

В.С. Усов, Ю.С. Тимофеев, С.В. Усов

## ОСВОЕНИЕ И ПОСЛЕДУЮЩЕЕ РАЗВИТИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ МЕТОДОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ТУЛЫ

*ОАО «Акционерная компания Туламашзавод»  
ул. Мосина, 2, г. Тула, 300002, Россия*

Электроэрозионные технологические методы, открытые супругами Б.Р. Лазеренко и Н.И. Лазаренко, начали развиваться и применяться на Тульской земле с 50-х годов. При этом развитие технологических методов шло в направлении применения как формообразующих, так и упрочняющих методов. Большое место в последующей деятельности занимали исследования в области комбинированных электроэрозионных и лазерных методов. Эта группа технологий нашла применение и на предприятиях г. Тулы. Тульский комбайновый завод в 1957 году осваивал производство гаммы сельскохозяйственных машин и новую гражданскую продукцию. Требовалось в сжатые сроки изготовить большое количество штампов для горячей и холодной штамповки.

Лаборатория созданная и руководимая Борисом Романовичем Лазаренко находилась в Люберцах под Москвой. Ознакомившись с технологией электроискровой обработки, предприятие заключило договор на изготовление вырубного твердосплавного штампа для звена цепи толщиной 3 мм. Штамп был изготовлен, его привез сотрудник лаборатории Н.К. Фатеев. Штамп показал увеличение стойкости в десятки раз, проработав более года с выходом 500 тысяч деталей.

Борис Романович посоветовал заводу приобрести станок ЛКЗ–18, который изготавливался на Ленинградском карбюраторном заводе. Побывав на ЛКЗ, ознакомившись с массовым применением эрозионной технологии при изготовлении деталей карбюратора, завод принял решение о его приобретении и применении. Послав заявку в Госплан СССР, в 1958 году комбайновый завод приобрел станок ЛКЗ–18 № 8 и начал выпуск ковочных штампов. Затраты на их изготовление снизились на 20 – 30% при увеличении стойкости на 15 – 25% [1, 3].

Параллельно на Тульском машиностроительном заводе (ТМЗ) был создан участок из 7 станков для изготовления штампов, в том числе твердосплавных.

На ТМЗ в 1964 году в кузнечном цехе был организован комплексный участок изготовления кузнечных, чеканочных и отрубных штампов с применением эрозионной технологии на всей гамме станков, изготавливаемых в СССР. Графитовые электроды изготавливались на вихрекопировальных станках. Была организована конструкторско-технологическая лаборатория, а затем создан конструкторско-технологический отдел электрических методов обработки с экспериментально-производственной базой.

В Тульском политехническом институте ректором Ф.В. Седыкиным была организована подготовка инженеров, владеющих разработкой и проектированием процессов электрообработки. Тульским машзаводом для Тульского политехнического института была построена и оборудована лабораторная база для обучения специалистов и проведения научно-исследовательских работ по электрическим методам обработки.

Отличительная особенность развития и применения методов ЭЭО на ТМЗ состоит в том, что наряду с широким применением этого метода в инструментальном производстве для получения штампов пресс-форм и др. процесс высокоэффективно выполняется для обработки сложно-фасонных деталей основного производства.

Так, за период 70-х годов количество электроэрозионных станков на 15 производственных участках достигло 100, а число типов–деталей, обрабатываемых методом ЭЭО, превысило 300.

Из множества разработанных и внедренных в производство электроэрозионных технологий наиболее эффективными явились следующие процессы:

1. Процесс электроискрового легирования крупногабаритных корпусов, который заменил термообработку и существенно повысил качество деталей.
2. Процесс многоэлектродной ЭЭО, значительно повысивший производительность и обеспечивший высокий экономический эффект.
3. Оригинальные технологические процессы ЭЭО в сочетании с ультразвуковым упрочнением.

В лаборатории электрофизических методов обработки ТМЗ интенсивно проводились научно-исследовательские работы по усовершенствованию процесса ЭЭО, расширению его технологических возможностей.

Так, в 1985 – 1995 годы выполнены работы по исследованию и разработке оригинальных процессов ЭЭО:

1. Процесс ЭЭО в магнитном поле (МП).
2. Процесс многоэлектродной ЭЭО с орбитальным движением ЭИ (электрода инструмента, процесс электроэрозионной «притирки»).

При чистовой ЭЭО из-за весьма малого межэлектродного промежутка (МЭП) возникают трудности по удалению продуктов эрозии, смены рабочей жидкости, а также помехи нормальной работе регулятора МЭП.

Условия удаления продуктов эрозии из МЭП существенно влияют на производительность и точность ЭЭО, и это наиболее значимо при доводочных режимах обработки, когда выдерживается высокая точность 0,01 – 0,03 мм при малой величине МЭП  $\delta = 0,015 - 0,02$  мм при высокой частоте электрических разрядов  $f = 200$  кГц и малых значениях энергии импульсов порядка  $W = 0,001$  Дж.

В этом случае процесс ЭЭО неустойчив и малопродуктивен, характеризуется малым значением коэффициента полезного использования электрических импульсов, большое число их расходуется на «шлакование» продуктов эрозии. Этот недостаток значительно усугубляется при больших обрабатываемых поверхностях [4].

Задача интенсификации прокачки рабочей жидкости в МЭП решалась с использованием обобщенного уравнения (1):

$$V = \frac{K \cdot \Delta P(W)}{r(\delta\eta)}, \quad (1)$$

где  $\Delta P(W)$  – градиент гидравлического давления МЭП, обусловленный прохождением электрического разряда с энергией  $W$ ,  $r(\delta, \eta)$  – коэффициент гидравлического сопротивления МЭП,  $\delta$  – величина МЭП,  $\eta$  – вязкость рабочей жидкости,  $V$  – скорость прокатки рабочей жидкости (РЖ). Увеличение  $V$  наиболее эффективно может быть достигнуто увеличением  $\delta$ , однако последний обуславливает условие электрического пробоя:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{\delta}, \quad (2)$$

то есть увеличение  $\delta$  определяет увеличение  $U_{np}$  при  $E_{np} = \text{const}$ .

Последнее обстоятельство связано с увеличением энергии импульсов  $W$  и шероховатости  $R_z$ .

В связи с этим задача интенсификации ЭЭО решалась способом увеличения  $\delta$  при сохранении неизменным  $U_{np}$  и  $W$ , что достигается созданием магнитного поля (МП), обеспечивающего уменьшение диэлектрической прочности рабочей жидкости в МЭП.

Создание МП в МЭП увеличивает величину рабочего межэлектродного промежутка при сохранении параметров рабочих импульсов генератора.

Магнитное увеличение МЭП способствует улучшению прокачки РЖ, что способствует повышению стабильности и производительности процесса ЭЭО.

Увеличение МЭП позволяет производить черновую и чистовую ЭЭО одним ЭИ, при этом должно обеспечиваться условие:

$$\delta_{\text{ч}} + \Delta_{\text{чист}} \leq \delta_{\text{чист}} + \Delta\delta_{\text{м}}, \quad (3)$$

где  $\delta_{\text{ч}}$  – величина МЭП при черновой ЭЭО;  $\delta_{\text{чист}}$  – величина МЭП при чистовой ЭЭО без магнитного поля;  $\Delta\delta_{\text{м}}$  – увеличение МЭП, вызванное включением МП;  $\Delta_{\text{чист}}$  – припуск, снимаемый при чистовой ЭЭО.

ЭЭО в магнитном поле позволяет достичь более высокой точности обработки с более низкой шероховатостью при меньшей толщине термически измененного слоя, поскольку появляется возможность осуществить процесс ЭЭО с меньшими энергиями импульсов.

ЭЭО без МП с такими малыми энергиями невозможна из-за малости величины МЭП (процесс ЭЭО нестабилен и происходит в основном «шлакование» продуктов эрозии).

Интенсификация процесса ЭЭО в МП вызывается действием в МЭП следующих факторов:

1. Образованием мостиков из шлама с повышенной электропроводностью вдоль магнитных силовых линий.

2. Уменьшением работы выхода электронов из электрода-инструмента и уменьшением пробивного напряжения МЭП.

3. Сжатием плазменного канала при разряде, повышением плотности плазмы, ее температуры, электропроводности.

4. Повышением локальности процесса ЭЭО, так как разряды наиболее вероятны в местах наименьшего МЭП, где индукция МП – максимальная.

При создании МЭП в магнитном поле в вершинах микровыступов происходит концентрация силовых линий и в этих зонах локальная диэлектрическая прочность уменьшается в большей степени.

Электроэрозионная обработка металлов нашла на тульских предприятиях широкое применение не только как формообразующая, но и упрочняющая операция, позволяющая существенно повысить долговечность деталей, работающих в условиях повышенных контактных давлений и износа. При этом условия нагружения зависят от требований к формированию термически упрочненного слоя определенной толщины, соответствующей глубине положения зоны, на которой должны быть обеспечены необходимые прочностные характеристики материала. В противном случае наблюдается подслоное разрушение и поверхностное упрочнение оказывается неэффективным.

Свойства поверхностного слоя оказывают определяющее влияние на долговечность деталей при нанесении твердых износостойких и коррозионно-стойких покрытий при процессах гальванического хромирования и плазменного напыления. Повышение предела выносливости материала подложки обеспечивает нераспространение трещин их покрытия в сталь. В этом случае глубина зоны термического упрочнения также влияет на долговечность деталей.

Электронно-микроскопические исследования дислокационной структуры образцов из железа и стали, подвергнутых усталостному нагружению с симметричным знакопеременным циклом (изгиб) с коэффициентом асимметрии, равным единице, свидетельствуют о том, что на стадии зарождения трещин возникновение усталостных полос скольжения ограничивается слоем толщиной 6 – 7 мкм. Увеличение плотности дислокаций наблюдается на глубинах 15 – 30 мкм. Таким образом, затормаживание источников размножения дислокаций в поверхностном слое толщиной несколько десятков микрометров препятствует зарождению и развитию усталостных трещин.

При нанесении на поверхность износостойких покрытий в них уже на стадии роста могут формироваться трещины, которые в процессе усталостного нагружения «прорастают» в подложку. У острия трещины образуется зона градиента напряжений протяженностью около 0,1 мм, в которой отрицательное влияние хрупких износостойких покрытий может быть устранено предварительным упрочнением поверхности на эту глубину.

Необходимым условием термического упрочнения стали является ее аустенизация при нагреве, которая протекает в слое определенной толщины с температурой, превышающей некоторое критическое значение, причем время нагрева должно быть достаточным для полного фазового превращения в процессе эрозионной обработки. Таким образом, критериальная оценка наличия упрочнения основывается на совместном решении уравнения теплопроводности и аналитического выражения кинетики фазового превращения в зависимости от температуры.

Оценка скорости охлаждения поверхностного слоя свидетельствует о том, что при длительностях импульса не более 600 мкс она превышает критические значения, необходимые для мартенситного превращения в конструкционных, легированных и углеродистых сталях.

Следовательно, условие полной аустенизации слоя заданной толщины представляет собой критерий термического упрочнения поверхностного слоя при электроэрозионной обработке.

Результаты расчетов плотности потока энергии, необходимой для термического упрочнения слоя толщиной  $\delta$ , свидетельствуют о том, что глубина прокаливания 0,1 мм может быть достигнута в

диапазоне длительностей импульсов от 100 до 600 мкс и приводит к неполной закалке. Результаты измерения микротвердости свидетельствуют о том, что при больших длительностях импульсов имеется тенденция к ее снижению непосредственно у поверхности в слое толщиной 10 – 30 мкм по сравнению с глубже расположенной термически упрочненной зоной [5, 6].

Для практических расчетов и выбора режима электроэрозионного упрочнения поверхности под последующее хромирование на основании расчетной величины  $q_c$  определяется значение энергии импульса при помощи следующего выражения:

$$Q = \chi q_c S_n, \quad (4)$$

где  $\chi = 4$  – коэффициент использования энергии разряда,  $S_n$  – площадь источника тепла.

Эффективность поверхностного упрочнения экспериментально проверяли при испытании образцов на копре повторного удара КПУ-2 при энергии единичного удара 1,8 Дж. Образцы изготавливали из закаленной стали 30ХН2МФА (42 – 46 HRC) размерами 10×10×55 мм, с полукруглым надрезом радиусом 2 мм и глубиной 3 мм. Надрез получали шлифованием, а также электроэрозионной обработкой на станке 4Д723 при двух режимах:

Параметры	Режим 1	Режим 2
Энергия импульса, Дж	1,2 – 1,6	0,07 – 0,08
Длительность, мкс	360	20
Ток, А	30 – 40	15 – 20
Полярность	Обратная	Обратная

Часть образцов после формирования надреза подвергалась гальваническому хромированию.

Результаты испытаний шлифованных образцов свидетельствуют о том, что их долговечность составляет в среднем 3690 ударов. После хромирования она снижается на 10%. Эрозионная обработка по режиму 1 повышает долговечность по сравнению со шлифованием на 56%. Для хромированных образцов после эрозионного упрочнения повышение долговечности по сравнению с неупрочненными образцами составляет 80%. Упрочнение по режиму 2 повышает долговечность на 37%.

Металлографические исследования поверхностного слоя хромированных образцов после испытаний на копре повторного удара подтверждают эффективность предварительного электроэрозионного упрочнения подложки. Поперечные срезы, изготовленные на образцах после 2500 ударов, свидетельствуют о наличии трещин, прорастающих через хромовое покрытие в неупрочненную стальную матрицу на глубину 100 – 120 мкм.

В образцах, упрочненных по режиму 2, наблюдаются трещины, распространяющиеся из хромового покрытия на глубину 20 – 30 мкм и в отдельных случаях прорастающие из упрочненного слоя в матрицу. При обработке по режиму 1 на данной базе испытаний разрушения хромового покрытия и растрескивания стальной матрицы практически не наблюдается.

Комбинированные электроэрозионные методы, способствующие повышению и стабилизации долговечности деталей машин, которые функционируют в условиях эрозионно-механического, термо-эрозионного, ударно-абразивного изнашивания и циклического знакопеременного нагружения, широко применяются вследствие создания в поверхностном слое оптимальных значений параметров качества (макро- и микрогеометрическая точность; распределение твердости; эпюра внутренних остаточных напряжений; структурный и фазовый состав поверхностного слоя и др.) Полученные результаты приводят к необходимости рассмотреть в целом изменения металлофизических параметров поверхностей деталей машин, подвергаемых воздействию комбинированных параллельно-последовательных электротехнологических методов, таких как лазерное термоупрочнение (ЛТО) и ультразвуковое выглаживание (УЗВ); электроискровое легирование (ЭИЛ) и УЗВ [7, 8].

Параллельными называются комбинированные сочетания, когда воздействия объединены в единый энергетический центр, а последовательными – комбинированные сочетания, когда воздействия располагаются в последовательную цепь. Параллельно-последовательными называются комбинированные сочетания, включающие сформированную последовательную цепь с наличием единых энергетических центров воздействий.

Исследование оптимизации параметров качества поверхностного слоя сочетаний осуществлялось в условиях экспериментальных исследований, стендовых и натурных испытаний. Рассмотрим характер взаимосвязи параметров качества с достигаемыми эффектами прироста долговечности.

Установлены следующие прямые связи:

– ЛТО и УЗВ – ударно-абразивный износ макро- и микрогеометрическая точность; распределение твердости, эпюры внутренних остаточных напряжений; структурно-фазовый состав поверхностного слоя;

– ЭИЛ и УЗВ – ударно-абразивный износ макро- и микрогеометрическая точность; распределение твердости, эпюры внутренних остаточных напряжений; структурно-фазовый состав поверхностного слоя.

Обеспечение долговечности в условиях ударно-абразивного изнашивания при использовании последовательных комбинаций (ЛТО + УЗВ; ЭИЛ + УЗВ) реализуется при направленном изменении твердости, эпюры внутренних остаточных напряжений, структуры и фазового состава поверхностного слоя. Улучшение макро- и микрогеометрической точности при установленных оптимальных режимах незначительно и составляет 5 – 6%, в то же время изменение величин, характеризующих распределение твердости, для последовательных методов (ЛТО + УЗВ; ЭИЛ + УЗВ) составляет 45 – 50 и 30 – 45% соответственно. В поверхностном слое осуществляется образование сжимающей эпюры напряжений, обеспечивающей прирост последних на 30 – 45%. Все это способствует повышению долговечности в условиях циклического нагружения на 5 – 8%.

Трибологическая апробация комбинированных последовательных сочетаний (реализуя принципы исключения, совмещения) создает 1,5 – 2-кратный запас долговечности в условиях ударно-абразивного изнашивания. Эти результаты объясняются трансформацией структуры поверхностного слоя (принцип совмещения) в условиях УЗВ, которая снижает содержание аустенитных составляющих с 35 – 40 до 2 – 5%. Подобный эффект приводит к повышению поверхностной твердости, формированию эпюры внутренних остаточных напряжений. В условиях изнашивания когезивно-адгезионный механизм, сопровождаемый макро- и микродефектами поверхностного слоя, трансформируется в граничный трибохимический, формируя 1,5 – 2-кратный прирост долговечности.

Электроискровое легирование (ЭИЛ) является эффективным методом повышения поверхностной твердости и износостойкости, однако ему присущ ряд недостатков, сдерживающих применение метода для упрочнения деталей машин, работающих в условиях циклического ударного нагружения и вибраций. Вредные остаточные напряжения, микротрещины, неоднородность слоя по толщине и механическим свойствам приводят к снижению характеристик усталостной прочности и ограниченной долговечности на 40% и более.

Повышение эффективности поверхностного упрочнения достигается применением комплексных технологических процессов. В целях рационального проведения таких процессов используется концепция независимости удельной энергии разрушения от формы подводимой энергии, позволяющая использовать термодинамические константы твердого тела для оценки интенсивности воздействий. Выбор конкретных операций основывается на анализе механизма структурных превращений в поверхностном слое.

Независимо от формы энергии внешнего воздействия при поверхностном упрочнении предельный уровень ее накопления в искажениях кристаллической решетки не может повышать удельной теплоты плавления. Поскольку для уменьшения возможности схватывания при образовании пятен контакта в процессе трения необходимо иметь возможно большие искажения кристаллической решетки, то с данной точки зрения эффективность упрочняющих операций оценивается путем сравнения уровня накопленной энергии с удельной теплотой плавления материала поверхностного слоя.

Анализ вклада различных типов дефектов кристаллической решетки в избыточную свободную энергию кристалла свидетельствует о том, что она более чем на 90% заключена в энергии дислокационных скоплений. Поэтому для характеристики эффективности поверхностного упрочнения при том или ином методе поверхностного упрочнения необходимо определить плотность дислокаций в исследуемом материале. Качественные различия в поглощении энергии в зависимости от ее формы и дозировки при различных видах внешних воздействий проявляются в том, что предельный уровень в локальных микрообъемах достигается при разных значениях средней концентрации избыточной свободной энергии.

В результате этого повышение ограниченной долговечности не сопровождается повышением износостойкости. Таким образом, принципу компенсации вредных воздействий не сопутствует при этом усиление упрочняющего действия предшествующей операции. Ультразвуковая обработка вызывает процесс динамического возврата в результате эффективного подвода энергии внешнего воздействия к заторможенным дислокациям, накопленным при ЭИЛ. Перемещение и аннигиляция дислокаций разного знака способствуют не только снижению пиковых искажений, но и стимуляции мар-

тенситного превращения в остаточном аустените без снижения прочности мартенситной основы, сформированной в процессе ЭИЛ. Выполнение принципов компенсации вредного влияния и усиления положительных свойств предшествующей операции способствует одновременному повышению характеристик усталостной износостойкости и ограниченной ударной долговечности упрочненных таким способом деталей. Объемные изменения, сопровождающие мартенситное превращение в остаточном аустените, приводят к формированию сжимающих напряжений в поверхностном слое, величина которых не уступает формируемому при дробеструйном и ультразвуковом упрочнении. Поэтому упрочненные таким способом образцы превосходят по ограниченной долговечности шлифованные, несмотря на более грубую шероховатость поверхности.

Металлофизические исследования свидетельствуют о том, что легирующее покрытие на закаленных образцах не разрушается при УЗВ, а его шероховатость существенно снижается. На отожженных образцах наблюдаются локальное разрушение и продавливание слоя, а также наволакивание материала на легируемый слой, снижающие характеристики износостойкости и ограниченной долговечности. Следовательно, для достижения максимальной эффективности упрочнения образцы в исходном состоянии должны иметь твердость не ниже НВ 300 – 350.

Испытания упрочненных образцов на износ и ограниченную ударную долговечность показали преимущества комбинированных процессов упрочнения по сравнению с ЭИЛ. Они позволяют одновременно повысить обе характеристики в отличие от применения составляющих их отдельных операций.

Наиболее существенное повышение износостойкости (почти в два раза по сравнению с ЭИЛ) достигнуто при комбинации ЭИЛ с УЗВ. Одновременное повышение ограниченной долговечности образцов открывает перспективу успешного использования данного процесса для повышения эффективности поверхностного упрочнения деталей машин, работающих в условиях контактного износа и циклических ударных нагрузок.

С учетом вышеизложенного необходимо отметить огромное влияние работы Бориса Романовича и Натальи Иосафовны Лазаренко на развитие научно-технического прогресса на предприятиях Тулы. Профессор, д.т.н. Федор Владимирович Седыкин, наш учитель, также способствовал тому, чтобы гениальные идеи супругов Лазаренко применялись в промышленности Тулы. Необходимо подтвердить и воздействие идей, опыта, интеллекта еще одного сподвижника академика Бориса Романовича Лазаренко – профессора, д.т.н. Бориса Никифоровича Золотых. Технология, внесенная в реальную коммерческую сферу производства, включает эрозионные технологии, комбинации на основе эрозионных методов, лазерные технологии. В контексте последних работ академика Б.Р. Лазаренко будет подготовлена научно-техническая основа для последующего промышленного применения. И сейчас АК «Туламашзавод» выпускает приборы и оборудование в области лазерной техники и поставляет их во многие страны мира: США, Китай, Германию, Швецию, Швейцарию, Финляндию, Болгарию, Россию и другие во многом благодаря громадной научно-технической деятельности первооткрывателей эрозионных методов – супругов Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Лазаренко Б.Р.* Некоторые научные проблемы электрической эрозии материалов // *Электронная обработка материалов.* 1969. № 2. С. 7 – 11.
2. *Лазаренко Н.И., Лазаренко Б.Р.* Электроискровое легирование металлических поверхностей // *Электронная обработка материалов.* 1977. № 3. С. 12 – 17.
3. *Лазаренко Б.Р.* Лазерное воздействие на покрытие, полученное методом электроискрового легирования // *Электронная обработка материалов.* 1978. № 3. С. 10 – 14.
4. *Золотых Б.Н.* Физические основы электрофизических и электрохимических методов обработки. М., 1975.
5. *Лукичев Б.Н., Белобрагин Ю.А., Усов С.В., Щербина В.И.* Повышение эффективности поверхностного упрочнения при электроискровом легировании деталей машин // *Электронная обработка материалов.* 1987. № 4. С. 22 – 25.
6. *Усов С.В.* Повышение долговечности деталей с помощью комбинированных методов обработки // *Сверхтвердые материалы.* 1988. № 2. С. 52 – 56.
7. *Усов С.В.* Разработка комбинированных электротехнологических методов, повышающих ограниченную долговечность деталей машин // *Проблемы прочности.* 1988. № 3. С. 108 – 114.

### 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