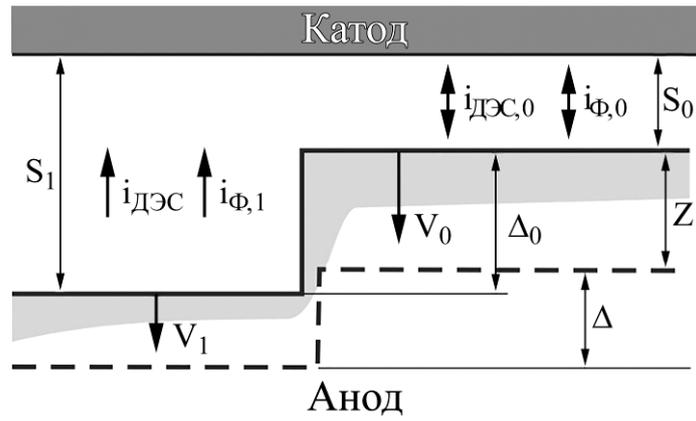


Рис. 2. Схема выравнивания исходной погрешности Δ_0 ; V_0 и V_1 – скорости анодного растворения в зоне минимального МЭЗ S_0 и максимального МЭЗ S_1 соответственно; Δ – текущая погрешность; z – припуск.

Таблица 2. Зоны протекания процесса электрохимической микрообработки

Зона	$S_0 = 2 \text{ мкм}$	$S_1 = 10 \text{ мкм}$
I	$i_{дэс} > 0$ $i_{ф} = 0$	$i_{дэс} > 0$ $i_{ф} = 0$
II	$i_{дэс} > 0$ $i_{ф} > 0$	$i_{дэс} > 0$ $i_{ф} = 0$
III	$i_{дэс} = 0$ $i_{ф} > 0$	$i_{дэс} > 0$ $i_{ф} > 0$
IV	$i_{дэс} = 0$ $i_{ф} > 0$	$i_{дэс} = 0$ $i_{ф} > 0$

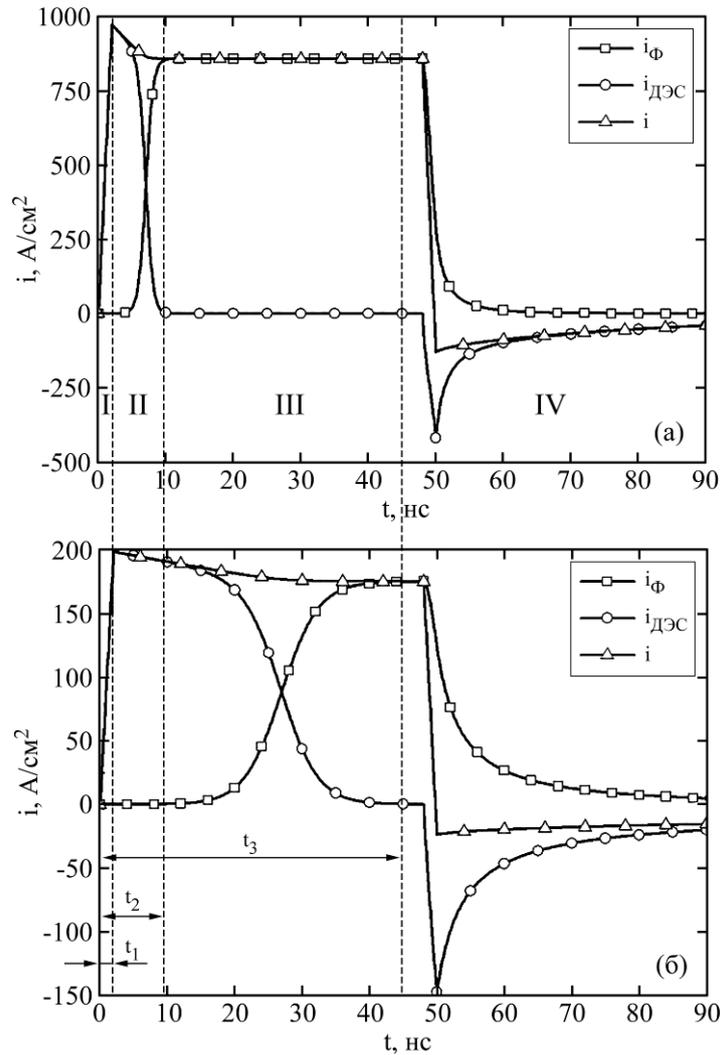


Рис. 3. Функции токов зарядки двойного электрического слоя $i_{дэс}$, фарадеевских токов $i_{ф}$, общих токов i .

межэлектродными зазорами $S_0 = 2$ мкм и $S_1 = 10$ мкм (см. рис. 2). Для таких условий начальная погрешность Δ составит 0,08 мкм.

На полученных в результате моделирования зависимостях по соотношениям $i_{ДЭС}$ и i_{Φ} (рис. 3) выделены четыре зоны протекания процесса ЭХРМО с точки зрения производительности и эффективности процесса выравнивания исходной погрешности (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что зона I по длительности соответствует времени отсутствия анодного растворения на обоих межэлектродных зазорах S_0 и S_1 ступеньки. Длительность импульса напряжения всегда должна быть больше t_1 , то есть $t_{имп} > t_1$.

Зона II длительностью соответствует конкуренции тока заряжения ДЭС и фарадеевского тока в зоне малого межэлектродного зазора $S_0 = 2$ мкм.

Конкуренция токов приводит к снижению скорости анодного растворения и скорости выравнивания исходной погрешности обработки Δ_0 .

Наиболее эффективной зоной обработки с точки зрения скорости анодного растворения (производительности процесса) является зона III. Для обеспечения максимальной скорости выравнивания наиболее эффективны импульсы тока длительностью $t_{имп} < t_2$.

В диапазоне IV скорость анодного растворения определяется величиной при $S_0 = 2$ мкм, а скорость выравнивания погрешности – соотношением межэлектродных зазоров как Δ .

По мере выравнивания исходной погрешности Δ_0 (рис. 2) происходит сужение зоны эффективной обработки III. Поэтому для получения более высокой точности обработки необходимо применение более коротких импульсов напряжения.

ВЫБОР МАКСИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ

В основу выбора максимальной величины длительности импульса напряжения заложен принцип исключения условий, способствующих возникновению пробоя электролита и возникновению короткого замыкания.

Из работ [11–14] известно, что пробоем межэлектродного промежутка предшествует период развития короткого замыкания. Этот период зависит от большого числа факторов [12], среди которых важнейшими являются:

- напряженность электрического поля в электролите;
- электропроводность электролита;
- теплопроводность электролита;

– наличие повышенного давления и протока электролита;

– тип напряжения (постоянное, импульсное).

В работе [12] время задержки пробоя предложено оценить по зависимости:

$$t_{ркз} = \frac{c\rho}{0,24\sigma \cdot E^2}, \quad (8)$$

где c , ρ – теплоемкость и плотность жидкости (электролита) соответственно; E – напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке В/см.

Из зависимости (8) следует, что наиболее существенно время задержки пробоя зависит от напряженности электрического поля в электролите.

Кроме того, E влияет на вид пробоя и при $E > 36\text{--}40$ кВ/см пробой из теплового переходит в стримерный (лидерный). В диапазоне МЭЗ ($s = 50\text{--}100$ мкм) и напряжений (12–18 В), используемых в традиционных режимах ЭХРМО, E составляет 2–4 кВ/см. Переход к меньшим МЭЗ ($s = 1\text{--}10$ мкм) приводит к существенному увеличению напряженности электрического поля в МЭЗ и переходу на стримерный механизм пробоя. Таким образом, возможны оба механизма пробоя МЭП по тепловому механизму с предварительным образованием газового мостика или с образованием стримера [12]. Из работ [11–14] следует, что время задержки пробоя находится в пределах от 240 до 800 нс.

Таким образом, для наиболее применяемых в качестве электролитов водных растворов нейтральных солей можно считать, что для недопущения условий возникновения короткого замыкания необходимо выполнение условия $t_{имп} < 240\text{--}800$ нс.

Следовательно, учитывая, что длительность импульса напряжения $t_{имп}$ не должна быть меньше $t_{ДЭС}$, то диапазон длительностей импульсов, наиболее эффективных с точки зрения точности обработки и надежности процесса (недопущение коротких замыканий) для рассмотренных условий, должен находиться в пределах $t_{имп} = (6\text{--}240 \text{ нс})\text{--}(800\text{--}1000 \text{ нс})$.

Из этого условия следует, что обработка при малых плотностях тока (порядка 10 А/см^2) малоэффективна, так как время заряжения перекрывает время возможного развития короткого замыкания $t_{ДЭС} > t_{ркз}$.

Время заряжения ДЭС зависит от плотности токов обмена и величин общего тока в МЭЗ (см. табл. 1). Из чего следует, что время заряжения изменяется в очень широком диапазоне. Для рассмотренных условий $t = 6\text{--}1000$ нс. Длительное время заряжения при малых

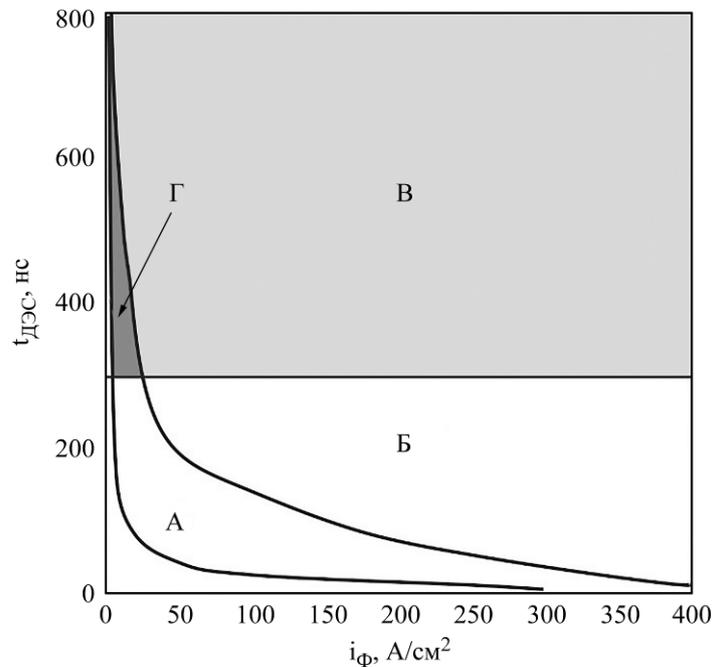


Рис. 4. Зависимости времени зарядки двойного электрического слоя от установившихся величин фарадеевских токов: *A* – зона длительностей импульсов напряжения, соответствующих времени зарядки двойного электрического слоя; *B* – зона эффективных импульсов напряжения; *B* – зона импульсов напряжения с высокой вероятностью коротких замыканий; *Г* – зона импульсов напряжения с высокой вероятностью коротких замыканий при отсутствии анодного растворения.

Таблица 3. Коэффициенты эффективности процесса размерной электрохимической обработки

Зона импульсов	$i_{\Phi,0,ср}$, А/см ²	$i_{\Phi,1,ср}$, А/см ²	$i_{\Phi,0,ср}/i_{\Phi,1,ср}$	t_b , нс	V_0 , мм/мин	$k_{эф}$
I	0	0	0	до 5	0	0
II	425	1	425	до 5	8,5	7225
III	850	90	9,44	до 35	17	5167
IV	850	175	4,76	до 240	17	19420

плотностях тока приводит к его сопоставимости со временем развития короткого замыкания (формирования канала пробоя).

Следовательно, использование наносекундных импульсов напряжения при обработке на больших МЭЗ весьма неэффективно (рис. 4 зона Г).

Эффективность процесса ЭХРМО может быть оценена комплексно как произведение скорости анодного растворения в контролируемой точке обрабатываемой поверхности (точке касания электродов при периодическом контроле МЭЗ в импульсно-циклическом режиме), скорости выравнивания исходной погрешности Δ_0 и длительности периода воздействия t_b . Скорость выравнивания исходной погрешности определяется отношением средних плотностей токов $i_{\Phi,0,ср}/i_{\Phi,1,ср}$.

Следовательно, коэффициент эффективности процесса ЭХРМО по производительности можно записать, как $k_{эф} = V_0 t_b \cdot i_{\Phi,0,ср}/i_{\Phi,1,ср}$. Величины коэффициента эффективности в различных зонах для рассмотренных условий приведены в табл. 3.

Из анализа зависимостей $i_{ДЭС}$, i_{Φ} , i от времени следует, что зоны I и II имеют малую длитель-

ность и могут быть использованы только при микрообработке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснованы эффективные диапазоны длительности импульсов напряжения размерной электрохимической микрообработки для условий ультракоротких импульсов при импульсно-циклической обработке. Показано, что важнейшее значение имеет соотношение токов зарядки ДЭС и фарадеевских токов. Выполнено моделирование процесса ЭХРМО для ультракоротких импульсов напряжения. Показан характер изменения токов зарядки ДЭС и фарадеевских токов при различных МЭЗ. Выделены зоны протекания процесса ЭХРМО с точки зрения производительности и эффективности процесса выравнивания исходной погрешности на основе анализа соотношений токов зарядки ДЭС и фарадеевских токов. Обоснованы условия исключения возможности возникновения коротких замыканий. Показано, что учет времени развития короткого замыкания позволяет повысить надежность процесса ЭХРМО за счет предупреждения создания условий возникновения коротких замыканий.

ЛИТЕРАТУРА

1. El-Hofy H.A.G. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. NY: McGraw Hill, 2005. 253 p.
2. Kibra G., Bhattacharyya B., Davim J.P. (eds) *Nontraditional Micromachining Processes: Fundamentals and Applications*. Berlin: Springer, 2017. 422 p.
3. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. *Procedia CIRP*. 2013, **6**, 13–26.
4. Давыдов А.Д., Волгин В.М., Любимов В.В. *Электрохимия*. 2004, **40**(12), 1438–1480.
5. Житников В.П., Зайцев А.Н. *Импульсная электрохимическая размерная обработка*. М.: Машиностроение, 2008. 413 с.
6. Spieser A., Ivanov A. *Int J Adv Manuf Tech*. 2013, **69**(1–4), 563–581.
7. Lyubimov V.V., Volgin V.M., Venevtsev A.Yu., Gnidina I.V. *Procedia CIRP*. 2016, **42**, 831–836.
8. Smirnov M.S., Zaitsev A.N., Agafonov I.L., Bezrukov S.V. Proc. Int. Conf. Electrical Machining (ISEM XIII). Bilbao, Spain, 2001, 231–248.
9. De Silva A.K.M., McGeough J.A. *J Mater Process Tech*. 1998, **76**(1–3), 165–169.
10. Chen W., Han F. *Int J Adv Manuf Tech*. 2019, **102**(5–8), 2531–2539.
11. Ушаков В.Я. *Импульсный электрический пробой жидкостей*. Томск: Изд-во Томского университета, 1975. 256 с.
12. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 155 с.
13. Ушаков В.Я., Симкина О.П., Рюмин В.В., Лопатин В.В. *ЭОМ*, 1972, (2), 48–54.
14. Ушаков В.Я., Клишкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. *Пробой жидкостей при импульсном напряжении*. Томск: Изд. НТЛ, 2005. 488 с.
15. Schuster R., Kirchner V., Allongue P., Ertl G. *Science*. 2000, **289**(5476), 98–101.
16. Kock M., Kirchner V., Schuster R. *Electrochim Acta*. 2003, **48**, 3213–3219.
17. Ahn S.H., Ryu S.H., Choi D.K., Chu C.N. *Prec Eng*. 2004, **28**(2), 129–134.
18. Lee E.S., Baek S.Y., Cho C.R. *Int J Adv Manuf Tech*. 2007, **31**(7–8), 762–769.
19. Sueptitz R., Dunne P., Tschulik K., Uhlemann M. et al. *Electrochim Acta*. 2013, **109**, 562–569.
20. Kenney J.A., Hwang G.S. *Nanotechnology*. 2005, **16**, S309–S313.
21. Hotoiu E.L., Van Damme S., Albu C., Deconinck D. et al. *Electrochim Acta*. 2013, **93**, 8–16.
22. Kumsa D., Scherson D.A. *J Electrochem Soc*. 2013, **160**(8), H481–H488.
23. Volgin V.M., Lyubimov V.V., Gnidina I.V. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) *Proc. 4th Int. Conf. Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, Cham: Springer, 1147–1159.
24. Дикусар А.И., Энгельгардт Г.Р., Молин А.Н. *Термокинетические явления при высокоскоростных электродных процессах*. Кишинев: Штиинца, 1989, 142 с.
25. Силкин С.А., Аксенов Е.Н., Ликризон Е.А., Петренко В.И., Дикусар А.И. *ЭОМ*. 2019, **55**(2), 1–9.

Summary

The work is devoted to the justification of the choice of a rational range of voltage pulses duration on the basis of comparing the time of the anodic dissolution start with the time of the double electric layer charge during electrochemical dimensional micromachining. The range of short-circuit times as the limit of the maximum voltage pulse duration is justified. The simulation of dimensional electrochemical micromachining using ultrashort voltage pulses without taking into account changes in the properties of the interelectrode environment is performed. The zones of the current density, which have different influence on the process of dimensional electrochemical micromachining, are revealed. An approach to the selection of an effective voltage pulse duration based on the analysis of the character of the time zones of the process is proposed.

Keywords: electrochemical micromachining, pulse duration, electric double layer, charge current, faradic current.