



**ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА
НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ
ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ**

В.К. Драгунов, Г.М. Петрухин

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
111250 Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
Тел.: +7(495)362-77-22; e-mail: DragunovVK@mpei.ru

Заключение совета рецензентов: 19.11.15 Заключение совета экспертов: 22.11.15 Принято к публикации: 25.11.15

По своим технологическим показателям электрохимическая размерная обработка (ЭХРО) имеет ряд уникальных особенностей, позволяющих ей конкурировать с другими методами размерного формообразования. Подчеркивается важность, в условиях бурного внедрения станков с ЧПУ, дальнейшего совершенствования технологических показателей ЭХРО. Электрохимическая размерная обработка сопровождается выделением на катоде газообразного водорода. Рассмотрено влияние водорода на устойчивость и производительность процесса обработки. Установлены условия устойчивости процесса ЭХРО и достижения максимальной производительности.

Ключевые слова: электрохимическая размерная обработка, катодное выделение водорода, устойчивость процесса.

**THE HYDROGEN IMPACT ON THE EFFICIENCY AND STEADINESS
OF THE ELECTROCHEMICAL MACHINING TREATMENT**

V.K. Dragunov, G.M. Petrukhin

National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI)
14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
Tel.: +7(495)362-77-22, e-mail: DragunovVK@mpei.ru

Referred: 19.11.15 Expertise: 22.11.15 Accepted: 25.11.15

The electrochemical machining treatment (ECMT) has the several unique characteristics, which give the advantages over the other methods of materials mechanical treatment. The importance of further development of ECMT and the necessity of its technological parameters improvements, stipulated by the rapid integration of CNC machines, are shown. The influence of hydrogen, produced on the cathode during the ECMT, on its stability and efficiency is researched. The conditions, providing the stable ECMT process with the ultimate efficiency, are proposed.

Keywords: electrochemical machining treatment, hydrogen cathode emission, process stability.



Виктор Карпович
Драгунов
Viktor K. Dragunov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Технологии металлов» МЭИ.

Образование: МЭИ (1982).

Область научных интересов: технологии и оборудование для обработки материалов концентрированными потоками энергий, электронно-лучевая сварка.

Публикации: более 100.

Information about the author: Dr. Sci. (engineering), professor, head of the “Technology of metals” department.

Education: MPEI (1982).

Research area: technology and equipment for concentrated energy flows processing of materials, electron beam welding.

Publications: more than 100.



Геннадий Михайлович
Петрухин
Gennady M. Petrukhin

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии металлов» МЭИ.

Образование: Московский авиационный технологический институт (1976).

Область научных интересов: технологические процессы обработки материалов.

Публикации: более 30.

Information about the author: PhD, associate professor of the “Technology of metals” department.

Education: Moscow Aviation Institute (1976).

Research area: technologies of materials treatment.

Publications: more than 30.



Введение

Повышение производительности – одна из актуальных задач любого метода размерной обработки. Известно, что причины ограничения роста производительности обработки могут меняться в зависимости от конкретных условий проведения операции. В стратегическом плане препятствий повышению технических характеристик обрабатываемого оборудования и технологической оснастки нет, поэтому из причин, тормозящих рост производительности обработки, на первый план выходят ограничивающие факторы самого метода обработки, связанные, в общем случае, с физико-химическими процессами в рабочей зоне. Негативное действие последних может проявляться в ограничении стойкости инструмента или снижении до неприемлемого уровня качественных показателей обработки.

Электрохимическая размерная обработка (ЭХРО) не является исключением, но в отличие от традиционных методов формообразования процесс ЭХРО не сопровождается износом электрода-инструмента. Отсутствие связи производительности обработки и стойкости инструмента позволяет устанавливать режимы формообразования «по максимуму» для конкретных условий операции.

В последние годы уникальные технологические особенности этого метода обработки находят все большее применение для обработки мелкоразмерных полостей и деталей малой жесткости, выдерживая

конкуренцию с трех- и пятикоординатными фрезерными станками с ЧПУ [1, 2]. Однако возросшая конкуренция механических методов обработки требует дальнейшего совершенствования технологических показателей ЭХРО.

Важнейшим показателем для ЭХРО остается точность формообразования, поскольку при общей относительно высокой производительности обработки точность всегда была «узким» местом этого метода. Удаление металла с заготовки при ЭХРО происходит в виде ионов, и потенциально этот метод мог бы обеспечить высочайшую точность обработки. Однако из-за сложности локализации съема на отдельных участках обрабатываемой поверхности такая возможность частично реализуется только при существенном уменьшении межэлектродных зазоров (с десятых долей миллиметра на постоянном токе до сотых долей миллиметра при импульсно-циклической обработке). Такое значительное снижение межэлектродного зазора сопровождается соответствующим снижением (в 10–15 раз) производительности обработки. В этих условиях становится актуальной задача оптимизации ЭХРО по критерию максимальной производительности. Рассмотрим этот вопрос для случая ЭХРО на постоянном токе при непрерывном движении электролита через межэлектродный промежуток и для условий импульсно-циклической ЭХРО, когда в рабочем межэлектродном промежутке из-за малости межэлектродного зазора электролит можно считать практически неподвижным.

Анализ причин нарушения устойчивости ЭХРО

Достижение предельных режимов ЭХРО преимущественно связывается с процессом катодного выделения водорода [3, 4]. Производительность ЭХРО в результате влияния катодного газовыделения снижается, и сам процесс при определенных условиях может быть полностью блокирован. Катодный водород в потоке электролита формируется вдоль катодной поверхности в виде клина из газовых пузырьков. Толщина этого пузырькового клина растет по ходу движения электролита и может достичь поверхности анода. Мелкие газовые пузырьки в этих условиях могут сливаться в более крупные газовые образования. С ростом газосодержания (отношения объема газа к объему межэлектродного промежутка) непрерывный режим течения электролита может перейти в пульсирующий как результат образования в межэлектродном промежутке газовых пробок. Развитие пульсаций может привести к явлению «фазового запирания», при котором газовая пробка, занимая значительную часть межэлектродного промежутка, нарушает процесс анодного растворения.

Для предотвращения момента «фазового запирания» представляется естественным повышение скорости течения электролита, что позволило бы снизить газосодержание электролита в межэлектродном промежутке. Однако повышение скорости течения электролита может привести к «гидродинамическому запираению» межэлектродного промежутка. Причина «гидродинамического запираения» в том, что скорость течения электролита ограничена моментом достижения потоком местной скорости звука, величина которой быстро падает с ростом газосодержания в рабочем промежутке. При равных объемах жидкой и газовой фаз в межэлектродном промежутке местная скорость звука сопоставима с рабочими значениями скорости электролита 12,5 м/с. Явление «гидродинамического запираения» ограничивает предельный расход электролита. По этой причине предлагается ограничивать область оптимальных режимов ЭХРО пределами гидродинамической устойчивости процесса.

Влияние катодного газовыделения на предельные режимы обработки рассматривалось и для условий импульсно-циклической ЭХРО. И для этих условий отмечено негативное влияние катодного водорода на предельные режимы обработки. Установлено, что импульсная обработка на малых зазорах эффективна в каждом импульсе до момента достижения определенного (приблизительно 0,7) газосодержания электролита в межэлектродном промежутке.

Негативное влияние катодного выделения водорода на предельные режимы обработки подтверждается работами многих исследователей, однако однозначности в этом вопросе нет. Ряд исследователей [5], изучая природу факторов, ограничивающих предельную скорость ЭХРО, отметили, что нестабильность процесса и электрический пробой межэлектродного зазора являются следствием локального

перегрева электролита. Исследуя возможности энерговодата в межэлектродный промежуток в режиме импульсной ЭХРО, авторы пришли к выводу, что предельная длительность импульса ограничена моментом закипания электролита. В разработанной по результатам экспериментов физической модели «фазового запираения» межэлектродного промежутка принимается во внимание только нагрев электролита. В исследованиях влияния электродного газовыделения на электропроводность электролита был сделан вывод, что нагрев электролита и его газонаполнение по степени воздействия на электропроводность равнозначны, и они взаимосвязаны друг с другом при любых условиях ЭХРО.

Противоречат однозначному принятию той или иной причины нарушения устойчивости процесса ЭХРО и результаты исследования зависимости производительности от напряжения на электродах [6]. Эксперименты показали, что функция изменения производительности от напряжения для различных зазоров имеет экстремальный характер. Максимум производительности наблюдался при напряжениях 12–16 В. Причина такого характера изменения производительности осталась невыясненной.

Из приведенного краткого анализа можно сделать вывод, что, с одной стороны, возможные причины нарушения устойчивости процесса ЭХРО известны – это электродное газовыделение и закипание электролита, а с другой, отсутствует единое мнение на преобладающее влияние какой-либо из них на предельную производительность ЭХРО. Разберем этот вопрос аналитически.

Условия нарушения устойчивости процесса ЭХРО

Для большинства случаев влияние тепло- и газовыделения на процесс ЭХРО может быть раскрыто с применением метода одномерного описания, в котором смесь жидкой и газовой фаз считается некоторой псевдонепрерывной средой с усредненными свойствами по сечению потока.

Примем следующие допущения:

- ширина межэлектродного промежутка постоянна;
- в процессе обработки сохраняется плоскопараллельность межэлектродного промежутка;
- нагрев электролита происходит в результате джоулева тепловыделения, то есть воздействие всех других источников нагрева компенсируется теплопередачей через поверхность электродов.

Начало координат поместим в заданную точку рабочей поверхности катода. Ось x направим вдоль по потоку, а y – по нормали к нему. При таких условиях процесс ЭХРО описывается следующей системой уравнений [6]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + W \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{U^2 x}{S^2 (1 - \beta) \rho C_p}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \tau} + W \frac{\partial \beta}{\partial x} = \frac{\eta_{H_2} S_{H_2} U x R T}{S^2 \rho}; \quad (2)$$

$$x = x_n (1 + \alpha \theta) (1 - \beta)^n. \quad (3)$$

где θ , β – прирост температуры и газосодержание; τ – время; W – скорость электролита; U – напряжение; η_{H_2} , ϵ_{H_2} – выход по току и электрохимический эквивалент водорода; x – удельная электропроводность электролита; T , P – температура и давление электролита; ρ , C_p – плотность и удельная теплоемкость электролита; α – температурный коэффициент электропроводности электролита.

Примем следующие начальные и граничные условия:

$$\theta(x, 0) = 0; \quad \theta(0, \tau) = 0;$$

$$\beta(x, 0) = 0; \quad \beta(0, \tau) = 0.$$

Рассмотрим случай импульсно-циклической ЭХРО. Из-за малой величины межэлектродного зазора можно принять условие неподвижности электролита 0. Система (1)–(3) при неизменных начальных условиях принимает вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{U^2 \chi}{S^2 (1 - \beta) \rho C_p}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \tau} = \frac{\eta_{H_2} S_{H_2} U x R T}{S^2 \rho}; \quad (5)$$

$$\chi = \chi_n (1 + \alpha \theta) (1 - \beta)^n. \quad (6)$$

Из совместного решения (4) и (5) соотношение между приростом температуры электролита и газосодержанием определяется как

$$\frac{d\beta}{1 - \beta} = \frac{\eta_{H_2} \epsilon_{H_2} \rho C_p R T}{S^2 P} d\theta. \quad (7)$$

Таким образом, чем ниже среднее давление электролита и напряжение, тем существенней прирост газосодержания по отношению к приросту температуры. Поскольку в последнем уравнении отсутствует величина межэлектродного зазора, то эта закономерность сохраняется для ЭХРО с любым законом движения электрода-инструмента.

Рассмотрим влияние теплогазовыделения на предельные (максимальные) режимы ЭХРО. В общем случае нарушение процесса ЭХРО наблюдается, если эффективная удельная электропроводность электролита на каком-либо участке межэлектродного промежутка стремится к предельному значению, что, согласно (3), соответствует условию, когда газосодержание в межэлектродном промежутке приближается к единице. Если температура электролита ниже температуры кипения, то газовая фаза в промежутке

состоит только из продуктов электролиза. В случае перегрева электролита появляется новый источник газовой фазы – испарение электролита. Скорость образования пара значительно превосходит скорость электродного газосодержания (при 15 В более чем на порядок), и, соответственно, время от момента закипания электролита до момента фазового «запирания» межэлектродного промежутка мало, поэтому условия прекращения процесса ЭХРО принимают следующий вид:

$$\beta = \beta_{кр} \quad (8)$$

или (и)

$$T = T_{фп}, \quad (9)$$

где $\beta_{кр} = 0,5-0,7$ – критическая величина газосодержания; $T_{фп}$ – температура фазового превращения (кипения) электролита.

Поскольку соотношение между газосодержанием и приростом температуры зависит от произведения величин давления электролита и напряжения (см. (7)) и пределы изменения β и θ ограничены, то величина этого произведения и определяет условия нарушения процесса ЭХРО. Величина давления электролита за время импульса напряжения непрерывно меняется, причем управлять этим процессом практически сложно, поэтому основным параметром, который может быть использован для регулирования соотношения между газосодержанием и температурой электролита, остается напряжение. Напряжение, при котором с интенсификацией обработки, например, уменьшением зазора, нарушение процесса ЭХРО наступает от одновременного воздействия катодного газосодержания и перегрева электролита, можно назвать напряжением равного влияния ($U_{рв}$).

Условия достижения максимума производительности ЭХРО

Условия достижения максимума производительности ЭХРО в пульсирующем электролите можно оценить по предельной величине количества электричества $q_{пр}$, вводимого в межэлектродный промежуток.

Предельную величину $q_{пр}$ для случая ЭХРО при $U \leq U_{рв}$ найдем из (5):

$$q_{пр} = \frac{\beta_{кр} P_{ср}}{\eta_{H_2} \epsilon_{H_2} R T}, \quad (10)$$

а для ЭХРО при $U > U_{рв}$ – из (4):

$$q_{пр} = \frac{\rho C_p \theta_{кр}}{U \left(1 + \frac{\eta_{H_2} \epsilon_{H_2} \rho C_p R T}{2 U P_{ср}} \right)}. \quad (11)$$

Для анодного процесса предельным значениям $q_{пр}$ соответствует предельная величина производительности обработки. Как следует из (10), при $U < U_{рв}$



величина предельной производительности ЭХРО непосредственно не зависит от напряжения, а меняется в соответствии с изменением давления электролита, в то время как при $U > U_{\text{дв}}$ (см. (11)) предельная производительность обратно пропорциональна напряжению. В первом случае определяющее влияние на максимум производительности оказывает электродное газовыделение, во втором – закипание электролита. Таким образом, для ЭХРО при $U < U_{\text{дв}}$ предельная длительность импульса напряжения должна рассчитываться из условия достижения критического газосодержания в МЭП, а для ЭХРО при $U > U_{\text{дв}}$ рассчитывается из условия нагрева электролита до температуры кипения.

Поскольку в общем случае предельные параметры процесса ЭХРО достигаются при различной температуре электролита, то, следовательно, и удельная энергия, вводимая в межэлектродный промежуток до наступления предельных параметров, не постоянна, а зависит от условий ЭХРО. Физическая модель фазового «запирания» межэлектродного промежутка, разработанная в [7], не учитывает этого, поэтому рассмотрим этот вопрос подробнее. Вводимая за импульс удельная энергия ($E_{\text{уд}}$) определяется как

$$E_{\text{уд}} = \frac{U}{S} \int_0^{\tau} j d\tau.$$

Применяя теорему Лагранжа о среднем, определим предельное значение удельной энергии для $U < U_{\text{дв}}$ и $U > U_{\text{дв}}$ из (4) и (5):

при $U < U_{\text{дв}}$

$$E_{\text{уд}} = \frac{U\beta_{\text{кр}}P_{\text{кр}}}{\eta_{\text{H}_2}\epsilon_{\text{H}_2}RT}, \quad (12)$$

при $U > U_{\text{дв}}$

$$E_{\text{уд}} = \frac{\rho C_p \theta_{\text{кр}}}{1 + \frac{\rho C_p \theta_{\text{кр}}}{\eta_{\text{H}_2}\epsilon_{\text{H}_2}\rho C_p RT}} \cdot \frac{1}{2UP_{\text{кр}}}. \quad (13)$$

Анализ последних уравнений позволяет раскрыть причины противоречивости выводов исследователей о влиянии теплогазовыделения на предельные режимы ЭХРО. С некоторой долей погрешности уравнения (12) и (13) можно представить в упрощенном виде:

для случая $U < U_{\text{дв}}$

$$E_{\text{уд}} \cong \text{const} \cdot U\beta_{\text{кр}}; \quad (14)$$

для случая $U > U_{\text{дв}}$

$$E_{\text{уд}} \cong \text{const} \cdot \theta_{\text{кр}}. \quad (15)$$

Величины $\beta_{\text{кр}}$, $\theta_{\text{кр}}$ не внесены в число постоянных только потому, что это позволяет для каждого случая

выделить основную причину нарушения устойчивости ЭХРО. Из сопоставления последних уравнений следует, что максимум удельной энергии, которую возможно ввести в межэлектродный промежуток, сохраняет постоянное значение только при напряжениях $U > U_{\text{дв}}$. Результаты экспериментальных данных и выводы, отмеченные в работе [5], можно объяснить тем, что эксперименты проводились при повышенных напряжениях (до 300 В). В этих условиях согласно (15) изменение удельной энергии от напряжения не существенно. Следовательно, рекомендуемая в этой работе формула для расчета предельной длительности импульса применима только для ЭХРО при высоких напряжениях. В пределах изменения $U < U_{\text{дв}}$ максимум удельной энергии пропорционален напряжению на электродах, и предельная длительность импульса, как отмечалось выше, должна рассчитываться из условия предельного газосодержания в МЭП.

Если в ходе эксперимента длительность импульса сохраняется постоянной, то (14) и (15) можно переписать в следующем виде:

для случая $U < U_{\text{дв}}$

$$q_{\text{уд}} \cong \text{const} \cdot \beta(U), \quad (16)$$

где β пропорционально напряжению и меняется в пределах $0 < \beta < \beta_{\text{кр}}$;

для случая $U > U_{\text{дв}}$

$$q_{\text{уд}} \cong \text{const} \cdot \theta_{\text{кр}}/U. \quad (17)$$

Таким образом, при постоянной длительности импульса изменение величины удельного количества электричества, а соответственно, и анодного съема металла, представляет экстремальную функцию с максимумом при $U = U_{\text{дв}}$. Это снимает трудности интерпретации результатов ранее рассмотренных экспериментов [6].

Продолжим рассмотрение для случая стационарного режима ЭХРО, когда все параметры по длине промежутка принимают установившееся и независимое от времени значение. В этом случае (1) и (2) при тех же граничных условиях принимают следующий вид:

$$W \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{U^2 \chi}{S^2 (1 - \beta) \rho C_p}; \quad (18)$$

$$W \frac{\partial \beta}{\partial x} = \frac{\eta_{\text{H}_2} \epsilon_{\text{H}_2} U \chi RT}{S^2 P}. \quad (19)$$

После совместного решения (18) и (19) получаем уравнение, полностью совпадающее с (7), что указывает на качественное подобие процессов, протекающих в рассматриваемом объеме электролита в случаях, если он неподвижен за время импульса или движется в межэлектродном промежутке со скоростью W .



Анализ результатов

Таким образом, независимо от способа ЭХРО и закона движения электрода-инструмента в процессе обработки, влияние электродного газовыделения на изменение эффективной удельной электропроводности межэлектродной среды тем существенней, чем меньше напряжение и давление электролита в промежутке, а критерий устойчивости (соответственно, критерий максимальной производительности) меняется в зависимости от напряжения на электродах.

Заключение

Из приведенного рассмотрения можно сделать ряд практических выводов:

– для повышения производительности ЭХРО нет необходимости в применении источников повышенного напряжения; максимум производительности достигается при напряжении $U = U_{рв}$;

– для ЭХРО некоторых металлов и сплавов с целью предотвращения пассивации необходима повышенная температура электролита; регулировать среднюю температуру электролита при импульсно-циклической ЭХРО возможно, изменяя напряжение на электродах;

– эффективным средством повышения максимальной производительности ЭХРО является снижение катодного газовыделения.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Соглашения от 28 ноября № 14.577.21.0148.

Уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (проекта): RFMEFI57714X0148.

Список литературы

1. Смоленцев В.П., Шаров В.П. Конкуренентоспособные технологии электрохимических методов обработки // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 4. С. 43-45.
2. Строщков В.П., Пшеничников В.А. Высокоточное скоростное электрохимическое формообразование – экономичный и ресурсосберегающий метод металлообработки // Технология машиностроения. 2008. № 6. С. 9-11.
3. Давыдов А.Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М.: Наука 1990.
4. Зайдман Г.Н., Корчагин Г.Н. Ограничения возможности повышения производительности электрохимической размерной обработки / В сб.: Электродные процессы в технологии электрохимической обработки материалов. Кишинев: «Штиинца», 1980. С. 54-63.
5. Рыбалко А.В., Зайдман Г.Н., Энгельгардт Г.Р. Определение времени «запирания» межэлектродного промежутка в импульсной ЭХО / В сб.: Размерная электрохимическая обработка деталей машин. Тула, 1980. С. 231-237.
6. Козак Е. и др. Исследование влияния параметров процесса на технологические показатели импульсной электрохимической обработки. VI международный симпозиум по электрическим методам обработки (ИСЕМ-6). Краков, ПНР. 1980. С. 309-314.
7. Рыбалко А.В., Зайдман Г.Н. Энергетические возможности импульсной электрохимической обработки металлов // Электронная обработка материалов. 1979. № 4. С. 17-30.

References

1. Smolencev V.P., Šarov V.P. Konkurentosposobnye tehnologii elektrohimičeskikh metodov obrabotki // Naukoemkie tehnologii v mašinstroenii. 2013. № 4. S. 43-45.
2. Stroškov V.P., Pšeničnikov V.A. Vysokotočnoe skorostnoe elektrohimičeskoe formoobrazovanie – èkonomičnyj i resursosberegaušij metod metalloobrabotki // Tehnologiâ mašinstroeniâ. 2008. № 6. S. 9-11.
3. Davydov A.D., Kozak E. Vysokoskorostnoe elektrohimičeskoe formoobrazovanie. M.: Nauka 1990.
4. Zajdman G.N., Korčagin G.N. Ograničeniâ vozmožnosti povyšeniâ proizvoditel'nosti elektrohimičeskoj razmernoj obrabotki // V sb.: Èlektrodnye processy v tehnologii elektrohimičeskoj obrabotki materialov. Kišinev: "Štiinca", 1980, S. 54-63.
5. Rybalko A.V., Zajdman G.N., Èngel'gardt G.R. Opredelenie vremeni «zapiraniâ» meželektrodnogo promežutka v impul'snoj ÈHO // V sb.: Razmernaâ elektrohimičeskaâ obrabotka detalej mašin. Tula, 1980. S. 231-237.
6. Kozak E. i dr. Issledovanie vliâniâ parametrov processa na tehnologičeskie pokazateli impul'snoj elektrohimičeskoj obrabotki // VI meždunarodnyj simpozium po električeskim metodam obrabotki (ISEM-6). Krakov, PNR. 1980. S. 309-314.
7. Rybalko A.V., Zajdman G.N. Ènergetičeskie vozmožnosti impul'snoj elektrohimičeskoj obrabotki metallov // Èlektronnaâ obrabotka materialov. 1979. № 4. S. 17-30.

Транслитерация по ISO 9:1995

