

### Summary

The article gives the information and data about application of electrical discharge machining technologies at the enterprises of the town of Tula. Simultaneously with this, noted are those scientific and technological tendencies and trends of electrical discharge machining process that characterize both its forming and hardening issues, and also combinations on its basis. Data presented in the article demonstrate capabilities of EDM in view of engineering parts forming and in view of parts quality improvement and their service life increase, enhancement of parts operational characteristics when EDM is combined with another machining processes.

Б.П. Саушкин, А.Г. Атанасянц, Г.А. Сычков

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

*Российский государственный технологический университет (МАТИ-РГТУ),*

*Берниковская наб., г. Москва, 109240, Россия*

*Российский государственный химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,*

*Миусская пл. 9, г. Москва, 125047, Россия*

*Московское машиностроительное производственное предприятие “Салют”,*

*пр. Буденного, 16, г. Москва, 105118, Россия*

Импульсная электрохимическая размерная обработка привлекает внимание исследователей и технологов в связи с необходимостью решения основной задачи электрохимического формообразования – достижения заданной точности обработки [1]. Начиная с пионерских работ, выполненных в конце 60-х годов [2], проведены многочисленные исследования, которые привели к разработке высокоэффективных технологий и соответствующего оборудования [3–6].

Основополагающая идея, заложенная, в большинстве опубликованных по этому вопросу работ, иллюстрируется следующими рассуждениями. При ЭХРО в результате конвективного переноса продуктов электролиза и тепла в межэлектродном промежутке (МЭП) формируются скалярные поля газосодержания, температуры, концентрации реагентов вблизи поверхности электродов, изменяются гидродинамические характеристики потока многофазной среды. Все это приводит к изменению локальных условий электролиза и выражается в том, что эпюры локальных плотностей тока и скоростей растворения сильно отличаются от распределений этих величин, обусловленных геометрическим фактором и описываемых моделью “идеального” формообразования [7]. В связи со сказанным существенно затрудняется решение технологических задач достижения заданной точности и получения поверхности, изотропной в отношении параметров качества поверхностного слоя. Использование дискретных параметров режима электролиза является радикальным путем решения таких задач [8, 9].

Кроме того, процессы, протекающие на поверхности электродов и в приэлектродных слоях при пропускании через электрохимическую систему электрического тока, существенно нестационарны и характеризуются соответствующими значениями переходного времени. К ним относятся, например, процессы активации и пассивирования поверхности, генерации и разрушения поверхностных новообразований, выделения твердофазных и газообразных продуктов из пересыщенных растворов вблизи поверхности электродов, переходные процессы в электрической цепи с учетом емкостных и резистивных свойств границы раздела фаз, процессы переноса как в жидкой, так и в

твердой фазах, процессы нагрева, подкисления и подщелачивания анолита и католита и другие. Эти процессы оказывают влияние на кинетические параметры отдельных стадий суммарного электродного процесса и могут быть использованы как средство управления при решении задач формообразования и формирования качества поверхностного слоя.

Две основные технологические проблемы решаются при переходе к импульсным режимам электролиза. Первая из них заключается в обосновании инженерной методики выбора амплитудно-частотных параметров импульсного тока. Ее решение осуществляется как на основании теоретических моделей, описывающих различные аспекты нестационарного электролиза, так и путем обобщения экспериментального материала [10–14]. Вторая проблема связана с созданием специальных импульсных источников питания, пригодных для промышленного использования [15–17].

Многочисленными исследованиями установлено, что наиболее приемлемой с технологической точки зрения является форма импульса, близкая к прямоугольной с длительностью переднего фронта не более  $10^2$  мкс. Амплитудное значение плотности тока может достигать  $10^3$  А/см<sup>2</sup> и выше. Эта величина определяется главным образом требованиями к производительности, параметрам качества поверхностного слоя, жесткостью обрабатываемой заготовки и элементов оснастки.

Важным результатом, сформулированным в работе [10], является тот факт, что импульсная обработка не позволяет повысить производительность по отношению к обработке на постоянном токе. Более того, в ряде случаев производительность импульсной ЭХРО несколько ниже [13]. В общем случае отношение масс материала, растворенного при прочих равных условиях с использованием квазипрямоугольного импульсного и постоянного тока, оценивают по выражению

$$\frac{m_{\text{И}}}{m_{\text{п}}} = \frac{\eta_a i_a \tau_{\text{и}} n_n}{\eta_n i_n T n_a} \quad (1)$$

где индексы  $a$  и  $n$  относятся к амплитудному значению импульсного и среднему значению постоянного тока соответственно,  $\eta$  – выход по току основной анодной реакции,  $i$  – плотность тока,  $n$  – степень окисления ионов металла, переходящих в раствор,  $\tau_{\text{и}}$ ,  $T$  – длительность и период следования импульсов.

Из выражения (1) видно, что при сопоставлении производительности обработки на импульсном и постоянном токе необходимо принимать во внимание не только соотношение соответствующих количеств пропущенного электричества, но и возможное изменение выхода по току и степени окисления ионов металла, переходящих в раствор, в условиях нестационарного и стационарного электролиза.

Выбирая длительности импульса тока  $\tau_{\text{и}}$  и паузы между импульсами  $\tau_{\text{п}}$  при заданных форме импульса и среднем значении плотности тока исходят из следующих соображений.

При обработке импульсами тока в период паузы между импульсами на реакционной поверхности и вблизи нее протекают различные релаксационные процессы. Степень завершенности таких процессов определяет состояние системы перед подачей на электроды очередного импульса. Очевидно, для того, чтобы протекание суммарной электродной реакции при наложении каждого импульса не зависело от предистории электрохимической системы, необходимо, чтобы длительность паузы была больше или равна длительности  $\tau_{\text{мр}}$  самого медленного релаксационного процесса. В связи со сказанным при выборе длительности импульса декларируют необходимость выполнения следующих условий:

- в течение  $\tau_{\text{и}}$  эпюра локальных скоростей растворения не должна зависеть от гидродинамических параметров;
- не изменяется характер анодной поляризации;
- не достигаются условия фазового запираания МЭП.

Таким образом, выбор временных параметров импульсного тока осуществляется по выражениям:

$$\tau_{\text{и}} \leq \min \{ \tau_{\text{кп}}, \tau_{\text{пл}}, \tau_{\text{фз}} \}, \quad (2)$$

$$\tau_{\text{п}} \geq \tau_{\text{мр}},$$

где  $\tau_{\text{кл}}$  – промежуток времени, в течение которого конвективным переносом продуктов электролиза и тепла в МЭП можно пренебречь,  $\tau_{\text{пл}}$  – время, в течение которого не изменяется характер поляризации электродов,  $\tau_{\text{фз}}$  – характерное время фазового запираания МЭП парогазовой средой.

Сделаем важное замечание по поводу того, что вышеприведенная система ограничений, накладываемых на длительность импульса, является открытой и предполагает возможность рассмотрения иных факторов [14], что не умаляет общности выражения (2).

Осуществляя выбор паузы между импульсами, обычно исходят из того, что лимитирующим релаксационным процессом является восстановление исходных физико-химических свойств рабочей среды, что приводит к следующему простому выражению для оценки длительности паузы

$$\tau_n \geq L/V, \quad (3)$$

где  $L$  – длина МЭП,  $V$  – средняя скорость прокачки электролита.

При выполнении сформулированных выше условий реализуются основные технологические преимущества импульсной обработки – повышается точность формообразования и качество поверхностного слоя. Действительно, при указанных условиях, входящие в выражение (1) величины не зависят от координат точек анодной поверхности и являются функциями времени. Кроме, того, появляется возможность уменьшения минимального рабочего зазора с соответствующим повышением точности копирования формы ЭИ и снижением величины минимально необходимого припуска. Качество поверхностного слоя улучшается в результате обработки при высоких (амплитудных) плотностях тока. Это приводит к снижению шероховатости поверхности, в том числе специфической шероховатости [18], уменьшению газонасыщения поверхностного слоя [19].

Выше отмечалось, что процессы, протекающие вблизи реакционной поверхности в период паузы между импульсами, оказывают существенное влияние как на кинетику электродных реакций, так и на технологические показатели импульсной ЭХРО. С целью управления такими процессами предложено производить импульсную ЭХРО с контролем тока или потенциала в период паузы. Для иллюстрации возможностей управления процессом электролиза за счет контроля тока (потенциала) в период паузы рассмотрим экспериментальные данные, представленные на рис. 1. Они получены на вращающемся дисковом электроде при скорости развертки тока  $0,7 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{с}$ .

Видно, что при  $i_n=0$  потенциалы пробоя оксидной пленки на титане достигают значений  $\varphi_{\text{пр}} = 12 \text{ В}$ . Потенциал, соответствующий паузе между импульсами, возрастает в течение паузы и перед наложением очередного импульса тока равен  $5,5 - 6 \text{ В}$ . Это подтверждает имеющиеся данные об усилении диэлектрических свойств поверхностной пленки на титане по окончании поляризации электрода. При небольших положительных значениях постоянной составляющей тока потенциал, соответствующий паузе, также возрастает, но его значение, достигаемое перед очередным импульсом тока, примерно на  $1 \text{ В}$  меньше. Напряжение пробоя  $\varphi_{\text{пр}}$  существенно ниже и равно  $6 - 6,5 \text{ В}$ . Дальнейшее увеличение постоянной составляющей тока (более  $0,5 \text{ A/cm}^2$ ) приводит к тому, что поверхность электрода остается в активированном состоянии вне зависимости от длительности паузы, и растворение осуществляется при величине потенциала около  $3 \text{ В}$ .

При наложении отрицательной составляющей тока ( $-0,2 \text{ A/cm}^2$ ) потенциалы пробоя равны  $10 - 12 \text{ В}$  независимо от длительности паузы. Потенциал электрода, соответствующий паузе, равен  $-1,2 \text{ В}$ . Увеличение катодной составляющей тока до  $-1 \text{ A/cm}^2$  при достаточной длительности паузы приводит к снижению потенциалов пробоя  $\varphi_{\text{пр}}$  до  $6 - 6,5 \text{ В}$ . Однако уменьшение длительности паузы сопровождается возрастанием значений  $\varphi_{\text{пр}}$  до  $10 - 12 \text{ В}$ . Все эти факты указывают на то, что катодное восстановление поверхностных оксидов на титане протекает достаточно медленно и заметно проявляется лишь при достаточно высоких катодных потенциалах. Отсюда следует, что при обработке титановых сплавов целесообразно использовать импульсные токи с постоянной составляющей, величина которой выше  $0,5 \text{ A/cm}^2$ . Сделанный вывод справедлив для случаев растворения титана в хлоридных, нитратных и перхлоратных водных растворах и для широкого диапазона скоростей наложения поляризующего тока. Аналогичные результаты получены при обработке титановых сплавов импульсами тока прямоугольной формы [20].

Рассмотренные выше экспериментальные данные указывают на то, что влияние параметров импульсного тока на анодное поведение титановых сплавов в водных средах сказывается на кинетике процессов роста и разрушения поверхностных пленок. В неводных средах, как это показано в [21], лимитирующей стадией суммарного электродного процесса в широком диапазоне потенциалов является ионный массоперенос в приэлектродных слоях. В этом случае, так же, как при растворении же-

леза, никеля и сплавов на их основе в водных электролитах, увеличение скорости наложения поляризующего тока приводит к возрастанию значений предельного диффузионного тока. В [6] приводится эмпирическое выражение, полученное при анодном растворении железа в водном хлоридном растворе и связывающее величину предельного тока диффузии  $i_{пр}$  со скоростью наложения поляризующего тока  $V_n$  соотношением вида

$$i_{пр} = m_1 \cdot V^P, \quad (4)$$

где  $m_1$  и  $P$  – эмпирические коэффициенты. Это выражение дает возможность оценить амплитудное значение плотности тока в импульсе, вплоть до которого при заданной скорости нарастания переднего фронта растворение протекает в режиме электрохимической кинетики.

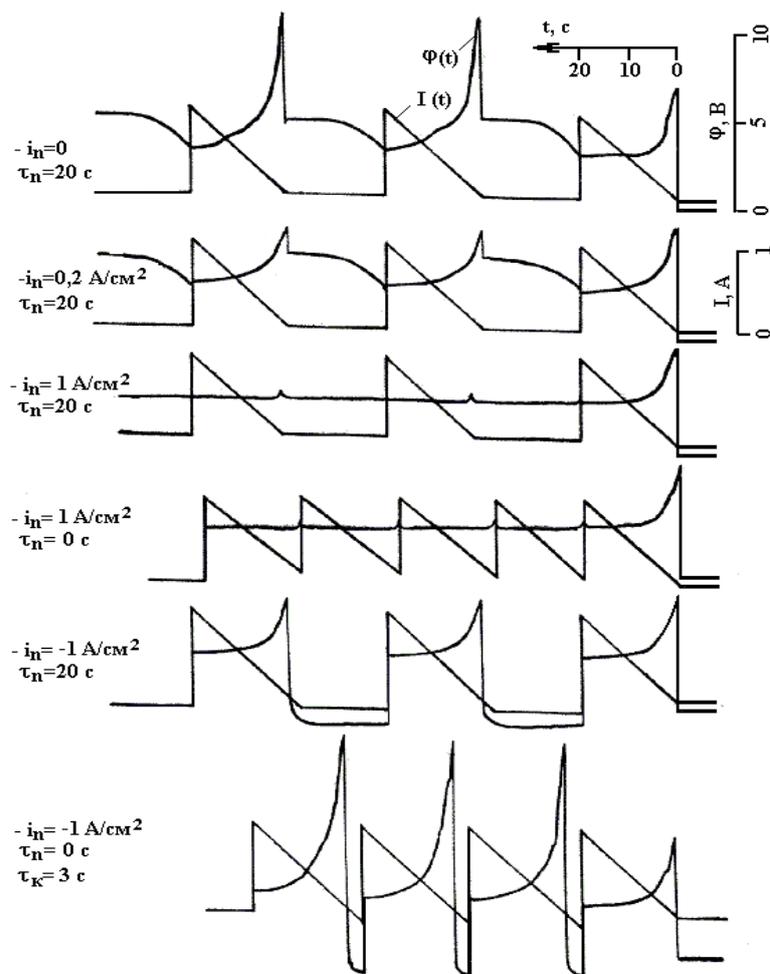


Рис. 1. Влияние постоянной составляющей тока и длительности паузы на потенциалы растворения сплава VT3-1 в водном растворе 150 г/л NaCl

Выбор достаточно малой длительности прямоугольного импульса тока позволяет исключить из рассмотрения относительно медленные диффузионные процессы и производить обработку в кинетической области активного растворения материалов. Так, при амплитудной плотности тока 25 А/см<sup>2</sup> обработка железа прямоугольными импульсами тока длительностью до 10 мс обеспечивает растворение в режиме электрохимической кинетики даже в высококонцентрированном растворе хлоридного электролита.

В [22] рассматривалось явление временной активации процесса анодного растворения, характерное для хромоникелевых сталей и сплавов. Очевидно, в данном случае также возможно осуществить ЭХРО в области активированного растворения при соответствующем выборе параметров импульсного тока.

Обсудим результаты гравиметрических измерений, полученные при импульсной обработке титановых сплавов в различных электролитах. Показано, что в водных растворах хлорида и нитрата

натрия и в неводных растворах перхлората натрия удельная скорость растворения титановых сплавов не зависит от длительности импульса ( $\tau_{и} = 10^{-4} - 10^{-1}$  с) и скважности ( $q = 1 - 5$ ). В отличие от этого в водных перхлоратных растворах увеличение скважности приводит к возрастанию  $V_{уд}$  в тем большей степени, чем длительнее импульс тока (рис. 2). Так, при скважности 1 (постоянный ток)  $V_{уд} = 0,66$  г/А·ч, а при скважности 3 удельная скорость растворения равна 0,8 ( $\tau_{и} = 10^{-4}$  с) и 0,9 ( $\tau_{и} = 10^{-1}$  с) г/А·ч. Это объясняется наличием в суммарной электродной реакции растворения титана в данной среде стадии химического доокисления промежуточной низковалентной частицы, скорость которой зависит от концентрации перхлорат-ионов вблизи анодной поверхности.

В этом случае в течение паузы между импульсами концентрация окислительного реагента увеличивается по диффузионному механизму, и скорость химической ветви суммарной электродной реакции возрастает [23]. В хлоридных и нитратных средах в отсутствие достаточно сильного окислителя при всех параметрах импульсного тока осуществляется электрохимическое окисление титана до высшей степени окисления, и масса растворенного металла определяется только количеством пропущенного электричества.

В бисолевых водных растворах с оптимальным соотношением анионов увеличение длительности паузы приводит к снижению величины  $V_{уд}$  (рис. 2, 3). Вероятно, это связано с изменением соотношения приэлектродных концентраций анионов в период паузы. Действительно, как следует из представленных данных, при длительности паузы  $10^{-4}$  с и менее значения  $V_{уд}$  соответствуют полученным на постоянном токе.

Приведенные данные подтверждают сделанное ранее предположение о возможном влиянии выхода по току и степени окисления ионов металла, переходящих в раствор, на производительность импульсной электрохимической обработки. Экспериментально показано, что в перхлоратном водном растворе при  $\tau_{и} = 10^{-1}$  с и  $10^{-4}$  с и скважности 3 производительность импульсной обработки при одинаковом количестве пропущенного электричества соответственно на 36 и 21% выше, чем при обработке на постоянном токе.

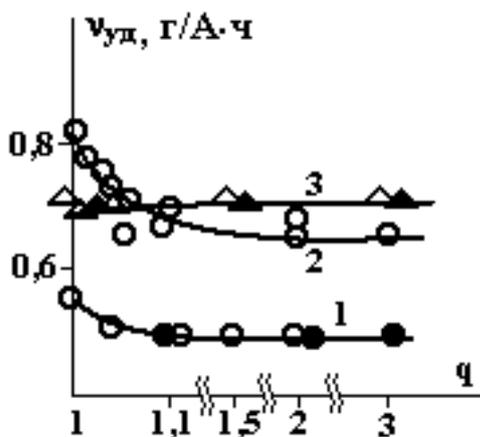


Рис. 2. Влияние скважности на удельную скорость растворения в хлорид-перхлоратном (2, 3) и хлорид-нитратном (1) водных растворах. Плотность тока, А/см<sup>2</sup>: 1, 2 – 20; 3 – 30

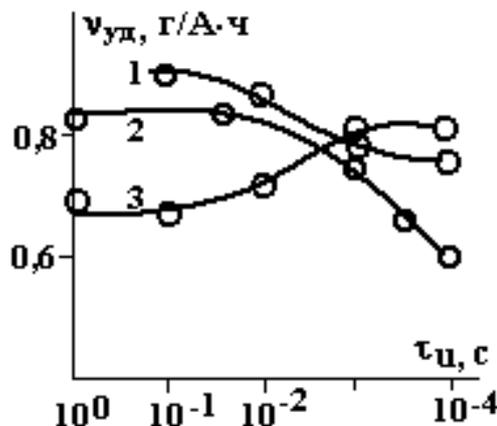


Рис. 3. Влияние длительности импульса при  $q = 1,1$  на  $V_{уд}$  в перхлоратном (1, 2) и хлорид-перхлоратном (3) водных растворах при  $i = 20$  (1) и 10 (2, 3) А/см<sup>2</sup>

Таким образом, параметры дискретного режима электролиза существенно влияют как на кинетику, так и на стехиометрию анодного растворения материалов. Такое влияние проявляется различным образом в зависимости от состава раствора, материала анода, диапазона изменения параметров импульсов.

Обсудим имеющиеся данные, характеризующие влияние параметров импульсного тока на процессы газо- и тепловыделения в МЭП. Установлено, что при характерных для ЭХРО параметрах режима в течение определенного промежутка времени газожидкостный фронт перемещается преимущественно по нормали к катоду, и конвективным переносом газовых включений можно пренебречь. При средней плотности тока 20 – 30 А/см<sup>2</sup> величина этого интервала времени равна  $(1 - 3) \cdot 10^{-3}$  с. Экспериментально установлен быстрый рост газосодержания электролита после вклю-

чения тока и необходимость его учета при описании процесса импульсной ЭХРО. Построена физическая модель нестационарного газосодержания и рассмотрено ее математическое описание. Получены аналитические выражения для описания изменения газосодержания во времени и по координате (одномерная задача) [1]. Выполнен анализ задачи нестационарной теплопроводности и получены аналитические выражения для расчета температуры электролита [10]. Эти результаты позволили приближенно описать зависимость удельной электропроводности рабочей многофазной среды от координаты и времени и получить модели, отображающие динамику анодной поверхности при импульсном электролизе.

Расчеты показывают, что при параметрах режима электролиза, характерных для обработки лопаток ГТД, определяющее влияние на эффективную электропроводность оказывает изменение газосодержания. Однако при достаточно высоких напряжениях и соответствующих длительностях импульса может быть достигнута температура кипения электролита в МЭП. Очевидно, в таких случаях температурный фактор становится доминирующим и может привести к фазовому “запиранию” МЭП. Это явление характеризуется резким увеличением электрического сопротивления МЭП в результате вскипания электролитных мостиков между газовыми пузырьками и последующим электрическим пробоем межэлектродной среды. Показано, что характерное время  $\tau_{фз}$  тем меньше, чем выше плотность потока мощности, вводимой в МЭП (между названными величинами существует гиперболическая зависимость). Экспериментально установлено, что для заданных условий электролиза величина удельной энергии, вводимой в МЭП, есть величина постоянная

$$W_{уд} = i U \tau_{фз} = \text{const}, \quad (5)$$

в то время как количество электричества, пропущенного через электролитную ячейку до “запирания”, снижается по мере возрастания уровня вводимой мощности. Это подтверждает роль тепловыделения при описании фазового “запирания” МЭП.

Выражение (4) накладывает ограничение на выбор параметров импульсов. Из него следует, что при достаточно коротких импульсах могут быть достигнуты весьма высокие амплитудные плотности тока. Можно сказать также, что представленное выражение естественным образом ограничивает область применения ЭХРО: при введении в МЭП большей энергии изменяется механизм разрушения материала электродов.

Из сказанного ясно, что если за время паузы между импульсами не произойдет эвакуация выделившегося тепла (температурная релаксация МЭП), то технологические показатели импульсной ЭХРО понизятся. Обычно выполнение условия (3) достаточно для температурной релаксации. Однако в ряде случаев необходимо учитывать не только нагрев рабочей среды, но и электродов.

Таким образом, экспериментальные и теоретические исследования позволили установить, что при характерных для ЭХРО значениях физических величин (зазор 0,3 мм, плотность тока 20 – 30 А/см<sup>2</sup>) конвективный перенос продуктов электролиза и тепла становится заметным при  $t = 10^{-2}$  с. При  $t = 10^{-3}$  с этим переносом можно пренебречь и считать, что при таких длительностях импульсного тока распределение тока по обрабатываемой поверхности зависит преимущественно от геометрии МЭП. Как показано ранее, это существенно повлияет на точность электрохимической обработки.

Выше рассмотрены различные аспекты влияния импульсного тока на процесс электрохимической обработки. Полученные результаты позволили обосновать подход к выбору параметров импульсного тока, сформулировать ожидаемые технологические преимущества импульсной обработки. Для оценки технологических показателей импульсной ЭХРО проводились специальные эксперименты, условия которых соответствовали возможностям станка ЭХС-10Б с источником питания ИПИ-500. На рис. 4,а представлены данные, иллюстрирующие влияние длительности импульса на показатели производительности (средняя скорость растворения), точности (погрешность  $\Delta_l$ , вызванная неравномерностью эпюры скорости растворения по длине плоскопараллельного исходного зазора), качества поверхности ( $R_a$ ). На рис. 4,б представлены профилограммы поверхности образца, обработанного в течение 10 с.

Как видно, в данных условиях увеличение длительности импульса от 0,5 до 2 мс сопровождается заметным возрастанием погрешности формы  $\Delta_l$  от 5 – 8 мкм до 80 – 90 мкм. Существенным образом изменяется профиль обработанной поверхности. При обработке хромистых сталей при тех же условиях электролиза погрешность  $\Delta_l$  не превышала 10 мкм. Это означает, что в рассматриваемом случае распределение локальных скоростей растворения формируется под воздействием некоторого неучтенного фактора. Действительно, анализ обработанной поверхности титанового образца показал,

что при  $\tau_{и} = 2$  мс, начиная с 25 – 30 мм от входа в зазор, эта поверхность покрыта толстой рыхлой пленкой продуктов электролиза, что не наблюдается при  $\tau_{и} = 0,5$  мс. Очевидно, в данных условиях неравномерность съема металла, наблюдаемая при  $\tau_{и} = 2$  мс, формируется на титановом образце не за счет газонасыщения МЭП или тепловыделения в нем, а в результате образования поверхностной резистивной пленки продуктов электролиза, приводящей к перераспределению локальных плотностей тока.

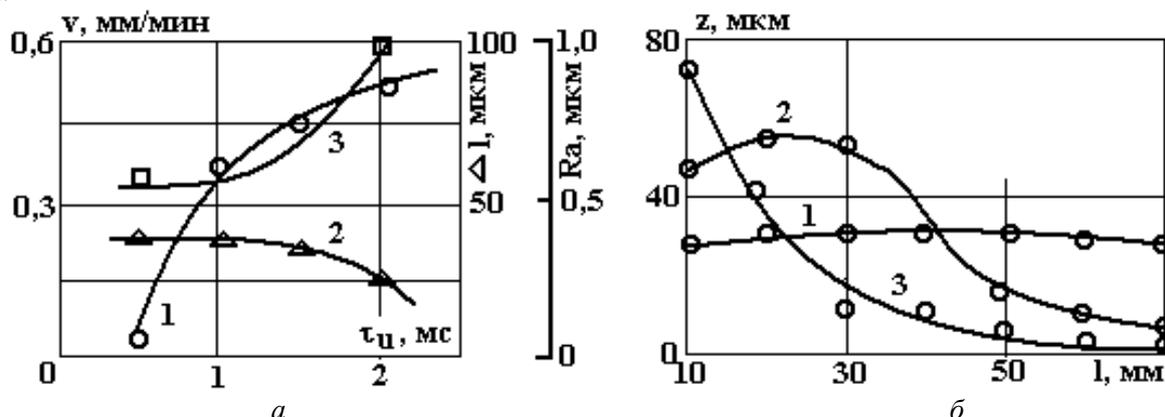


Рис. 4. Влияние длительности импульса на технологические показатели ЭХРО (1 – погрешность формы  $\Delta l$ , 2 – средняя скорость растворения, 3 –  $R_a$ ) (а) и на макрогеометрию поверхности (б) при обработке сплава ВТ8 в растворе 100 г/л NaCl и следующих условиях):  $U_a = 20$  В,  $q = 5$ ,  $a = 0,2$  мм,  $P_0 = 0,4$  МПа,  $i_a = 50$  А/см<sup>2</sup>,  $\tau_{и}$ , мс: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 2,0

Отметим тот факт, что при импульсе 0,5 мс длительность паузы составляла 2 мс, что существенно меньше величины 10 мс, определяемой по выражению (3). Тем не менее, судя по профилю обработанной поверхности, затруднений с выносом газа и тепла из МЭП в данном случае не возникало. Отсюда следует, что выражение (3) дает несколько завышенную величину паузы между импульсами и должно быть откорректировано введением коэффициента-сомножителя  $k = 0,2 - 1$  в зависимости от условий обработки. Описанный эффект, вероятно, связан со скачкообразным изменением давления рабочей среды при наложении и прекращении действия импульса тока [24]. Результаты скоростной киносъемки указывают на то, что при завершении токового импульса давление в МЭП резко падает, наблюдается рост размеров и агрегатирование мелких газовых пузырьков вплоть до образования пробок, что облегчает эвакуацию массы газа из МЭП в период паузы. Действительно, данные, представленные на рис. 5, показывают, что как в хлоридном, так и в перхлоратном растворах, уже при скважности 5 погрешность  $\Delta l$  не превышает 10 мкм. Наличие выраженного максимума на кривой, описывающей зависимость скорости растворения от скважности в перхлоратном электролите, связано с рассмотренным ранее влиянием паузы на величину  $V_{уд}$  (рис. 5,б). Отметим монотонное снижение шероховатости в перхлоратном растворе с увеличением скважности, что не наблюдается в хлоридном электролите.

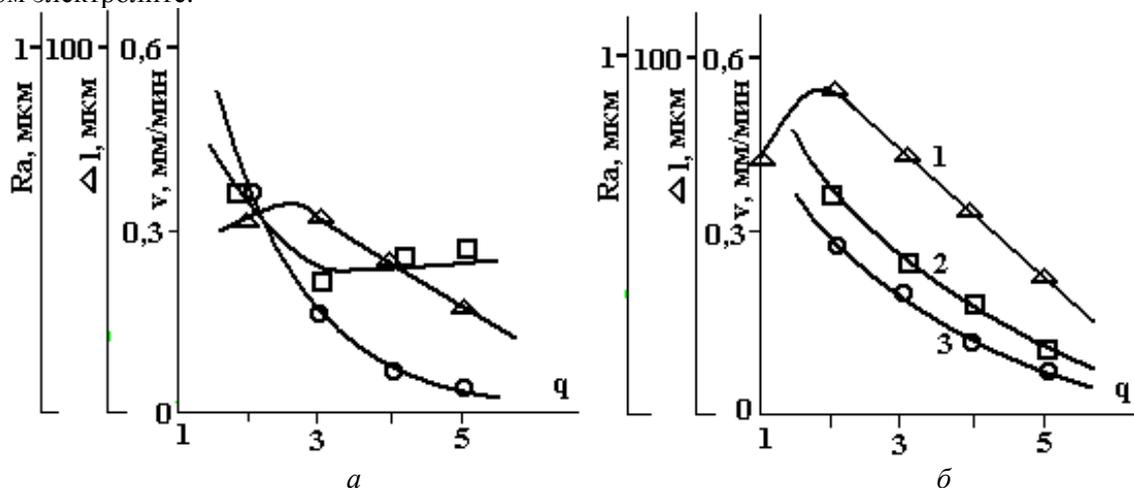


Рис. 5. Влияние скважности на среднюю скорость растворения (1), параметр шероховатости поверхности (2), погрешность формы (3) при обработке сплава ВТ8 в 1,7 М NaCl (а) и 1,7 NaClO<sub>4</sub> (б) при времени обработки 10 с,  $\tau_{и} = 500$  мкс,  $U_a = 20$  В,  $a = 0,2$  мм,  $P_0 = 0,4$  МПа

Представленные выше экспериментальные данные указывают на хорошие технологические результаты, достигаемые в описанных выше условиях при обработке титановых сплавов импульсами тока длительностью 0,5 мс и скважностью 5. С целью оценки энергоемкости и производительности импульсной ЭХРО при данных временных параметрах импульсного тока получены вольт-амперные характеристики и зависимости скорости растворения от величины среднего тока. Показано, что ВАХ представляют собой прямые линии вплоть до амплитудных значений тока 200 А (плотность тока 150 А/см<sup>2</sup>), углы наклона которых хорошо согласуются с расчетными значениями омического сопротивления МЭП. Экстраполяция ВАХ на ось ординат позволяет оценить сумму электродных потенциалов  $\Delta\phi \cong 8$  В ( $\phi_k = 1,5 - 2$  В,  $\phi_a = 6 - 6,5$  В), что соответствует данным поляризационных измерений. Средняя скорость растворения титанового сплава линейно зависит от величины среднего тока. Это означает, что выход по току (или эффективная валентность  $n_{эф}$ ) незначительно изменяются в изученном диапазоне плотностей тока. Расчет  $n_{эф}$  по наклону экспериментальных прямых позволяет сопоставить данные, полученные в ячейке с плоскопараллельным зазором и на вращающемся дисковом электроде (табл. 1). Значения  $n_{эф}$ , полученные в различных электрохимических системах, хорошо согласуются между собой. При прочих равных условиях, в том числе при одинаковом количестве пропущенного электричества, импульсная ЭХРО титановых сплавов в перхлоратных электролитах позволяет почти в два раза повысить производительность обработки по отношению к хлоридному и нитратному растворам.

Таблица 1. Значения эффективной валентности при импульсном электролизе в различных электролитах

Электролит	Длинномерный канал, плоскопараллельный МЭП	Вращающийся дисковый электрод
120 – 240 г/л NaClO <sub>4</sub>	2,05 ± 0,05	2,1 ± 0,05
100 – 150 г/л NaCl	4,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1
85 – 170 г/л NaNO <sub>3</sub>	3,9 ± 0,1	4,0 ± 0,1
120 г/л NaClO <sub>4</sub> +40 г/л NaCl	2,6 ± 0,1	2,7 ± 0,1
150 г/л NaClO <sub>4</sub> +60 г/л NaCl	2,8 ± 0,1	2,8 ± 0,1

Линейный рост средней скорости растворения сопровождается, как показали эксперименты, перераспределением локальных плотностей тока по поверхности образца. Так, при средней плотности тока выше 20 – 25 А/см<sup>2</sup> во всех исследованных электролитах поверхность приобретает вогнутую форму с максимальной величиной съема вблизи середины образца. Указанное изменение макропрофиля обработанной поверхности при увеличении тока приводит к возрастанию погрешности  $\Delta_l$ . Анализируя данные, представленные на рис. 6 и полученные в различных электролитах, можно заметить, что, несмотря на некоторые различия соответствующих профилограмм, зависимости  $\Delta_l = \Delta(I)$  идентичны и с достаточной для инженерных расчетов точностью аппроксимируются параболическим уравнением вида

$$\Delta_l = k_{\Delta} \cdot I^m, \quad (7)$$

где  $k_{\Delta}$ ,  $m$  – числовые коэффициенты, определяемые условиями обработки (в нашем случае  $k_{\Delta} = 0,3 - 0,6$ ;  $m = 2,3 - 2,8$ ),  $\Delta_l$ ,  $I$  – безразмерные значения погрешности и тока.

Важное значение при ЭХРО лопаток ГТД приобретает процесс выравнивания исходной неравномерности припуска. Проведенные эксперименты (исходный минимальный зазор 0,15 – 0,2 мм, исходная неравномерность припуска 1 – 1,2 мм) подтвердили тот факт, что переход к импульсному режиму электролиза способствует “идеализации” процесса ЭХРО и обеспечивает распределение тока в МЭП, близкое к первичному. Это существенно упрощает технологические расчеты, связанные с определением минимально необходимого припуска.

Качество поверхностного слоя при ЭХРО обычно оценивают высотным параметром шероховатости, величиной наводороживания и наличием специфических дефектов поверхности, вызванных ее структурно-фазовой неоднородностью. Важным фактором является равномерное распределение перечисленных показателей качества поверхностного слоя по обработанной поверхности. Эксперименты показали, что при импульсной обработке титановых сплавов эти показатели зависят от состава раствора и параметров импульсного тока. Так, на рис. 7 показаны значения  $R_w$ , достигаемые при про-

чих равных условиях в следующих электролитах, г/л: 1 – 100 NaCl, 2 – 120 NaClO<sub>4</sub> + 40 NaCl, 3 – 200 NaClO<sub>4</sub>, 4 – 40 NaCl + 60 NaNO<sub>3</sub>, 5 – 150 NaClO<sub>4</sub> + 60 NaNO<sub>3</sub>, 6 – 120 NaClO<sub>4</sub> + 75 NaClO<sub>3</sub>, 7 – 150 NaNO<sub>3</sub>.

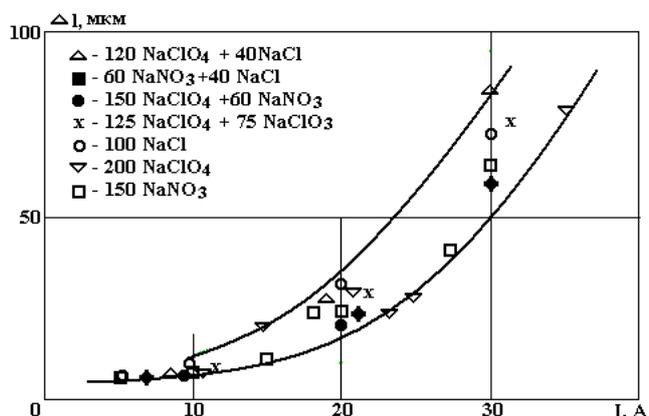


Рис. 6. Влияние величины тока на погрешность формы при обработке сплава ВТ9 в различных электролитах и следующих условиях:  $q = 5$ ,  $t = 10$  с,  $\tau_u = 500$  мкс,  $a = 0,2$  мм,  $P_0 = 0,4$  МПа

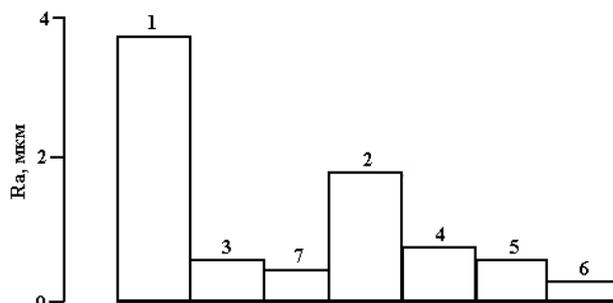


Рис. 7. Влияние состава электролита на  $R_a$  при обработке сплава ВТ8 в следующих условиях:  $q = 5$ ,  $t = 10$  с,  $\tau_u = 500$  мкс,  $a = 0,2$  мм,  $P_0 = 0,4$  МПа

Следует отметить качественную корреляцию полученных данных с результатами оценки шероховатости образцов, обработанных на постоянном токе (выполнялось условие равенства количества пропущенного электричества). Наибольшая шероховатость соответствует обработке в хлоридных растворах, а наименьшая – в электролитах на основе кислородсодержащих солей.

Отмечается, что импульсная обработка сплавов ВТ8, ВТ9 в нитратных водных растворах, в отличие от обработки на постоянном токе, обеспечивает в определенных условиях не только низкие значения  $R_a$ , но и высокую отражательную способность обработанной поверхности. Этот эффект подробно исследован в работах [25, 26], где показано, что ухудшение шероховатости поверхности при обработке титановых сплавов в значительной степени определяется осаждением на поверхности электрода твердых продуктов электролиза. Сделано предположение о том, что эффект полировки при импульсной обработке в нитратном растворе наблюдается при тех параметрах импульсов и условиях электролиза, при которых не достигается концентрация насыщения по растворимым продуктам анодной реакции и не выпадает твердая фаза таких продуктов.

Наводороживание поверхности изучалось на цилиндрических образцах диаметром 10 мм, торец которых обрабатывался на постоянном и импульсном токах в различных электролитах. Результаты сведены в табл. 2. Из представленных данных видно, что переход к импульсному режиму электролиза во всех случаях способствует снижению наводороживания.

Этот результат хорошо объясняется на основе диффузионной модели газонасыщения поверхностного слоя, развитой в [27]. Показано, что характерное время установления стационарного профиля распределения концентрации водорода имеет порядок  $\approx 1$  с. Следовательно, при достаточно коротких импульсах процессы диффузионного насыщения поверхности водородом и связывания последнего в решетке металла существенно нестационарны.

Таблица 2. Наводороживание поверхности при ЭХРО сплава ВТ3-1, мас. %

Состав электролита	Постоянный ток	Импульсный ток: $\tau_u = 0,5$ мс, $q = 5$
60 г/л NaCl	0,03 – 0,04	0,02
85 г/л NaNO <sub>3</sub>	0,03 – 0,04	0,02
120 г/л NaClO <sub>4</sub>	0,06 – 0,08	–
90 г/л NaClO <sub>4</sub> + 20 г/л NaNO <sub>3</sub>	0,06	0,02
40 г/л NaCl + 25 г/л NaNO <sub>3</sub>	0,05	0,02
80 г/л NaClO <sub>4</sub> + 20 г/л NaCl	0,05	–

Примечание:  $a_0 = 0,2$  мм,  $P_0 = 0,4$  МПа,  $i_{cp} = 20$  А/см<sup>2</sup>, суммарная концентрация солей в растворе 1 моль/л

Таким образом, импульсная ЭХРО титановых сплавов при  $\tau_n = 0,5$  мс, скважности 5 и амплитудной плотности тока до  $150 \text{ А/см}^2$  обеспечивает при обработке поверхностей длиной до 70 мм высокую производительность и качество поверхностного слоя при значительном снижении погрешности формы по отношению к обработке на постоянном токе. При этом наивысшая производительность в водных средах достигается в хлорнокислых растворах ( $n_{\text{эф}} \cong 2$ ), наибольшая локализация съема металла – в бисолевых растворах предложенного состава, наилучшее качество поверхности ( $R_a \leq 0,2$  мкм, наводороживание 0,02 мас.%) – в нитратных и нитрат-перхлоратных электролитах.

В последние годы появились работы, в которых исследуется возможность проведения ЭХРО короткими импульсами тока с длительностью порядка 10 мкс [12, 28 – 30]. Сообщается, что в водных растворах минеральных солей при относительно низких давлениях электролита (0,1 – 5 МПа), зазорах 0,02 – 0,04 мм достигаются значения плотности тока порядка  $10^4 \text{ А/см}^2$ . Подтверждается определяющая роль температурного фактора в изменении физико-химических свойств межэлектродной среды при столь высоких плотностях потока мощности. В таких условиях удается существенно локализовать процесс анодного растворения материалов и повысить качество поверхностного слоя при сохранении приемлемой производительности. Однако анализ показывает, что обработка короткими импульсами тока целесообразна лишь при получении поверхностей прецизионных изделий [31, 32] площадью не выше  $1 - 2 \text{ см}^2$  с использованием, как правило, кинематических схем с вибрацией электродов. При этом существенно повышаются требования к эксплуатационным и технологическим характеристикам источников питания. Следует также отметить, что при использовании коротких импульсов тока значительно большую роль начинают играть релаксационные процессы, связанные с индуктивно-емкостными свойствами электролитной нагрузки.

Ранее при обосновании процедуры выбора временных параметров импульсного тока мы исходили из необходимости полного завершения релаксационных процессов в МЭП за период паузы между импульсами. Однако, как было показано выше, паузу можно целенаправленно использовать для подготовки поверхности электрода перед наложением очередного импульса тока. Эта идея лежит в основе множества предложенных способов импульсной электрохимической обработки. В частности, авторами предложен и апробирован способ импульсной химико-электрохимической обработки, сущность которого заключается в химическом воздействии на поверхность электрода реагентами рабочей среды в период паузы.

Наибольшее развитие сформулированная выше идея нашла при разработке способов ЭХРО, предполагающих использование ступенчатых импульсов в импульсно-потенциостатическом или импульсно-гальваностатическом режиме. Величина и знак напряжения или тока, накладываемого в период паузы, а также длительность паузы определяются в этом случае характером решаемых задач.

Обсудим в связи со сказанным наиболее интересные результаты исследований в этой области. Выше на примере обработки титанового сплава показана возможность целенаправленного влияния таким путем на свойства оксидной пленки, формируемой на поверхности образца в период паузы. В работах [33, 34] при растворении железа и низкоуглеродистой стали в нитратном и хлоратном водных растворах, установлено взаимное влияние процессов, протекающих при анодном и катодном импульсах потенциала.

Показано, что область потенциалов катодного импульса ограничена сверху областью пассивности, а снизу – скоростью реакции восстановления кислородсодержащего аниона. Область потенциалов анодного импульса ограничена сверху количеством пропущенного электричества, требуемого для пассивации анода, а снизу – максимально возможной величиной подкисления анолита. Это приводит к достаточно сложной зависимости скорости растворения анода от параметров анодного и катодного импульсов, которая описывается кривой с выраженным максимумом (рис. 8). В хлоратных электролитах существенное влияние на анодный процесс оказывают активирующие хлорид-ионы, генерируемые при восстановлении хлорат-ионов в период протекания катодного импульса.

Отмечается, что анодно-катодная обработка может рассматриваться как один из методов интенсификации анодного растворения в системах с пассивацией, который при определенных условиях обеспечивает также повышенную локализацию растворения. Недостатком указанных работ является то, что протекание перечисленных выше процессов активации – пассивации поверхности рассмотрено лишь при достаточно длительных импульсах (более 100 мс). Сильное влияние на эти процессы оказывает гидродинамический фактор. Все это сужает область целесообразного практического применения результатов исследований [35].

Особенности поляризации анодной поверхности короткими ступенчатыми импульсами тока (10 – 100 мкс) исследованы в работе [36]. Показано, что при биполярной ЭХРО характерное время

установления потенциала анода при наложении основного импульса тока существенно зависит от параметров дополнительного импульса тока обратной полярности (рис. 9). Это подтверждается данными работы [37], свидетельствующими об усилении степени неэквипотенциальности анодной поверхности при обработке биполярными импульсами, что, по мнению авторов, служит причиной повышенной локализации процесса растворения в рассматриваемом случае. Заметим, что характерное время, о котором идет речь, по данным [36] – порядка 10 мкс, что необходимо иметь в виду при практическом использовании описанного эффекта.

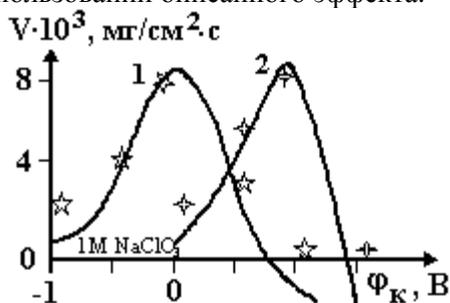


Рис. 8. Влияние потенциала катодного импульса на скорость растворения при  $\phi_a = 2,5$  В,  $\tau_a = 0,5$  с,  $\tau_k = 0,1$  (1) и  $0,5$  с (2)

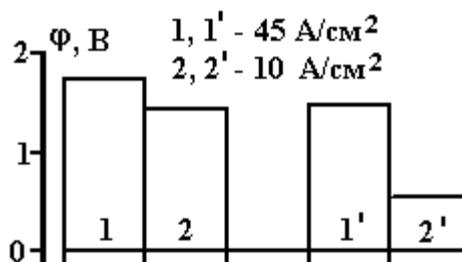


Рис. 9. Соотношения анодных потенциалов, измеренных через 10 мкс после включения, при  $U_k = 0$  (1, 2) и  $U_k = 3$  В,  $\tau_k = 100$  мкс (1', 2')

Интересный пример функционального использования паузы между импульсами технологического тока приведен в работе [38]. Показано, что применение биполярного тока может служить эффективным средством борьбы с катодными отложениями. В основе механизма удаления катодных отложений лежит анодная реакция выделения кислорода, в результате которой происходит разрыхление и отслаивание поверхностных новообразований пузырьками газа и подкисление анолита. В кислой среде, рН которой достигает 1 – 2, осуществляется химическое растворение оксидов. Таким образом при соответствующем выборе параметров противоимпульсов в период паузы между импульсами технологического тока осуществляется очистка стального электрода-инструмента без изменения его размеров.

Суммируя приведенные сведения, можно заключить, что исследования в области импульсной электрохимической обработки привели к созданию достаточно развитой теоретической модели, в которой учитываются различные нестационарные процессы в МЭП при наложении и прерывании технологического тока. Результаты таких исследований используются при разработке современных технологий ЭХРО [39, 40]. Вместе с тем физико-химическую модель процесса импульсной ЭХРО нельзя считать завершенной, поскольку существует целый перечень вопросов, остающихся на сегодняшний день открытыми [41]. Кроме того, несмотря на то, что история развития этого направления ЭХРО в нашей стране насчитывает около сорока лет, до сих пор отсутствует промышленный широкодиапазонный и достаточно мощный импульсный источник питания, обладающий высокой надежностью и отвечающий существующим санитарно-гигиеническим требованиям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Ю.Н., Корчагин Г.Н., Зайдман Г.Н., Саушкин Б.П. Основы повышения точности электрохимического формообразования. Кишинев, 1978.
2. Алтынбаев А.К., Орлов В.Ф. Влияние импульсного тока на параметры процесса ЭХРО. М., 1968.
3. Герасимов В.Ф., Филимонов В.Г. ЭХРО как окончательный метод формирования профиля пера малых лопаток компрессора ГТД // Сб. тр. ВНТК “Электрохимическая размерная обработка деталей машин”. Тула, 1986. С. 125 – 127.
4. Саушкин Б.П., Сычков Г.А. Опыт разработки технологии импульсной ЭХРО титановых лопаток // Сб. тр. “Вопросы авиационной науки и техники”. Сер. “Технология авиационного двигателестроения”. 1988. Вып. 4. С. 22 – 24.
5. Karasew B., Altynbaiyev A. Pulse Current ECM Facilities // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-X). Magdeburg. 1992. P. 430 – 437.
6. Физико-химические методы обработки в производстве авиационных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина. М., Изд. Дрофа. 2002. 656 с.
7. Давыдов А.Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М., 1990.

8. Саушкин Б.П. Разработка средств и методов повышения эффективности электрохимической обработки изделий из титановых сплавов: Автореф. дис. докт. техн. наук. М., 1989.
9. Рыбалко А.В. Разработка процессов ЭХРО микросекундными импульсами тока и оборудования для их реализации: Автореф. дис. докт. техн. наук. Воронеж, 1997.
10. Зайдман Г.Н., Петров Ю.Н. Формообразование при электрохимической размерной обработке. Кишинев, 1990.
11. Атанасянц А.Г. Электрохимическое изготовление деталей машин // Электрохимия. Т. 22. М., 1985. С. 204 – 226.
12. Rybalko A.V., Dikusar A.I. ECM with microsecond pulses // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-XI). Switzerland. 1995. P. 491 – 504.
13. Давыдов А.Д. Электрохимическое растворение металлов в импульсных режимах // Сб. тр. ВНТК “Своевременная электротехнология в машиностроении”. Тула, 1997. С. 6 – 11.
14. Давыдов А.Д. Механизм импульсной электрохимической размерной обработки // Электрохимия. 1979. Т. XV. № 2. С. 266 – 269.
15. Рыбалко А.В., Галанин С.И., Сычков Г.А. и др. Биполярный источник питания для импульсной ЭХРО // Электронная обработка материалов. 1990. № 6. С. 73 – 74.
16. Бурков В.М., Румянцев Е.М. Источник импульсного технологического тока для ЭХРО // Сб. тр. ВНТК “Своевременная электротехнология в машиностроении”. Тула, 1997. С. 150 – 151.
17. Wollenberg G., Schulze H., Lauter M. Process Energy Supply for Unconventional Machining // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XIII). Spain, 2001. P. 220 – 232.
18. Sauschkin B.P., Maslov A.W. Konkurrenzfähigkeit der electrochemist-chen Metallbearbeitung verbessern // Metall Oberfläche. 1992. № 8. P. 364 – 365.
19. Проничев Н.Д., Смирнов Г.В., Фадеев А.Ю. Комплексное исследование механизмов наводороживания поверхности при ЭХРО деталей из титановых сплавов на постоянном и импульсном токе // Сб. тр. ВНИК “Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов”. Уфа, 2001. С. 99 – 102.
20. Саушкин Б.П. Анодное растворение хромистых сталей при импульсных режимах электролиза // Теория и практика электрохимической обработки металлов. Кишинев, 1976. С. 19 – 28.
21. Саушкин Б.П. Электрохимическая отделочная обработка материалов // Металлообработка. 2001. № 1. С. 27 – 30.
22. Дикусар А.И., Энгельгардт Г.Р., Петренко В.И., Петров Ю.Н. Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке металлов. Кишинев, 1983.
23. Atanasyants A., Saushkin B. Problems of ECM of metals in non traditional electrolytes // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-X). Magdeburg. 1992. P. 438 – 450.
24. Саушкин Б.П., Плаксин В.А. Информационное обеспечение процесса управления ЭХРО // В сб. тр. “Информационно-технические системы”. Под ред. В.В. Сысоева. Воронеж, 1996. № 1. С. 99 – 101.
25. Саушкин Б.П., Сычков Г.А., Нистрян А.З. Об эффекте электрополировки при импульсной ЭХРО титановых сплавов // Тез. докл. ВНТК “Электрохимическая анодная обработка металлов”. Иваново, 1988.
26. Саушкин Б.П., Сычков Г.А., Харитонов В.Н. Импульсная электрохимическая обработка титановых сплавов в водных растворах нитрата натрия // Изв. вузов: Авиационная техника. 2003. № 3. С. 32 – 39.
27. Проничев Н.Д., Богданович В.И., Шитарев И.Л. Математическое моделирование и экспериментальные исследования процесса наводороживания титановых сплавов при электрохимической обработке // Сб. тр. ВНТК “Своевременная электротехнология в машиностроении”. Тула, 1997. С. 69 – 73.
28. Ruszaj A., Czekał I., Chuchro M. ECM with short interelectrode voltage pulses // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-XII). Spain, 2001. P. 334 – 342.
29. Smirnov M.S., Zaitsev A.N., Agafonov L.L. and other. Electrochemical Dimensional Machinin by Microsecond Duration Pulses // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-XIII). Spain, 2001.
30. Идрисов Т.Р., Зайцев А.Н., Житников В.П. Построение эмпирических зависимостей анодного потенциала от плотности и длительности импульса тока // Сб. тр. ВНТК “Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов”. Уфа, 2001. С. 20 – 23.
31. Uhlmann E., Doll V., Forster R. High Precision Manufacturing Using PEM // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XIII). Spain, 2001. P. 324 – 332.
32. Zhitnikov V.P., Zaitsev A.N. Mathematical modeling of electrochemical copying of small size geometrical objects // The same publ. P. 302 – 312.

33. Дикусар А.И., Салтановская Л.В., Ющенко С.П. и др. Импульсно-потенциостатическое растворение железа в нейтральных нитратных растворах // Электронная обработка материалов. 2000. № 5. С. 53 – 63.
34. Яхова Е.А., Ющенко С.П., Дикусар А.И. и др. Анодное растворение железа и стали в нейтральных хлоратных растворах при импульсной обработке поверхности // Электронная обработка материалов. 2001. № 5. С. 9 – 20.
35. Редкозубова О.О., Келоглу О.Ю., Ющенко С.П. и др. Локализация растворения при больших толщинах изолирующих масок в условиях электрохимической микрообработки меди в нитратных растворах // Электронная обработка материалов. 1999. № 5. С. 4 – 19.
36. Идрисов Т.Р., Зайцев А.Н., Амирханова Н.А. Исследование приэлектродных потенциалов в нестационарных условиях при биполярной ЭХРО // Электронная обработка материалов. 2001. № 1. С. 4 – 8.
37. Рыбалко А.В., Галанин С.И., Атанасянц А.Г. Импульсная электрохимическая обработка биполярным током // Электронная обработка материалов. 1993. № 3. С. 3 – 6.
38. Амирханова Н.А., Гимаев Н.З., Зайцев А.Н. и др. Исследование катодных отложений при импульсной ЭХРО сталей вибрирующим электродом-инструментом // Электронная обработка материалов. 2001. № 2. С. 4 – 12.
39. Лебедев Ю.А., Фирсов А.Г., Абдрашитов А.А. и др. Внедрение технологии ЭХРО тракторных поверхностей малогабаритных лопаток компрессора повышенной точности // Сб. тр. ВНТК “Современная электротехнология в машиностроении”. Тула, 1997. С. 140 – 141.
40. Хабибуллин М.Г., Фирсов А.Г. Проблемы технологии изготовления малоразмерных сложнопрофильных лопаток компрессора ГТД нового поколения // Изв. вузов. Сер. “Авиационная технология”. 1998. № 4. С. 113 – 115.
41. Rajurkar K., Zhu D., McGeough J. and other. New Developments in ECM // Annals of the CIRP. 1999, V. 48/2. P. 1 – 13.

*Поступила 29.10.02*

### **Summary**

Analysis of theoretical and practical results of the study of electrochemical machining process with current pulses is done. General approach to the procedure of the pulse parameters choice is considered. Modern conception touching on the use of pause time for effective influence on the electrode surface and on the properties of electrolyte gap is discussed. Some results of manufacturing experiments with industrial pulse energy source are presented.

---