ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, 2020, том 54, № 5, с. 415–420

ЭЛЕКТРОХИМИЯ

УДК 542.87

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ МЕДИ

© 2020 г. В. В. Крымский[a], Ю. Г. Мингажева[a, *]

[a] *Южно-Уральский государственный университет, проспект Ленина, 76, Челябинск, 454080 Россия*

**E-mail: yulya_mingazheva@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.04.2020 г.
После доработки 13.04.2020 г.
Принята к публикации 20.04.2020 г.

В статье представлены экспериментальные результаты воздействия наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) на образование кристаллов меди. Установлена возможность получения конгломератов железа размером порядка 90 нм, что свидетельствует о влиянии НЭМИ на образование новых соединений очень малых размеров. Также выявлено влияние НЭМИ на образование кристаллов меди на электроде.

Ключевые слова: наносекундные электромагнитные импульсы, наноструктурные конгломераты, рентгеноспектральный микроанализ, кристаллы меди

DOI: 10.31857/S0023119320050113

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрастает всеобщий интерес к процессам, происходящем в жидкостях при электрическом разряде в ней [1–9]. Гидродинамический эффект при электрическом разряде в воде представлены в работах Наугольных и Рай [10], Юткина [12].

В работах [10, 11] определены два вида пробоев междуэлектродного пространства стриммерный и тепловой. Стриммерный или лидерный пробой происходит при высоких напряжениях между острием, соединенным с положительным полюсом источника и плоскостью, соединенной с отрицательным полюсом. При тепловом пробое ток проводимости разогревает и испаряет воду у электродов. Образуется газовый мостик, по которому пробой идет дальше.

В обоих случаях после образования канала разряда ток разогревает плазму до 10^4 К при давлении 10^3 атм. Плотность плазмы достигает до 10^{20} частиц в см^3. Приводятся формулы для напряженности электрического поля между электродами и максимальной длины пробиваемого промежутка. Основное внимание уделено механизму возникновения и характеристикам гидродинамического удара. Вопросы воздействия на химический состав воды не рассматриваются.

К основным параметрам разряда относят энергию и длительность разряда. Оба эти параметры могут существенно отличаться и зависят, прежде всего, от целей использования электрического разряда в жидкости. Примерный разброс энергий разряда может быть от 1 до 10^5 Дж, мощность разряда может достигать величин порядка 10^2–10^5 кВт. Экспериментально выяснено, что наибольшее КПД разряда достигается при длительности разряда от 10^{-1} до 100 мкс. Однако используются разряды, длительность которых может лежать в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-6} с. Плотность энергии в некоторых случаях достигает величины порядка 10^2–10^3 Дж/см^3.

В работах [12, 13] рассмотрены аналогичные вопросы. Дан более подробный анализ процесса возникновения кавитационной полости и проведен анализ свойств возникающего магнитного поля. Вопросы влияния разряда на химический состав разрядной среды даны в описательной форме. Используется распад воды только на две части H^+ и OH^-. Главное внимание уделено вопросам технического использования разряда.

Существуют методы получения нанодисперсных оксидов металлов электрохимическим синтезом с помощью переменного тока. В работах [14, 15] представлены результаты получения нанодисперсного оксида никеля при плотности переменного синусоидального тока 2.5 А/см^2, частоте 20 Гц и температуре 343 К.

Принципиальное отличие нашего подхода заключается в отсутствии в жидкости локального канала разряда [10–13] и от работ [14, 15] родом электромагнитного воздействия. Импульсы генерируются специальными генераторами. Импульсному

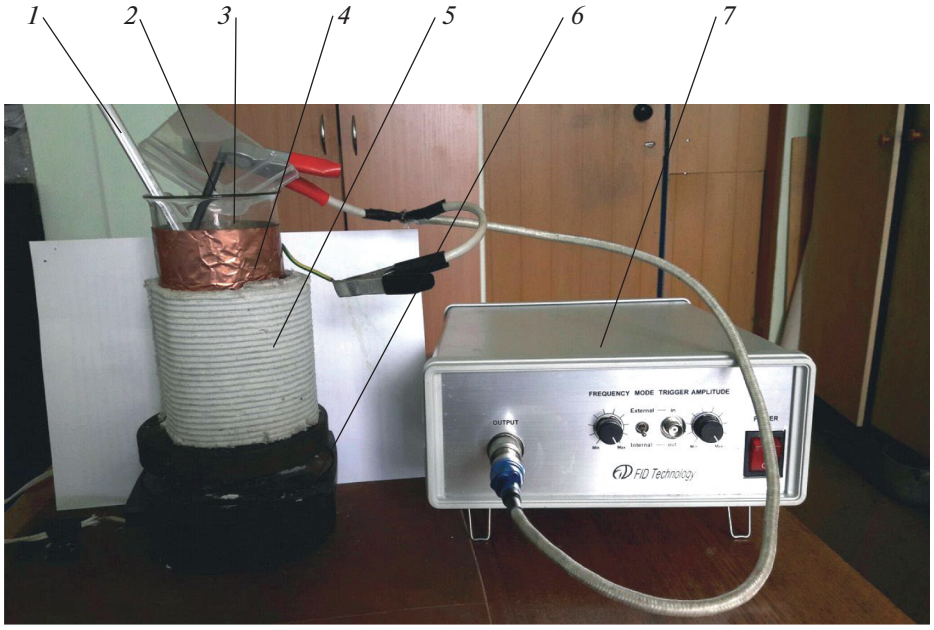

Рис. 1. Экспериментальная установка: *1* – термометр; *2* – электрод; *3* – обрабатываемый раствор; *4* – стеклянный сосуд в экране из медной фольги; *5* – теплоизолятор; *6* –электрическая печь, *7* – генератор НЭМИ.

воздействию практически одновременно подвергается некоторый объем жидкости. Некоторые результаты этого подхода представлены в наших работах [16–20].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования воздействия НЭМИ на процесс образования кристаллов меди и конгломератов железа, использовался генератор с параметрами: длительность импульсов 1 нс с фронтом 0.1 нс, амплитуда импульсов 6–15 кВ, частота повторения 1 кГц, потребляемая от электрической сети мощность менее 100 Вт [16]. Из-за малой длительности импульса, в растворе не возникает электрический пробой.

Объем пробы раствора 600 мл. Обработка производилось в стеклянном сосуде, диаметром 80 мм, высотой 150 мм, в экране из медной фольги. В качестве электрода импульсов использовался тонкий стержень из стали с никелевым покрытием: диаметр 1.5 мм, длина 115 мм, глубина погружения 45 мм. Температура помещения 24°С. Изначально раствор нагрели до 92°С. Время обработки 10 мин. На рис. 1 представлена экспериментальная лабораторная установка. Для обработки использовался раствор, состав которого приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав раствора

Наименование реагента	Концентрация реагента, г/л
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	20
$NiSO_4 \cdot 7H_2O$	24

Морфологические особенности образовавшихся соединений, электрод до и после обработки, выпавшего осадка изучали на электронном микроскопе JEOL JSM 648 CLV с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа.

После обработки образовался коллоидный раствор, на электроде налет коричневого цвета. Через 5 мин налет приобрел темно-коричневый цвет. На рис. 2 представлены микрофотографии поверхности электрода до и после обработки.

На поверхности электрода после обработки наблюдаются кристаллы меди правильной формы, которые представлены на рис. 3.

В табл. 2 приведен общий химический состав поверхности электрода до и после обработки.

Также был проведен рентгеноспектральный микроанализ выпавшего осадка. На рис. 4 представлены микрофотографии, в табл. 3 приведен общий химический состав осадка раствора.

Был исследован электрод после выдержки в растворе без обработки. Опыты проводились при таких же условиях. В качестве электрода использовался тонкий стержень из стали с никелевым покрытием: диаметр 1.5 мм, длина 115 мм, глубина погружения 45 мм. Температура помещения

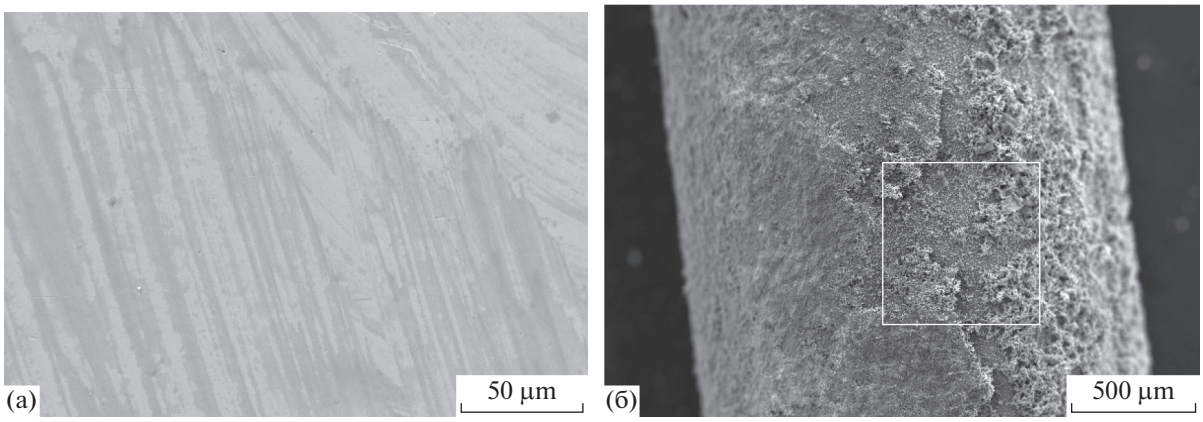

Рис. 2. Электронные микрофотографии поверхности электрода до (а) и после (б) обработки.

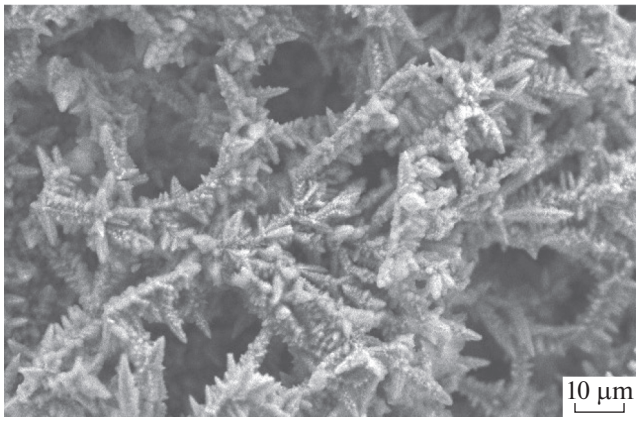

Рис. 3. Электронная микрофотография новообразований кристаллов меди на поверхности электрода после обработки.

24°С. Изначально раствор нагрели до 92°С. Время выдержки электрода 10 мин.

На электроде образовался коричневый налет, образовался коллоидный раствор. На рис. 5 представлены микрофотографии поверхности электрода после выдержки в растворе.

Из микрофотографий видно, что процесс коррозии электрода на кончике более интенсивный. На поверхности электрода после обработки наблюдаются кристаллы меди, которые представлены на рис. 6.

В табл. 4 приведен общий химический состав поверхности электрода до и после выдержки.

Также был проведен рентгеноспектральный микроанализ выпавшего осадка. На рис. 7 представлены микрофотографии, в табл. 5 приведен общий химический состав осадка раствора.

Таблица 2. Результаты рентгеноспектрального микроанализа, в вес. %

Микрофотография	O	S	Fe	Ni	Cu	Итог
Рис. 2а	0	0	5.99	94.01	0	100.00
Рис. 2б	16.26	2.59	23.00	4.44	53.72	100.00
Рис. 3	15.67	1.49	9.16	0	73.69	100.00

Таблица 3. Результаты рентгеноспектрального микроанализа, в вес. %

Микрофотография	O	S	Fe	Ni	Cu	Итог
Рис. 4	41.68	5.48	41.98	2.96	7.89	100.00

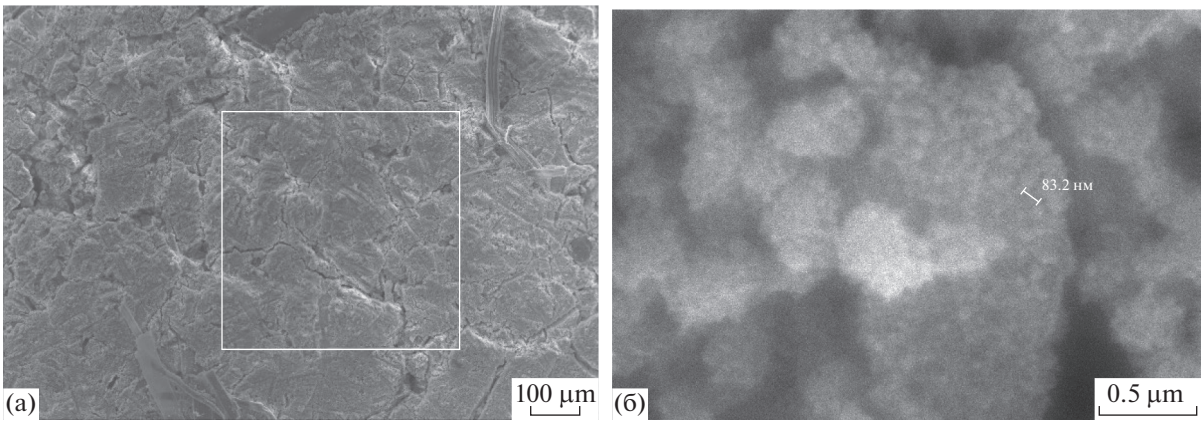

Рис. 4. Электронные микрофотографии конгломератов железа в осадке после обработки раствора НЭМИ.

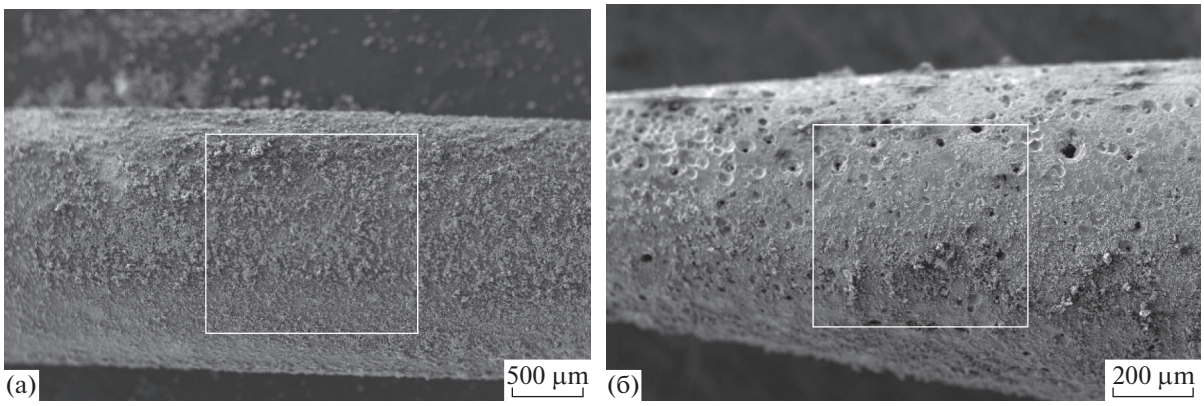

Рис. 5. Электронные микрофотографии поверхности электрода после выдержки в растворе: (а) – середина электрода, (б) – кончик электрода.

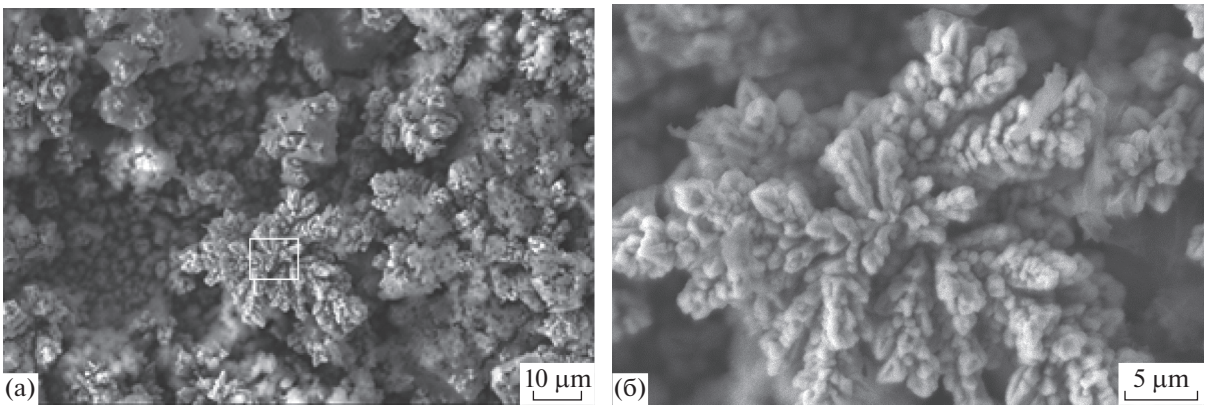

Рис. 6. Электронные микрофотографии новообразований кристаллов меди на поверхности электрода после выдержки.

ВЫВОДЫ

1. При погружении электрода – стального стержня с никелевым покрытием в раствор, содержащий соли $NiSO_4$ и $CuSO_4$, концентрацией 5 г/л, происходит процесс коррозии, замечено, что на кончике стержня процесс интенсивный. На электроде образуются кристаллы меди, а в осадок выпадают конгломераты железа с размерами 300–800 нм.

2. Образовавшийся налет на электроде в основном состоит из кристаллов соединений меди правильной формы, что свидетельствует о влиянии НЭМИ на пространственное построение соединение химических элементов.

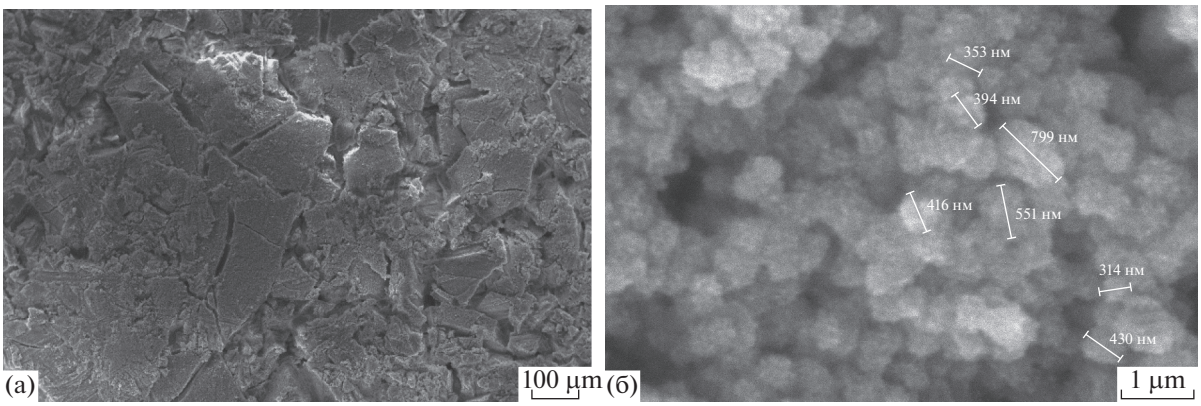

Рис. 7. Электронные микрофотографии конгломератов железа в осадке после выдержки электрода в растворе.

Таблица 4. Результаты рентгеноспектрального микроанализа, в вес. %

Микрофотография	O	Al	S	Fe	Ni	Cu	Итог
Рис. 5а	11.17	–	1.79	12.34	4.19	70.51	100.00
Рис. 5б	9.22	1.17	2.24	4.46	20.76	62.15	100.00
Рис. 6	4.37	–	0.60	3.54	1.00	90.49	100.00

Таблица 5. Результаты рентгеноспектрального микроанализа, в вес. %

Спектр	O	S	Fe	Ni	Cu	Итог
Рис. 7	33.78	4.85	50.94	2.16	8.27	100.00

3. О влиянии НЭМИ на образование новых соединений очень малых размеров свидетельствует тот факт, что при обработке раствора электродом из стали с никелевым покрытием, наблюдается выпадение осадка из конгломератов железа порядка 90 нм, который меньше в 3 раза от результата без обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bing Sun, Yanbin Xin, Xiaomei Zhu, Zhiying Gao, Zhiyu Yan, Takayuki Ohshima* // Biochimica et Biophysica Acta (BBA). Biomembranes. 2017. V. 1859. P. 2040.
2. *Ryan C. Burke, Sylvia M. Bardet, Lynn Carr, Sergii Romanenko, Delia Arnaud-Cormos, Philippe Leveque, Rodney P. O'Connor* // Bioelectrochemistry. 2018. V. 120. P. 112.
3. *Gontad F., Perrone A.* // Appl. Surface Sci. 2017. V. 480. P. 430.
4. *Fan Yang, Yongfeng Lu* // Optics & Laser Technology. 2017. V. 93. P. 194.
5. *Shakhova N.B., Yurmazova T.A., Tran TuanHoang, Nguyen TuanAnh* // Procedia Chemistry. 2015. V. 15. P. 292.
6. *Rajha Hiba N., Abi-Khattar Anna-Maria, Kantar Sally El, Boussetta Nadia, Lebovka Nikolai, Maroun Richard G., Louka Nicolas, Vorobiev Eugene* // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2019. V. 58. P. 102212.
7. *Chadni Morad, Grimi Nabil, Ziegler-Devin Isabelle, Brosse Nicolas, Bals Olivier* // Carbohydrate Polymers. 2019. V. 222. P. 115019.
8. *Korobeynikov S.M., Ovsyannikov, A.G. Ridel A.V., Karpov D.I., Lyutikova M.N., Kuznetsova Yu.A., Yassinskiy V.B.* // J. Electrostatics. 2020. V. 103. P. 103412.
9. *Hang Dong, Yonghong Liu, Ming Li, Yu Zhou, Tong Liu, Dege Li, Qiang Sun, Yanzhen Zhang, Renjie Ji* // J. Manufacturing Processes. 2019. V. 46. P. 118.
10. *Наугольных К.А., Рай К.А.* Электрические разряды в воде. М.: Наука. 1971. 155 с.
11. *Bing Sun, Yanbin Xina Xiaomei Zhu, Zhiying Gao, Zhiyu Yan, Takayuki Ohshima* // Bioelectrochemistry. 2018. V. 120. P. 112.
12. *Юткин Л.А.* Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
13. *QI Liqiang, Zhang Yajuan* // J. Hazardous Materials. 2013. V. 256–257. P. 10.
14. *Килимник А.Б., Острожкова Е.Ю.* Электрохимический синтез нанодисперсных порошков оксидов металлов: монография. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2012. 144 с.
15. *Никифиророва Е.Ю., Килимник А.Б.* // Коррозия: материалы, защита. 2011. № 3. С. 27.

16. *Белкин В.С., Бухарин В.А., Дубровин В.К. и др.* / Под ред. В.В. Крымского. Челябинск: Изд-во “Татьяна Лурье”, 2001. 119 с.

17. *Крымский В.В., Балакирев В.Ф.* // Доклады РАН. 2002. Т. 385. № 6. С. 786.

18. *Балакирев В.Ф., Крымский В.В., Батурин В.А., Грешняков А.П.* // Труды VI Международной конференции “Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах”. Томск: Изд. ТПУ, 2008. С. 419.

19. *Балакирев В.Ф., Крымский В.В., Кулаков Б.А., Хосен Ри.* Электроимпульсные нанотехнологии. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 141 с

20. *Балакирев В.Ф., Крымский В.В., Шабурова Н.А.* Наноимпульсные технологии / Под ред. академика РАН Л.А. Смирнова. Челябинск: Изд-во ЧелЦНТИ. 2012. 124 с.