

# Влияние частоты следования импульсов на точность электрохимической размерной обработки никеля, меди и стали

\* С. М. Кузьмин<sup>a,b</sup>, \*\* Н. Г. Демьянцева<sup>b</sup>, \*\*\* А. В. Балмасов<sup>c</sup>, А. И. Тихонов<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ФГБУН «Институт химии растворов» РАН,

ул. Академическая, 1, г. Иваново, 153045, Россия, \* e-mail: [smk@isc-ras.ru](mailto:smk@isc-ras.ru)

<sup>b</sup> Ивановский государственный энергетический университет,

ул. Рабфаковская, 34, г. Иваново, 153003, Россия, \*\* e-mail: [demyantseva@bk.ru](mailto:demyantseva@bk.ru)

<sup>c</sup> Ивановский государственный химико-технологический университет,

пр. Шереметевский, 7, г. Иваново, 153000, Россия, \*\*\* e-mail: [balmasov@isuct.ru](mailto:balmasov@isuct.ru)

Показано, что в условиях импульсной электрохимической размерной обработки изменение частоты следования импульсов вызывает изменение параметра, характеризующего точность копирования формы электрода-инструмента в случае стали 08КП, никеля Н1 и меди М1. Влияние частоты следования импульсов на точность формообразования имеет одинаковый качественный характер, что позволяет расширить сформулированные ранее рекомендации по применению импульсных режимов. Обнаружена корреляция между степенью пассивации поверхности материала и величиной эффекта, достигаемого при применении импульсных режимов. Выдвинуто предположение о возможности привлечения для объяснения наблюдаемых эффектов известных теоретических положений о движении заряженных частиц в нестационарных неоднородных электрических полях.

*Ключевые слова:* электрохимическая обработка, точность формообразования, импульсные режимы, никель, медь, сталь.

УДК 544.653.22

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение необходимой точности копирования формы электрода-инструмента и достижение заданных параметров шероховатости обработанной поверхности являются одной из наиболее важных задач электрохимической размерной обработки [1–4]. Использование импульсных режимов обработки – один из эффективных методов повышения точности электрохимической размерной обработки (ЭХРО). Различные варианты данного вида обработки металлов, которые могут отличаться амплитудой, длительностью импульса и паузы, чередованием нескольких видов импульсов, кинематикой подачи электрода-инструмента [5] и т.д., доказали положительный эффект при решении технологических задач. Вопросы аппаратного обеспечения импульсного микро-ЭХРО и достижения последних лет в этой области обобщены в недавнем обзоре [6]. Тем не менее имеющиеся литературные данные не позволяют однозначно сформулировать причины положительного влияния импульсного режима на результат ЭХРО.

Очевидно, что, прикладывая к электродам импульс напряжения, мы выводим систему из стационарного состояния. Релаксация системы к другому состоянию сопровождается перераспределением заряда, ходом электрохимических и химических реакций и тепловыми эффектами,

обусловленными протеканием тока и химическими процессами. В случае, если режим ЭХРО представляет собой последовательность импульсов с определенной скважностью в течение паузы между импульсами, помимо релаксации двойного электрического слоя на электродах, могут происходить поверхностная или объемная химическая реакция, массоперенос продуктов и реагентов и перераспределение тепла. Совокупность релаксационных процессов, протекающих при возникновении импульса, за время паузы между импульсами приводит к специфическим эффектам, наблюдающимся экспериментально при импульсных режимах ЭХРО. Массоперенос в межэлектродном зазоре (МЭЗ) достаточно часто является лимитирующей стадией процесса растворения металла, определяющей его локальную скорость. Для ионной компоненты в неподвижной вязкой среде могут быть справедливы теоретические положения, рассматриваемые в [7–9], которые позволяют качественно оценить влияние периодического импульсного воздействия на движение заряженных частиц в неоднородном электрическом поле. В данных работах показано, что в случае неоднородного периодического электрического поля силы (усредненные по периоду колебания), действующие на частицу, и, следовательно, траектории движения частиц существенным образом зависят от частоты

ты внешнего поля. В результате в неоднородных нестационарных электрических полях должен наблюдаться эффект выталкивания заряженных частиц любого знака из области с большей напряженностью электрического поля в область с меньшей напряженностью. Теоретически предсказываемый эффект может являться достаточно существенным фактором при реализации импульсных режимов ЭХРО при малых межэлектродных расстояниях с существенной неоднородностью электрического поля.

Ранее [10–12] было показано, что при ЭХРО никеля в импульсных режимах частота следования импульсов оказывает значительное влияние на точность формообразования. Выбор оптимального значения частоты позволяет существенно образом повысить точность копирования формы электрода-инструмента [13]. Описанные выше теоретические положения получены без учета природы обрабатываемого материала и электролита, поэтому положительный технологический эффект, выявленный при обработке никеля, может носить достаточно общий характер, то есть проявляться при растворении множества видов металлов и сплавов. Это предположение нуждается в проверке, поэтому в данной работе исследовано влияние частоты следования импульсов тока на показатели формообразования при ЭХРО никеля, меди и углеродистой стали.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Подробная методика проведения эксперимента описана в работах [11, 12]. При моделировании процесса ЭХРО использовали электрохимическую ячейку, в качестве рабочего электрода применялась фольга из никеля Н1, меди М1 и стали 08КП толщиной 0,1 мм и размером 1,7×1 см. Электролит – водный раствор 1М NaNO<sub>3</sub> или 1М NaNO<sub>3</sub> + 0,017М NaCl. Электрод-инструмент – движущаяся с задаваемой скоростью трубчатая стальная игла с внешним диаметром 2 мм, направленная в торец рабочего электрода или перпендикулярно ему. Эксперименты проводились с использованием униполярных прямоугольных импульсов напряжения с амплитудой 10 В, скважностью 2. При направлении электрода-инструмента в торец рабочего электрода в нем формировалась полость, показанная на рис. 1. Для количественного описания показателей процесса ЭХРО в работах [11] и [13] нами были введены различные критерии, характеризующие точность обработки. В данной работе мы использовали один из них – коэффициент формы  $k = b/a$ .

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При электрохимической обработке материалов с различным электрохимическим поведением

возникает необходимость внесения определенной корректировки в режим обработки. Для ЭХРО принципиальным технологическим параметром является скорость растворения металла, которая при проведении экспериментов с постоянной амплитудой импульсов напряжения (10 В) возрастала в ряду сталь 08КП < никель Н1 < медь М1. Для повышения скорости растворения стали в электролит была введена активирующая добавка – хлорид натрия, концентрация которого была небольшой (0,017 моль/л) для исключения образования питтингов [14].

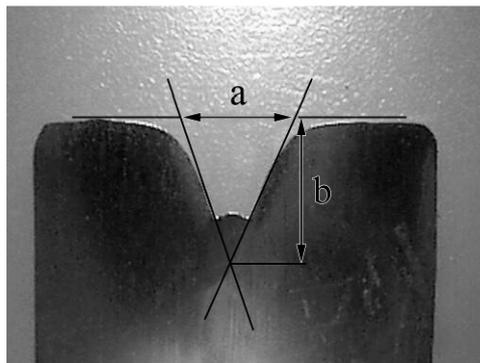
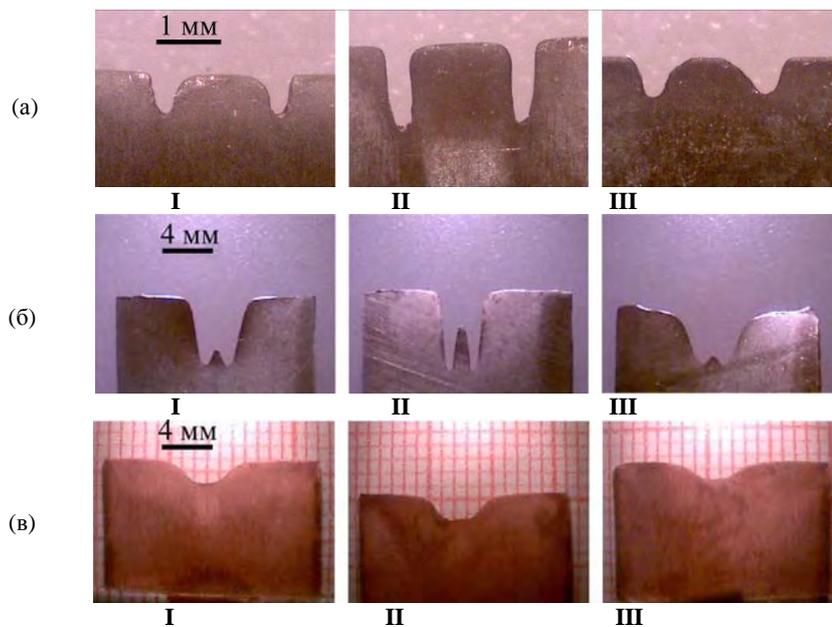


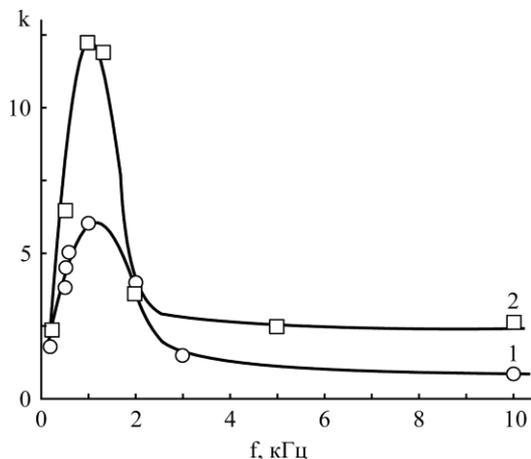
Рис. 1. Фотография полости, образованной в никелевой фольге при ее анодной электрохимической обработке, и иллюстрация способа определения характерных размеров полостей (a) и (b).

Различная скорость растворения металла привела к необходимости индивидуального подбора скорости перемещения электрода-инструмента (ЭИ). В случае стали 08КП скорость перемещения ЭИ, определенная в отдельном эксперименте, составила 0,22 мм/мин, время обработки 5 минут. Для меди скорость растворения металла достаточно высока, поэтому скорость перемещения ЭИ составила 1,25 мм/мин, а время обработки 1,5 минуты. Для никеля скорость перемещения 0,47 мм/мин и время 5 минут выбраны на основании ранее проведенных работ [10, 11]. Такие режимы перемещения ЭИ обеспечивали величину межэлектродного зазора (между торцом иглы и обрабатываемым металлом) около 0,05–0,1 мм в момент окончания процесса для всех обрабатываемых материалов.

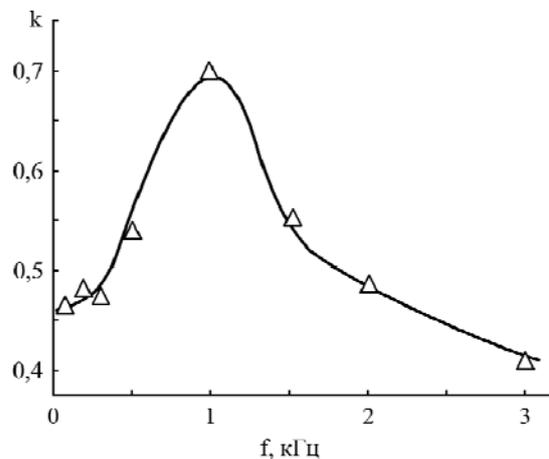
Несмотря на существенные отличия в скорости растворения металла в процессе ЭХРО, параметры импульсов тока оказались достаточно близки: форма импульсов тока повторяла форму импульсов напряжения. Амплитуда импульсов тока составила: в случае стали 08КП – 1,5–1,6 А; для никеля Н1 – 1,5–1,7 А; меди М1 – 0,7–1 А. Более высокие токи при обработке стали и никеля объясняются протеканием на поверхности этих материалов побочного процесса разложения воды с образованием кислорода:  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ , что приводит к интенсивному газо-



**Рис. 2.** Фото образцов: (а) – стали 08КП; (б) – никеля Н1; (в) – меди М1, полученных в результате ЭХРО при частоте следования импульсов напряжения, кГц: I – 0,2; II – 1; III – 10.



**Рис. 3.** Влияние частоты следования прямоугольных импульсов напряжения амплитудой 10 В на коэффициент формы при обработке фольги из: 1 – никеля Н1; 2 – стали 08КП.



**Рис. 4.** Влияние частоты следования прямоугольных импульсов напряжения амплитудой 10 В на коэффициент формы при обработке фольги из меди М1.

выделению в случае ЭХРО стали и никеля. Газо-выделение отсутствует в случае обработки меди. Еще одно отличие процесса ЭХРО меди – его безактивационный характер, в то время как растворение железа и никеля активируется ионами  $\text{NO}_3^-$  при определенных потенциалах. Исследования, выполненные Датта и Ландольтом [15], позволили установить, что в случае железа и никеля достижение ограничений скорости растворения металла связано с образованием на поверхности анода солевой пленки, состоящей из насыщенного раствора продуктов анодной реакции и компонентов электролита. При этом замедленной стадией анодного процесса является отвод продуктов растворения от поверхности электрода в объем электролита. Низкая скорость растворения никеля и стали в электролите на основе нитрата натрия обусловлена низким выходом по току реакции анодного растворения

металла вследствие протекающей параллельно реакции выделения кислорода.

Несмотря на существенные различия в электрохимическом поведении стали, никеля и меди, применение одинакового технологического приема (варьирование частоты следования импульсов) приводит к качественно близким результатам. Как следует из фотографий результатов ЭХРО стали 08КП (рис. 2а), никеля Н1 (рис. 2б) и меди М1 (рис. 2в), форма образующихся профилей изменяется при варьировании частоты следования импульсов для изученных материалов. При этом существует область частот, при которой точность копирования формы электрода-инструмента максимальна.

Расчетные значения коэффициента формы представлены на рис. 3 для никеля и стали, на рис. 4 – для меди. Несмотря на разные количественные значения, влияние частоты следования

импульсов на коэффициент формы имеет аналогичный качественный характер. При этом максимальное значение критерия точности формообразования достигается в области частот около 1 кГц. Наибольшее влияние изменения частоты наблюдается для стали. В серии экспериментов наибольшее и наименьшее значения коэффициента формы отличаются приблизительно в 10 раз. Наименьшее влияние изменения частоты на изменение коэффициента формы наблюдается для меди. В серии экспериментов наибольшее и наименьшее значения коэффициента формы отличаются приблизительно в 2 раза.

Величина изменения коэффициента формы при варьировании частоты следования импульсов напряжения (эффект от применения импульсных режимов) коррелирует со скоростью растворения металла в процессе ЭХРО. Скорость растворения металла возрастает в ряду сталь 08КП < никель < медь. Полученный для оптимальной частоты следования импульсов коэффициент формы убывает в ряду сталь 08КП > никель > медь. Корреляция между степенью пассивации поверхности материала и величиной эффекта, достигаемого при применении импульсных режимов, может свидетельствовать о проявлении специфических эффектов активации и (или) пассивации поверхности обрабатываемого материала в этих условиях.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЭХРО – это сложный процесс, в котором растворение металла неразрывно связано с явлениями переноса заряда, массопереноса, переноса тепла, с протеканием электрохимических и химических реакций. Адекватное теоретическое описание формообразования и строгое объяснение наблюдаемых эффектов в рамках одного явления, по-видимому, невозможны. Тем не менее одинаковый характер влияния частоты следования импульсов на точность формообразования для материалов с различным механизмом растворения позволяет предположить, что теоретические положения, привлекаемые для объяснения наблюдаемых в данной работе зависимостей, должны иметь достаточно общий характер. Такой общностью обладают, в частности, эффекты, предсказываемые в работах, посвященных теоретическому рассмотрению движения заряженных частиц в условиях нестационарного неоднородного электрического поля. Необходимость привлечения упомянутых выше теоретических положений для объяснения результатов ЭХРО следует также из того факта, что массоперенос в межэлектродном зазоре является, как правило, лимитирующей стадией процесса растворения металла. Обнаруженная

корреляция между степенью пассивации поверхности материала и величиной достигаемого при применении импульсных режимов эффекта имеет значение при прогнозировании ожидаемого результата и может указывать на специфику активно-пассивных переходов в импульсных условиях.

Полученный экспериментальный результат позволяет расширить рекомендации по применению импульсных режимов ЭХРО.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Королева Е.В., Балмасов А.В., Румянцев Е.М. *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 2006, **49**(4), 52–56.
2. Митрюшин Е.А., Саушкин С.Б., Саушкин Б.П. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2009, (12), 40–45.
3. Qu N.S., Fang X.L., Zhang Y.D., Zhu D. *Int J Adv Manuf Tech.* 2013, **69**(9–12), 2703–2709.
4. Tang L., Li B., Duan Q., Kang B., Yang S. *Int J Adv Manuf Tech.* 2014, **71**(9–12), 1825–1833.
5. Галанин С.И. *Электрохимическая обработка металлов и сплавов микросекундными импульсами тока*. Кострома: КГТУ, 2001. 118 с.
6. Spieser A., Ivanov A. *Int J Adv Manuf Tech.* 2013, **69**, 563–581.
7. Волков В.Н., Крылов И.А. В межвузовском сборнике научных трудов: *Новые методы исследования в теоретической электронике и инженерной электрофизике*. Иваново: ИВГУ, 1976. 76–83.
8. Солунин С.А., Солунин А.М., Солунин М.А. *Письма в ЖТФ*. 2009, **35**(14), 48–53.
9. Демьянцева Н.Г., Кузьмин С.М., Солунин М.А., Солунин С.А. и др. *ЖТФ*. 2012, **82**(11), 1–10.
10. Демьянцева Н.Г., Кузьмин С.М., Мизонов В.Е., Лилин С.А., Солунин М.А. *Способ электрохимической размерной обработки (варианты)*. РФ пат. 2426628, 2009, Бюл. № 23. 7 с.
11. Демьянцева Н.Г., Солунин М.А., Кузьмин С.М., Солунин А.М. и др. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2009, **52**(2), 78–84.
12. Демьянцева Н.Г., Кузьмин С.М., Солунин М.А., Солунин А.М. и др. *Журнал прикладной химии*. 2010, **83**(2), 249–254.
13. Демьянцева Н.Г., Кузьмин С.М., Балмасов А.В. *ЭОМ*. 2012, **48**(3), 46–49.
14. Жук Н.П. *Курс теории коррозии и защиты металлов: Учебное пособие для вузов*. 2-е изд., стереотипное. Перепечатка с издания 1976 г. М.: Альянс, 2006. 472 с.
15. Datta M., Landolt D. *Electrochim Acta*. 1980, **25**(11), 1255–1262.

Поступила 09.06.15  
После доработки 21.08.15

### Summary

The pulse-recurrence rate influence on the accuracy of electrochemical machining of nickel H1, copper M1, and steel 08KP is shown. The pulse-recurrence rate variation leads to a similar change in the coping of the tool electrode accuracy. It allows us to extend the area of applications of pulsed mode of electrochemical machining. A correlation between the surface passivity and

effects of the pulse mode is demonstrated. A possible explanation of the observed effects using existing theoretical background on the charged particles motion in the non-stationary inhomogeneous electric fields is discussed.

*Keywords: electrochemical machining, accuracy of tool electrode formation, pulse mode, nickel, copper, steel.*