Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i2.426

Процесс обработки стеклокерамики методом электроэрозии

А.А. Зарипов*, Б.А. Гоипов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии Наук Республики Узбекистан, Дурман йули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан

Received 03.05.2023, revised 22.06.2023

* Corresponding author: e-mail zaripov@iplt.uz, Phone: +99 897 448 5015, Fax: +99 871 999 999

Физико-химические и механические свойства керамики и композитов, которые по многим параметрам превосходят современные сплавы, широко не используются из-за трудностей обработки. Их можно качественно обрабатывать электроэрозионным методом, если будет выявлена природа процесса съёма этих материалов. В данной работе исследуются практические результаты процесса съема стеклокерамики в водно-щелочных электролитах, полученные на усовершенствованной электроэрозионной установке. Установлено, что процесс съема диэлектрического материала тесно связан с воздействием водно-щелочных электролитов, электрическими разрядами и тепловыми эффектами. Полученные данные приводят к пониманию последовательности процесса съема стеклокерамики в водных растворах щелочных электролитов и на практике повысить их производительность.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка (ЭЭО), импульсный разряд, длительность импульса, тепловые эффекты, анионная группа, скорость съёма материала (MRR)), водно-щелочная среда.

The physico-chemical and mechanical properties of ceramics and composites, which in many respects are superior to modern alloys, are not widely used due to processing difficulties. They can be treated qualitatively by the electrical discharge method, if the process of removing these materials is clearly revealed. In this work, we study the practical results of the removal process of dielectrics in aqueous-alkaline electrolytes, obtained on the improved electrical discharge machine. In particular, we found that the removal process is closely related to the collective influences of alkaline water electrolytes, electrical discharges and thermal effects. The obtained results lead to a comprehensive understanding of the sequence of the removal process of dielectric materials in aqueous-alkaline solutions, which ensures their high-quality machinability and widespread application in contemporary industry.

Keywords: electrical discharge treatment (EDT), pulse discharge, pulse duration, thermal effects, anionic group, material removal rate (MRR), aqueous-alkaline medium.

I. Введение

Разнообразие физико-механических характеристик и химического состава композитных и керамических материалов, позволяющее создавать материалы с заранее рассчитанными свойствами привело к их широкому применению [1-3]. Несмотря на преимущества композитов и керамики перед металлами и их сплавами, обработка этих материалов, по сути диэлектриков, сопряжена с большими трудностями [4]. В частности, механическая обработка приводит к неприемлемому качеству керамических и композиционных материалов [5] и снижает срок службы [6]. Поэтому стараются применять только немеханические методы: лазерный, ультразвуковой, электрохимический и электроэрозионный [7]. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) сильно отличается от других немеханических способов с точки зрения эффективности и обработки композитных материалов сложного

профиля [8]. В частности, сочетание ЭЭО с другими методами, такими как метод вспомогательного электрода [9], электрохимической [10], ультразвуковой [11] и лазерной обработки [12, 13], дает очень хорошие результаты. Однако ЭЭО керамики и композитов в электролитах выделяется среди них высокой скоростью и возможностью обработки деталей сложного профиля [14].

Несмотря на широкое изучение электрофизической обработки композитных материалов и керамики, существуют серьёзные научные разногласия по пониманию процесса обработки. Например, Мелк и другие полагают, что съём композита 3Y-TZP и многослойных углеродных нанотрубок являются предпосылкой плавления, испарения и растрескивания [15]. Однако роль физико-химических свойств электролитов и разрядов на всех этапах обработки не выяснена [16]. Юэ и другие [17, 18] путем моделирования и экспериментов определили, что удаление углепластика и композитного карбида кремния, армированного углеродным волокном, связано с термической обработкой. Также Раджпут и другие [19] при обработке кварца, стекла и керамики указали, что удаление материала включает, помимо термической эрозии, химическое травление. Дутта и другие [20] также утверждают, что съём материала происходит именно путем плавления и испарения. Однако Клок и другие обнаружили существенные расхождения при сравнении значений практической температуры с расчетной [21]. Кроме того, в описанных выше работах [17-19] не учитываются эффекты импульсных разрядов и пузырькового слоя вблизи катода [22].

Несмотря на усилия исследователей, имеющиеся результаты не позволяют всесторонне понять процесс удаления диэлектрика. Поэтому в этой статье мы сконцентрируем внимание на раскрытии природы процесса удаления диэлектриков в водно-щелочных электролитах.

II. Описание объекта и методов исследования

Для ЭЭО диэлектриков в водно-щелочных растворах было разработано усовершенствованное электроэрозионное устройство с релаксационным генератором, следящей компенсирующей системой в виде плавающей головки с коническим катодом и держателя-демпфера [14, 23]. Образец с помощью держателя-демпфера прижимается к кончику анода и помещается в ванну, заполненную водно-щелочным (NaOH или KOH) электролитом. Между электролитом и катодом создается разность потенциалов. Выходное напряжение установки регулируют в диапазоне 0–400 V, а максимальный ток до 10 A. Объект исследования – стеклокерамика с химическим составом SiO_2 68.4%; CaO 8.5%; Na_2O 9.4%; K_2O 7.1%; Al_2O_3 3.9%; B_2O_3 2.7% (весовые проценты)

III. Описание и анализ результатов

Универсальной оценкой для всех методов обработки материалов является определение скорости съёма материала (MRR) [24, 25]. Исходя из этого, на рис. 1 приведена зависимосстъ MRR от приложенной мощности (стрелка вверх) и от емкости конденсатора (стрелка вниз) в водно-щелочных растворах электролитов NaOH и KOH.

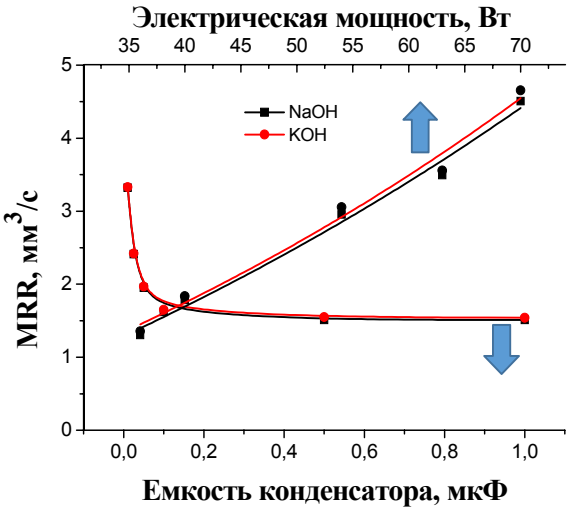


Рисунок 1. Зависимость скорости съёма стеклокерамики от емкости конденсатора и приложенной мощности в водно-щелочных растворах.

В частности, на рис. 1 показана зависимость скорости съёма стеклокерамики (MRR) от вкладываемой электрической мощности в 6% водно-щелочных электролитах NaOH и KOH (MRR не зависит от концентрации электролитов упомянутых щелочей в исследованном диапазоне 6–27%): при 36 Вт – 1.3 и 1.35 мм^3/с, при 70 Вт – 4.5 и 4.65 мм^3/с соответственно.Очевидно, что численные значения MRR увеличиваются в 4 раза и имеют линейную зависимость от приложенной электрической мощности в исследованном диапазоне 35–75 Вт (рис. 1). Однако необходимо определить, какая доля из этой приложенной мощности передаётся на образец. Мохаммад и другие сооб-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

щают, что часть подаваемой энергии разряда поглощается заготовкой из-за проводимости, а остальная часть рассеивается в электролите из-за конвекции и излучения [26]. Также Вэй и другие подсчитали, что доля энергии, передаваемая на деталь при ЭЭО, составляет всего 29% в электролитах [27, 28]. Исходя из этого, Билал и другие считают, что термическое растрескивание и скалывание являются основным механизмом ЭЭО диэлектриков в электролитах [29]. Кроме того, Раджпут и другие также предпочитают тепловую модель [30]. Несмотря на то, что тепловая модель хорошо согласуется с существующими имитационными моделями, разница между их значениями (имитационное [32] и практическое [14, 31]) существенно расходится. В частности, температура в имитационных моделях превышает 3300 К, а при измерениях с помощью термопары вольфрам-железо и спектрального анализа температура катода составляет около 2300 К [14, 33]. Это существенная разница температуры еще более усугубляется результатами Словецкого и Терентьева, где температура катода не превышает 1500 К [32]. Кроме этого, в большинстве работ показано, что температура электролита на расстоянии 2 мм от пузырькового слоя даже при таких температурах катода [14, 33] не превышает температуры кипения воды (1000°C) [34-36]. Это означает, что линейный рост MRR при увеличении приложенной электрической мощности напрямую не связан с тепловыми эффектами. Роль теплового эффекта в этом случае заключается в косвенном влиянии на состояния пузырьков. А именно, служит для увеличения интенсивности появления пузырьков. Пауль и другие практиковали создание искусственного образования пузырьков и добились значительных улучшений MRR, смешивая гидроокиси калия и натрия при обработке полупроводников [37]. Кроме того, наши исследования показывают, что процесс обработки также связан с внешним фактором, т.е. частотными характеристиками релаксационного генератора [38].

На рис. 1 также представлен график зависимости MRR от емкости конденсатора релаксационного генератора, определяющего частотные характеристики разряда в RC генераторе. В частности, для водно-щелочных растворов NaOH и KOH при 1 мкФ значения скорости съёма составляет 1.51 и 1.54 мм^3/с , а при 0.01 мкФ – 3.32 и 3.33 мм^3/с соответственно. Видно, что при меньших емкостях конденсатора MRR выше, чем при относительно больших емкостях. Али и другие утверждают, что емкость конденсатора является наиболее важным параметром для создания проводящего слоя в непроводящей керамике [39]. Известно, что емкость конденсатора линейно связана с длительностью импульса (τ) в релаксационных генераторах и определяется по формуле

$$\tau = RC,$$

где R – сопротивление межэлектродного зазора, C – емкость конденсатора в релаксационном генераторе.

Длительность импульса – это промежуток времени между началом и концом импульса, измеренный при определенных уровнях относительно амплитуды импульса. Дутта и другие, изучив влияние длительности импульса на MRR, определили, что среди других участвующих факторов ее доля превышает 5% [20]. Хан и другие, разветвив разряды, т.е. фактически повысив частоту импульсов, улучшили качество поверхности [40]. Янг и другие также обнаружили, что увеличение частоты разрядов расширяет рабочую поверхность и производит меньше тепловой энергии [41]. Очевидно, что уменьшение емкости конденсатора или длительности импульса приведет к улучшению и ускорению обработки диэлектрика.

На основании анализа приведенных выше результатов и имеющихся литературных данных процесс съёма стеклокерамики можно объяснить вольтамперной характеристикой (ВАХ) этого процесса, который разделен на три части (см. рис. 2).

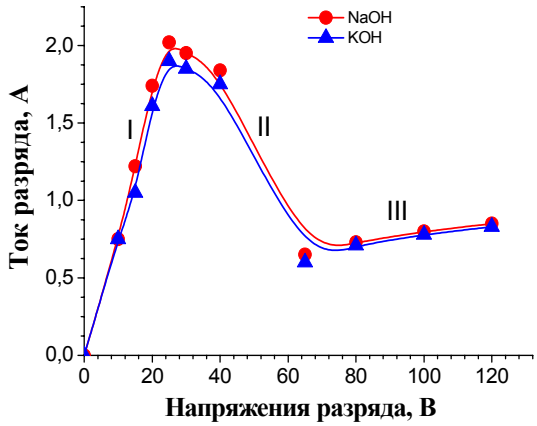


Рисунок 2. Вольтамперная характеристика водно-щелочных растворов электролитов.

Вначале происходит обычный процесс электролиза. Следовательно, ВАХ в этой области имеет линейную зависимость (рис. 2, I). Сопротивление разрядной цепи в основном состоит из сопротив-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

ления разрядного резистора (сопротивление электролита незначительное). Линейный процесс продолжается до тех пор, пока не достигается пороговый (критический) ток, при котором появляются первоначальные пузырьки и последующие разряды. В частности, критический ток и напряжения при концентрации 6% для водно-щелочных электролитов NaOH и KOH составляют 2 А и 25 В, 1.9 А и 25 В соответственно. Также результаты показали идентичность 6% ВАХ с другими концентрациями диапазона 7–27% водно-щелочных электролитов NaOH и KOH.

После достижения порогового тока разряда, ток на участке II ВАХ начинает уменьшаться (см. рис. 2, II). Это связано с повышением локальной температуры электролита из-за дальнейшего увеличения входного напряжения, что приводит к появлению и интенсификации пузырьков. Увеличение количества пузырьков вблизи катода приводит к постепенному изолированию рабочей поверхности катода. Фактически это явление приводит к изменению сопротивления в межэлектродном промежутке. А общее сопротивление (разрядной) цепи состоит в основном из сопротивления разрядного резистора и сопротивления изолирующих катодных пузырьков. Сопротивление электролита по отношению к этим двум компонентам незначительно, и им можно пренебречь. Изолирующие пузырьки, накопленные у катода, обязательно образуются вместе с первоначальными разрядами. Подтверждением этого служит работа Декудрес и других, которые утверждают, что образование большого количества мелких пузырьков вблизи катода усиливает разряды [42]. Из-за появления в электролите изолирующего пузырькового слоя полный электрический ток состоит из тока проводимости и тока смещения [43]. Токи смещения возникают в изолирующем пузырьковом слое в нестационарном режиме при приложении к этой среде переменного электрического поля [44]. На границе электролита и пузырькового слоя (изолирующего часть катода) ток разряда и токи смещения компенсируются между собой. Следовательно, ток разряда течет только через оставшуюся неизолированную часть катода. Хотя токи смещения чувствительно увеличиваются, но суммарный ток уменьшается из-за сильного падения тока разряда. В частности, суммарный ток в точке минимума и напряжение (рис. 2, II) для водно-щелочных электролитов NaOH и KOH при концентрации 6% составляют 65 В и 0.65 А, 65 В и 0.6 А соответственно. Уменьшение критического тока разряда на этом участке ВАХ связано с максимальным увеличением изолирующего пузырькового слоя между электродами. За счет максимального скопления пузырьков в конце этой стадии вблизи катода возникают устойчивые парогазовые слои толщиной 0.5 мм, через эти слои начинают проскакивать искры в виде высокочастотных разрядов.

Затем, на завершающей стадии, из-за увеличения количества высокочастотных разрядов на катоде (рис. 2, III) и выравнивания внутреннего и внешнего давлений пузырьков, а также повышения локальной температуры парогазового слоя вблизи катода, являющейся производной от приложенного напряжения, пузырьки парогазового слоя схлопываются. Общее сопротивление разрядного контура в момент схлопывания пузырьков парогазового слоя из-за отсутствия сопротивления изолирующего слоя в основном складывается из сопротивления разрядного балласта. Следовательно, повышение температуры пузырькового слоя вблизи катода играет очень заметную роль, приводя к схлопыванию пузырьков и создавая тем самым условия для периодичного возникновения высокочастотных разрядов. Параллельно с этими процессами, анионная группа (OH^-) водно-щелочных электролитов, которая, присоединяя поверхностные атомы образца, приводит к изменению атомной связи [45]. В то же время взаимные влияния анионной группы, высокочастотных разрядов и температура пузырькового слоя вблизи катода приводят к ослаблению и разрыву атомных связей на поверхности диэлектрических образцов в процессе ЭЭО.

IV. Заключение

В данной работе предлагается понимание процесса съёма стеклокерамики в водно-щелочных средах с учетом анализа ранее существовавших моделей. Обработка материала производилась на усовершенствованном электроэрозионном станке, что привело к значительному увеличению скорости съёма.

В частности, была определена последовательность процесса съёма стеклокерамики, которая состоит из следующих последовательных этапов: вначале происходит простой процесс электролиза в водно-щелочной среде, затем из-за повышения локальной температуры у катода начинают образовываться пузырьковый слой и искровые разряды. Установлено, что процесс съема материала определяется комплексным воз-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

действием анионной группы щелочных электролитов, высокочастотных разрядов и температуры пузырькового слоя вблизи катода и приводит к ослаблению и разрыву атомных связей на поверхности диэлектрических образцов. В целом, применение результатов данной работы на практике дает возможность повысить производительность стеклокерамики в водных растворах щелочных электролитов.

Метаданные

The treatment process of glass ceramics by the electrical discharge method

A.A. Zaripov, B.A. Goipov

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Durmon Yuli Street, 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

The physico-chemical and mechanical properties of ceramics and composites, which in many respects are superior to modern alloys, are not widely used due to processing difficulties. They can be treated qualitatively by the electrical discharge method, if the process of removing these materials is clearly revealed. In this work, we study the practical results of the removal process of dielectrics in aqueous-alkaline electrolytes, obtained on the improved electrical discharge machine. In particular, we found that the removal process is closely related to the collective influences of alkaline water electrolytes, electrical discharges and thermal effects. The obtained results lead to a comprehensive understanding of the sequence of the removal process of dielectric materials in aqueous-alkaline solutions, which ensures their high-quality machinability and widespread application in contemporary industry.

Keywords: electrical discharge treatment (EDT), pulse discharge, pulse duration, thermal effects, anionic group, material removal rate (MRR), aqueous-alkaline medium

Литература (References)

[1] N. Ralbag, M. Mann-Lahav, E.S. Davydova, U. Ash, G. Reuven. Matter. **1**, № 4, 959 (2019).
[2] Z. Li, X. Zhang, H. Cheng, J. Liu, M. Shao, M. Wei, D.G. Evans, H. Zhang. Advanced Energy Materials **10**, № 11,. 1900486 (2020).
[3] N. Li, S. Huang, G. Zhang, R. Qin, W. Liu, H. Xiong, J. Blackburn. Journal of Materials Science & Technology **35**, № 2, 242 (2019).
[4] C. Costa, L.P. Ferreira, J.C. Sá, F.J.G. Silva. **17**, 001, (2018).
[5] H. Heidary, N.Z. Karimi, G. Minak. Composite Structures **201**, 112 (2018).
[6] J. Xu, C. Li, S. Mi, Q. An, M. Chen. Composite Structures **201**, 1076 (2018).
[7] A. Bilal, M.P. Jahan, D. Talamona, A. Perveen. Micromachines **10**, № 1, 10 (2019).
[8] M.S. Rayat, S.S. Gill, R. Singh, L. Sharma. Materials and Manufacturing Processes **32**, № 13, 1451 (2017).
[9] N. Mohri, Y. Fukuzawa, T. Tani, N. Saito, K. Furutani. CIRP Annals **45**, № 1, 201 (1996).
[10] A.R. Abitov. Electrochimicheskaya obrabotka fasonnykh poverkhnostey v kremnievykh zagatovkakh: Dis. doc. phys.-мат. nauk (Tula. 2011).
[11] A.V. Leon, S.Yu. Zvyadintseva, Ye.A. Chirkov, A.S. Shkodin, D.A. Kaplev. Mexanika XXI Veka **196**, № 18 (2019).
[12] A.M.A. Al-Ahmari, M.S. Rasheed, M.K. Mohammed, T. Saleh. Materials and Manufacturing Processes **31**, № 4, 447 (2016).
[13] L. Li, C. Diver, J. Atkinson, R. Giedl-Wagner, H.J. Helml. CIRP Annals **55**, №1, 179 (2006).
[14] E.T. Abdukarimov, A.S. Mirkarimov, A.A. Zaripov. Surface Engineering and Applied Electrochemistry **43**, № 2, 77 (2007).
[15] L. Melk, M.L. Antti, M. Anglada. Ceramics International **42**, № 5, 5792 (2016).
[16] A. Zaripov, K. Ashurov. Electronnaya obrabotka materialov **50**, № 2, 105 (2014).
[17] X. Yue, X. Yang, J. Tian, Z. He, Y. Fan. International Journal of Machine Tools and Manufacture **133**, 4 (2018).
[18] X. Yue, Q. Li, X. Yang. Ceramics International **46**, № 6, 7998 (2020).
[19] V. Rajput, M. Goud, N.M. Suri. International Journal of Modern Manufacturing Technologies **11**, № 2, 105 (2019).
[20] H. Dutta, K. Debnath, D.K. Sarma. Polymer Composites **40**, № 10, 4033 (2019).
[21] F. Klocke, M. Mohammadnejad, M. Zeis, A. Klink. Procedia CIRP **68**, 260 (2018).
[22] A. Zaripov, K. Ashurov. Uzbek. J. Phys. **18**, №. 3, 214 (2016).
[23] A.A. Zaripov. Proccessy electroerosionnoy obrabotki dielectrikov. Diss. PhD (Tashkent. 2019).
[24] R. Bobbili, V. Madhu, A.K. Gogia. Materials and Manufacturing Processes **28**, № 4, 364 (2013).
[25] A. Mohammadi, A.F. Tehrani, E. Emanian, D. Karimi. Journal of Materials Processing Technology **205**, №. 1-3, 283 (2008).
[26] Y.A. Mohammad, M.A. Maleque, A. Banu, A. Sabur. Trans. Tech. Publications Ltd **20**, 911 (2018).
[27] C. Wei, K. Xu, J. Ni, A.J. Brzezinski, D. Hu. Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology **54**, № 9, 987 (2011).
[28] C.Wei, D. Hu, K. Xu, J. Ni. International Journal of Machine Tools and Manufacture **51**, № 2, 165 (2011).
[29] A. Bilal, A. Perveen, D. Talamona, M.P. Jahan. Micromachines **12**, № 1, 67 (2021).
[30] V. Rajput, M. Goud, N.M. Suri. International Journal of Modern Manufacturing Technologies **12**, № 1, 164 (2020).
[31] D.L. Kirko. Technical Physics **60**, № 4, 505 (2015).
[32] D.I. Slovetskiy, S.D. Terentyev. Khimiya Visokix Energiy **37**, № 5, 355 (2003).
[33] V. Fascio, R. Wuthrich, D. Viquerat, H. Langen. Proceedings of International Symposium on Micromechatronics and Human Science (179, 1999).
[34] V. Fascio, H.H. Langen, H. Bleuler. Electrochemistry Communications **5**, № 3, 203 (2003).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

[35] I. Basak, A. Ghosh. Journal of Materials Processing Technology **62**, № 1-3, 46 (1996).
[36] V. Fascio, R. Wuthrich, H. Bleuler. Electrochimica Acta **49**, № 22-23, 3997 (2004).
[37] L. Paul, S.S. Hiremath. Procedia Technology **25**, 1250 (2016).
[38] A.A. Zaripov, K.B. Ashurov. Surface Engineering and Applied Electrochemistry **47**, № 3, 197 (2011).
[39] Y.A. Mohammad, M.A. Maleque, A. Banu, A. Sabur, S. Debnath, M.Y. Ali. International Journal of Engineering Materials and Manufacture **3**, № 1, 55 (2018). doi:10.26776/ijemm.03.01.2018.07.
[40] M.S. Han, B.K. Min, S.J. Lee. Journal of Materials Processing Technology **191**, № 1-3, 224 (2007).
[41] C.T. Yang, S.L. Song, B.H. Yan, F.Y. Huang. International Journal of Machine Tools and Manufacture **46**, № 15, 2044 (2006).
[42] A. Descoeudres. EPFL № 3, 542 (2006).
[43] D.M. Siegel. Innovation in Maxwell's electromagnetic theory: Molecular vortices, displacement current, and light (Cambridge University Press, 2003).
[44] G. Ivchenkov. Toki smesheniya v metallax, dielektrikax i v vakuume. http://newidea.kulichki.net/pubfiles/190712004817.pdf
[45] M. Jalali, P. Maillard, R. Wüthrich. Journal of Micromechanics and Microengineering **19**, № 4, 045001 (2009).

Электроэрозия усулида шиша сополни ишлов бериш жараёни

А.А. Зарипов, Б.А. Гоипов

ЎР ФА Ион–плазма ва лазер технологиялари институти, Дўрмон йўли 33, 100125 Тошкент, Ўзбекистон

Сопол ва композитлар замонавий қотишмалардан кўплаб физик, кимёвий ва механик хусусиятлари бўйича устунликка эга, аммо уларга ишлов бериш қийинлиги сабабли амалиётда кенг қўлланилмайди. Агар бу материалларни емириш жараёнлари табиатига аниқлик киритилса уларга электроэрозия усулида сифатли ишлов бериш мумкин. Ушбу ишда сув-ишқор электролитлардаги сополни мукаммаллаштирилган электроэрозия қурилмасида емириш орқали олинган амалий натижалар ўрганилади. Диэлектрик материалларни емириш жараёни сув-ишқор электролити, электр разрядлари таъсирлари ва иссиқлик эффекти билан яқиндан боғлиқ. Олинган маълумотлар ишқорий электролитларнинг сувли эритмаларида сополойнани емириш жараёни кетма-кетлигини тушунишга ва амалиётда самарадорликни оширишга олиб келади.

Калит сўзлар: электроэрозиявий ишлов бериш (ЭЭИ), импульс разряди, импульс давомийлиги, иссиқлик эффектлари, анион груҳ, материални емириш тезлиги (инглизчада: material removal rate – (MRR)), сувли-ишқорий муҳит.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.