

Синергизм начальной стадии удаления диэлектрических материалов при электроэрозионной обработке в электролитах

А. А. Зарипов^{a,*}, У. Б. Халилов^{a,b}, Х. Б. Ашуров^a

^aИнститут ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан,
г. Ташкент, 100125, Узбекистан

^bАнтверпенский университет, Центр передовых исследований NANOLab,
Научная группа PLASMANT, Антверпен, 2610, Бельгия

*e-mail: zaripov@iplt.uz

Поступила в редакцию 17.06.2022

После доработки 30.03.2023

Принята к публикации 04.04.2023

Керамика и композиты, многие физико-химические свойства которых существенно превышают аналогичные свойства металлов и их сплавов, качественно обрабатываются преимущественно электроэрозионным методом. Несмотря на существующие работы, механизм начальной стадии удаления материалов до сих пор не раскрыт. Для понимания механизма удаления диэлектриков предлагается новая модель, основанная на экспериментальных результатах, полученных на усовершенствованной электроэрозионной установке. Определено, что начальная стадия удаления диэлектрического материала состоит из трех последовательных этапов, которые связаны с синергетическим воздействием на процесс анионной группы электролитов, плазменного факела и кавитационного удара. Это позволяет лучше понять механизм удаления композитных и керамических материалов, что должно способствовать обеспечению обрабатываемости этих материалов и широкого использования в перспективных технологиях.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка (ЭЭО), механизм удаления материалов, скорость удаления материалов, синергетический эффект, кавитация, пузырьки, коллапс, электролиты, анионная группа, плазменный факел, импульсный разряд

УДК 621.9.047

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.4.01>

ВВЕДЕНИЕ

Композитные и керамические материалы успешно используются в аэрокосмической технике [1], на железнодорожном транспорте [2], в машиностроении [3], компонентах ракет и гиперзвуковых транспортных средствах [4], системе гражданской инфраструктуры [5], биомедицине [6, 7] и т.д. Столь широкому их применению способствует многообразие физико-механических характеристик и химического состава, которые позволяют создавать материалы с заранее рассчитанными свойствами [8–10].

Несмотря на описанные выше преимущества композитов и керамики, их обработка сопряжена с большими трудностями. В частности, механическая обработка, хотя и имеет предпочтение при обработке металлов [11], приводит к неприемлемому качеству деталей из керамических и композитных материалов [12] и снижает долговременную надежность [13]. Поэтому для обработки допускаются только немеханические методы, такие как лазерный, ультразвуковой, электрохимический и электроэрозионный [14].

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) отличается от других немеханических методов экономичностью и возможностью обработки композитных материалов сложного профиля [15]. При обработке диэлектриков электроэрозионные методы используются в сочетании с другими способами, такими как метод вспомогательного электрода [16], электрохимическая [17], ультразвуковая [18] и лазерная обработки [19, 20]. Однако, несмотря на некоторые преимущества этих комбинированных методов, метод ЭЭО с применением электролитов более практичен и эффективен при обработке керамики и композитов [21].

Невзирая на то, что известны различные модели удаления керамики и композитов, механизм удаления при ЭЭО с использованием электролитов по-прежнему является предметом дискуссий. Научная полемика о механизмах обработки привела к тому, что имеются несколько предполагаемых моделей процесса. Например, Мелк и др. [22] на основе обработки

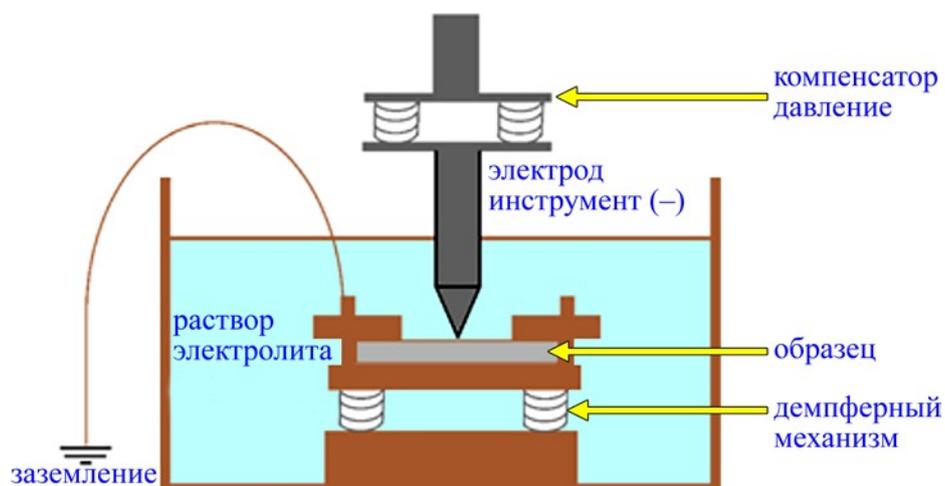


Рис. 1. Схематическое изображение электроэрозионного устройства для удаления диэлектриков в электролитах.

композита 3Y-TZP многослойных углеродных нанотрубок пришли к заключению, что удаление материала происходит вследствие плавления, испарения и растрескивания. Однако вклад появления и существования разрядов, а также роль физико-химических свойств электролитов на всех этапах обработки не были учтены [23]. Ю и др. [24] посредством экспериментов и моделирования показали возможности термической, механической и химической природы удаления углепластика. В работе [25] было изучено влияние термического напряжения на удаление материала композитного карбида кремния, армированного углеродным волокном, и определено, что высокая скорость резания связана с термическим напряжением. Кроме того, Раджпут и др. [26] на основе обработки кварца, стекла, керамики показали, что механизм удаления материала включает термическую эрозию, химическое травление, термическое растрескивание. Дутта и др. [27] определили процентный вклад напряжения, длительности импульса и частоты оборотов электрода-инструмента (ЭИ) в скорость удаления материала (MRR). Они утверждали, что удаление происходит именно за счет плавления и испарения. Клок и др. [28] выявили значительные расхождения, сравнивая измеренную температуру при обработке с уже существовавшими моделями. Кроме того, в описанных выше работах [24–26] не учитываются другие составляющие удаления материала, такие как влияние импульсных разрядов и пузырькового слоя вблизи катода [29].

Несмотря на наличие ряда работ, имеющиеся результаты не дают возможности полностью и всесторонне понять природу удаления материалов. В данной статье мы сосредоточимся на механизме начальной стадии удаления диэлектриков при их обработке в электролитах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для ЭЭО диэлектриков в электролитах было разработано усовершенствованное электроэрозионное устройство с релаксационным генератором [30], которое показано на рис. 1.

Установка состоит из следящей компенсирующей системы в виде плавающей головки с коническим катодом и держателя-демпфера. Образец, расположенный на держателе-демпфере, прижимается к наконечнику анода и устанавливается внутри ванны, заполненной электролитом NaOH или KOH, или NaCl. Между электролитом и катодом создается разность потенциалов. Выходное напряжение установки можно регулировать в диапазоне 0–400 V, а максимальный ток – до 10 А. Объектами исследования являются стекло (в качестве композита [31, 32]) с химическим составом SiO₂ – 68,4%; CaO – 8,5%; Na₂O – 9,4%; K₂O – 7,1%; Al₂O₃ – 3,9%; B₂O₃ – 2,7% и Alumina Ceramics (Al₂O₃). Поверхность образцов исследовали с помощью оптического микроскопа NLCD-307B.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а показан образец диэлектрика, не подвергнутый электроэрозионной обработке. После обработки в электролите края отверстий не идеальны для окружности (см. рис. 2б), как и в случае термической обработки [33]. В частности, на обработанной поверхности отверстия отчетливо видны последовательности сколов, выпуклостей, которые не являются следствием плавления, термообработки. Аналогично Пол и др. [34] определили, что увеличение концентрации электролита приводит к неправильной форме окружности и отверстия. Также Ян и др. [35] считают, что не вращающийся катод приведет к неправильной форме отверстия. В целом визуальная оценка прошитых отверстий



Рис. 2. Образец стеклянной пластины до (а) и после (б) электроэрозионной обработки в электролите.

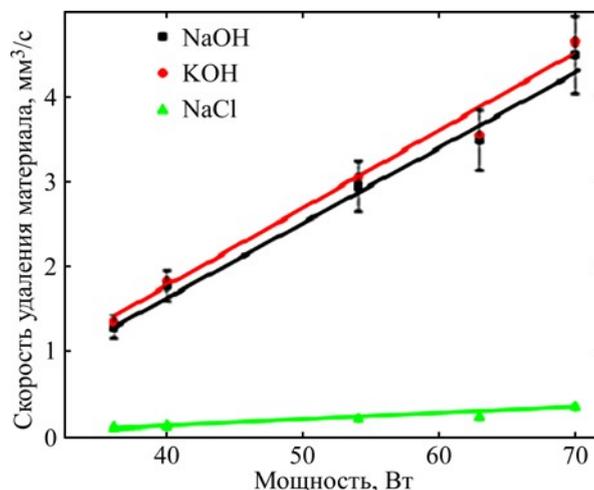


Рис. 3. Зависимость скорости удаления стеклянной пластины от подводимой мощности в водных растворах электролитов NaCl, NaOH и KOH.

вращающимся катодом и выводы вышеперечисленных авторов не позволяют заключить, что они являются следствием термической обработки. Однако такая оценка не позволяет делать окончательные выводы. Более универсальной оценкой для всех методов обработки является определение скорости удаления материала [36, 37].

Результаты показали, что MRR при электроэрозии в электролитах зависит от двух важных факторов: электрической мощности и типа электролита. В частности, на рис. 3 показана зависимость MRR от вкладываемой электрической мощности: при 36 Вт в 6%-х водных электролитах NaOH, KOH и NaCl скорости удаления материала составляют 1,3; 1,35 и 0,11 мм³/с, а при 70 Вт – 4,5; 4,65 и 0,36 мм³/с соответственно. Очевидно, численные значения MRR увеличиваются более чем в 3 раза и имеют линейную зависимость от подводимой электрической мощности в исследованном диапазоне 35–75 Вт. Полученная линейная зависимость MRR от подводимой электрической мощности идентична теоретической зависимости для полиэлектролитов [38]. Однако эта линейность зависит не только от входной мощности, но может быть связана с физико-химическими свойствами электролита. Например, Мохаммад и др. [39] сообщают, что часть энергии разряда поглощается заготовкой из-за проводимости, а остальная часть рассеивается в электролите из-за

конвекции и излучения. Вэй и др. [40, 41] подсчитали, что доля мощности, передаваемой на деталь в режиме разряда, составляет всего 29%. В этой ситуации Билал и др. [42] считают, что термическое растрескивание и скалывание являются главной движущей силой в ЭЭО диэлектрика. Также Ражпут и др. [43] предпочитают механизм удаления материала в качестве тепловой модели. Хотя тепловая модель хорошо согласуется с существующими имитационными моделями, разница между вычисленными значениями [43] и экспериментально наблюдаемыми [21, 44] значительна. В частности, в зависимости от материала температура в имитационных моделях превышает 3300 К, а при практических измерениях с помощью термопары вольфрам–железо и спектрального анализа температура катода составляет 2300±200 К [21, 44]. Более того, результаты Словецкого и Терентьева (где температура катода не превышает 1500 К) в общем согласуются с вышеуказанными выводами [45]. Кроме этого, температура электролита на расстоянии 2 мм от газоразрядного (или пузырькового) слоя даже при высоких температурах катода не превышает температуры кипения воды (100 °С) [45–49]. В нашем случае температура плавления керамических образцов была выше, чем 3000 К [50, 51], поэтому полагаем, что удаление материала происходит не вследствие термической обработки. Это означает, что линейный рост

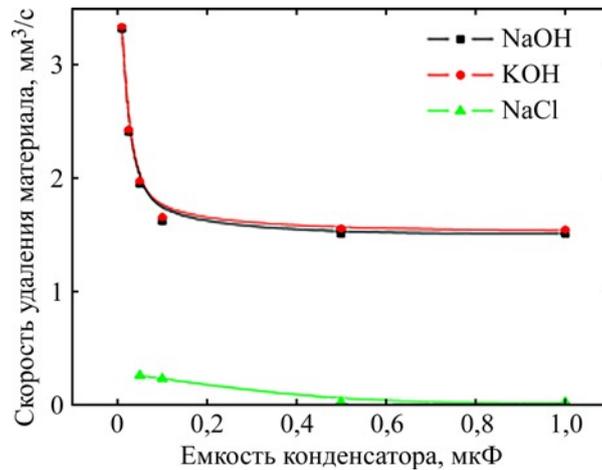


Рис. 4. Зависимость скорости удаления стеклaнной пластины от емкости конденсатора в водных растворах электролитов NaCl, NaOH и KOH.

MRR при увеличении вкладываемой электрической мощности не связан с термическими эффектами, а зависит от других факторов, например, от физико-химических свойств (то есть типа или концентрации) электролита. В частности, зависимости MRR от емкости и типа электролита показаны на рис. 3. Результаты доказывают, что образцы в щелочных растворах обрабатываются примерно с одинаковой скоростью, и на порядок большей, чем при обработке в поваренной соли. А именно: изменение анионной группы с Cl^- на OH^- приводит к повышению MRR на порядок и увеличению интенсивности появления пузырьков водорода у катода [52]. Пауль и др. [53] также добились значительного увеличения MRR, используя гидроокиси калия и натрия при обработке полупроводников. Кроме того, несмотря на то что зависимость MRR от типа электролита очень сильная, MRR не зависит от концентрации электролита в исследованном диапазоне (5–27%). Очевидно, что процесс обработки связан не только с физико-химическими свойствами электролита, но и с внешним фактором, например, частотными характеристиками релаксационного генератора [54].

На рис. 4 представлен график зависимости MRR от емкости конденсатора, определяющей частотные характеристики разряда в RC-генераторе. В частности, для водных растворов NaOH, KOH и NaCl при 1 мкФ значения скорости съема составляют 1,51; 1,54 и 0,022 мм³/с, а при 0,01–0,05 мкФ – 3,32; 3,33 и 0,36 мм³/с соответственно. Результаты показывают, что при меньших емкостях конденсатора MRR выше, чем при относительно больших емкостях. Али и др. [55] обнаружили, что емкость конденсатора является наиболее важным параметром для создания проводящего слоя в непроводящей керамике. Известно, что емкость

конденсатора линейно связана с длительностью импульса (τ) в RC-генераторах (то есть, $\tau = RC$). Дутта и др. [27] методом Тагучи определили, что влияние длительности импульса на MRR является значительным, то есть доля среди других влияющих факторов превышает 5%. Хан и др. [56] улучшили качество поверхности за счет разветвления разряда, что привело к повышению частоты импульсов. Янг и др. [57] также показали, что увеличение частоты импульса разряда расширяет обрабатываемую зону поверхности и производит меньше тепловой энергии. Очевидно, что уменьшение емкости конденсатора или длительности импульса приводит к улучшению и ускорению обработки диэлектрика.

Исходя из анализа вышеописанных результатов и существующих литературных данных механизм удаления диэлектриков в его начальной стадии можно разделить на три этапа (см. рис. 5а). На начальном этапе (см. рис. 5а, I), происходит обычный процесс электролиза, что связано с возможностью образования в электролитах точечных дефектов с разным типом проводимости [58]. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) в этой области имеет линейную зависимость (см. рис. 5б, I).

Этот процесс продолжается до тех пор, пока не возникает пороговый (критический) или ионный (анионный) ток (см. рис. 5б II, А), при котором появляются первоначальные пузырьки и последующие разряды. Это величина сильно зависит от физико-химических свойств, то есть от типа электролита [21]. В частности, критический ток и напряжения при концентрации 6% для электролитов NaCl, NaOH и KOH составляют 50 В и 1,8 А, 25 В и 2 А, 25 В и 1,9 А соответственно. В случае NaCl повышенное критическое напряжение связано с сопротивлением электролита между электродами, которое

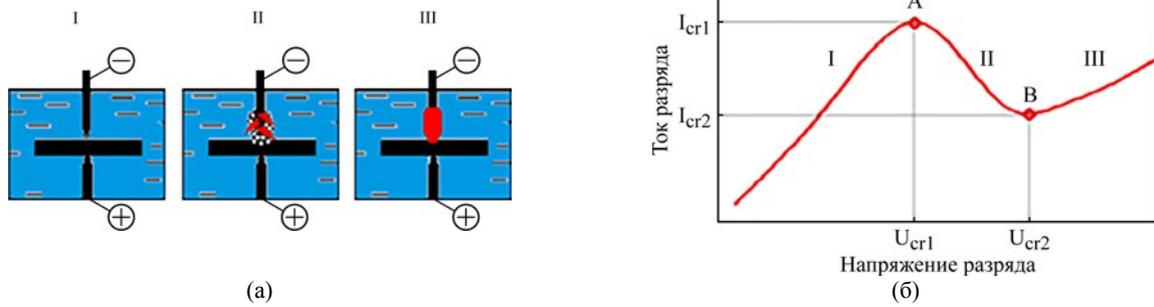


Рис. 5. Схематическое изображение начальной стадии процесса ЭЭО диэлектриков, состоящей из трех этапов (а); вольт-амперная характеристика электролитов для трех этапов начальной стадии процесса ЭЭО (б).

вдвое больше, чем в случае NaOH и KOH. Результаты также показали, что для других концентраций электролитов общий характер ВАХ идентичен на всех этапах.

Начало второго этапа характеризуется образованием пузырьков на поверхности катода (см. рис. 5а, II). Причина появления пузырьков и усиления газообразования связана с повышением локальной температуры электролита вблизи катода (например, средняя температура газа в экспериментах составляет 900 К [45]) из-за дальнейшего увеличения входного напряжения. Увеличение концентрации пузырьков вблизи катода приводит к постепенному изолированию поверхности катода. Скопления пузырьков и сопутствующие первоначальные разряды не могут существовать по отдельности. Образование большого количества мелких пузырьков на катоде усиливает эти разряды [59]. Из-за появления в электролите изолирующего пузырькового слоя полный электрический ток состоит из тока проводимости и тока смещения [60]. Токи смещения возникают в изолирующем пузырьковом слое в нестационарном режиме при приложении к этой среде переменного электрического поля [61]. На границе электролита и пузырькового слоя (изолирующего часть катода) ток ионов (анионов) и токи смещения компенсируются между собой. Следовательно, ионный ток протекает только через оставшуюся неизолированную часть катода. Хотя токи смещения чувствительно увеличиваются, но суммарный (полный) ток уменьшается из-за сильного падения ионного тока. В частности, суммарный ток и напряжения в точке В (см. рис. 5б II) для электролитов NaCl, NaOH и KOH при концентрации 6% составляют 110 В и 1,3 А, 65 В и 0,6 А, 65 В и, 0,6 А соответственно. Уменьшение критического тока на катоде связано с увеличением сопротивления электролита и изолирующего пузырькового слоя между электродами. В конце второго этапа вблизи катода появляются устойчивые парогозовые слои (средняя толщина 0,5 мм) из-за максимального скопления

пузырьков. Следовательно, через эти слои начинают проскакивать высокочастотные разряды.

Финальный этап характеризуется явлениями кавитации [23], а также плазменного светящего факела (с характерным временем жизни 5 мс [62]), существующим из-за участвовавших высокочастотных разрядов вблизи катода (см. рис. 5а, III). В начале третьего этапа пузырьки парогозового слоя начинают схлопываться из-за уравнивания внутреннего и внешнего давления за счет повышения локальной температуры, которая является производной приложенного напряжения. Следовательно, схлопывание пузырьков, называемое кавитацией [63], приводит к возникновению большого кавитационного удара, который составляет примерно 10^{10} МПа [23]. Поэтому Куо и др. [64] использовали кавитацию для улучшения MRR за счет специально созданных пузырьков. Именно за счет кавитации уменьшается площадь поверхности изолирующего парогозового слоя, что приводит к последующему умеренному увеличению тока разряда на ВАХ (см. рис. 5б, III). В то же время кулоновские силы светящего плазменного факела из ионизированного газа влияют на шероховатость поверхности диэлектрика, состоящего из диполей. Еще одной стороной, участвующей в процессах, являются анионные группы электролитов (Cl⁻, OH⁻). Эти группы служат для изменения атомных связей из-за их присоединения к поверхностным атомам образца [52]. Одновременно анионная группа и плазменное воздействие, взаимно дополняя друг друга, приводят к ослаблению атомных связей на поверхности образцов из диэлектрика, а следовательно, квантационный удар разрывает связь. Разрыв атомных связей из-за синергетического эффекта трех вышеуказанных факторов можно считать началом процесса ЭЭО.

ВЫВОДЫ

В данной статье мы предложили новую модель механизма удаления диэлектрических

материалов с учетом анализа ранее существовавших традиционных моделей. Удаление материалов экспериментально исследовано на усовершенствованной электроэрозионной установке, что позволило существенно увеличить скорость удаления материала (MRR).

В частности, мы определили, что начальная стадия удаления диэлектрических материалов состоит из трех последовательных этапов: вначале происходит процесс обычного электролиза (I), затем у катода образуется пузырьковый слой (II) и учащаются высокочастотные разряды с последующим возникновением плазменного факела вблизи катода и кавитации (III). Установлено, что механизм начальной стадии удаления материалов связан с синергетическим эффектом взаимодействия анионной группы электролитов, горящего плазменного факела и кавитационного удара. В целом результаты показывают, что предложенная синергетическая модель охватывает все основные процессы механизма начальной стадии удаления материала, причем в существенно большей степени, чем традиционные тепловые модели.

В основном проведенные измерения и их анализ позволяют глубже понять процесс ЭЭО диэлектриков с целью увеличения MRR, что предполагает расширение возможности применения композитных и керамических материалов в перспективных отраслях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Soutis, C., Aerospace engineering requirements in building with composites, *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, Irving Ph., Soutis C., Eds., Woodhead Publishing, 2020, p. 3.
- Robinson, M., Matsika, E. and Peng, Q., Application of composites in rail vehicles, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016, Elsevier, p. 1.
- Mavhangu, S.T., Akinlabi, E.T., Onitiri, M.A. and Varachia, F.M., Aluminum matrix composites for industrial use: advances and trends, *Procedia Manuf.*, 2017, vol. 7, p. 178.
- Binner, J., Porter, M., Baker, B., Zou, J., et al., Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs—a review, *Int. Mater. Rev.*, 2020, vol. 65, no. 7, p. 389.
- Ganga Rao, H., Infrastructure applications of fiber-reinforced polymer composites, *Applied Plastics Engineering Handbook*. William Andrew Publishing, 2017, p. 675.
- Mann, G.S., Singh, L.P., Kumar, P. and Singh, S., Green composites: A review of processing technologies and recent applications, *J. Thermoplast. Comp. Mater.*, 2020, vol. 33, no. 8, p. 1145.
- Boccardi, E., Ciraldo, F.E. and Boccaccini, A.R., Bioactive glass-ceramic scaffolds: Processing and properties, *MRS Bull.*, 2017, vol. 42, no. 3, p. 226.
- Ralbag, N., Mann-Lahav, M., Davydova, E.S., Ash, U., et al., Composite materials with combined electronic and ionic properties, *Matter*, 2019, vol. 1, no. 4, p. 959.
- Li, Zh., Zhang, X., Cheng, H., Liu, J., et al., Confined synthesis of 2D nanostructured materials toward electrocatalysis, *Adv. Energy Mater.*, 2020, vol. 10, no. 11, art. ID 1900486.
- Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., et al., Progress in additive manufacturing on new materials: A review, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2019, vol. 35, no. 2, p. 242.
- Costa, C., Ferreira, L.P., Sá, J.C., Silva, F.J., et al., Implementation of 5S methodology in a metalworking company, *DAAAM International Scientific Book*, Branko Katalinic, Ed., Vienna: DAAAM International Editor, 2018, p. 001.
- Heidary, H., Karimi, N.Z. and Minak, G., Investigation on delamination and flexural properties in drilling of carbon nanotube/polymer composites, *Comp. Struct.*, 2018, vol. 201, p. 112.
- Xu, J., Li, Ch., Mi, S., An, Q., et al., Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria, *Comp. Struct.*, 2018, vol. 201, p. 1076.
- Bilal, A., Jahan, M.P., Talamona, D. and Perveen, A., Electro-discharge machining of ceramics: A review, *Micromachines*, 2018, vol. 10, no. 1, p. 10.
- Rayat, M.S., Gill, S.S., Singh, R. and Sharma, L., Fabrication and machining of ceramic composites: A review on current scenario, *Mater. Manufact. Proc.*, 2017, vol. 32, no. 13, p. 1451.
- Mohri, N., Fukuzawa, Y., Tani, T., Saito, N., et al., Assisting electrode method for machining insulating ceramics, *CIRP annals*, 1996, vol. 45, no. 1, p. 201.
- Абитов, А.Р., *Электрофизикохимическая обработка фасонных поверхностей в кремниевых заготовках*, Автореферат дис. ... канд. ф.-м. наук, Тула, 2011.
- Леон, А.В., Звядинцева, С.Ю., Чирков, Е.А., Шкодин, А.С., и др., Классификация основных направлений исследований гибридных процессов, *Механика XXI века*, 2019, № 18, с. 196.
- Al-Ahmari, A.M.A., Rasheed, M.S., Mohammed, M.K., Saleh, T., A hybrid machining process combining micro-EDM and laser beam machining of nickel–titanium-based shape memory alloy, *Mater. Manufact. Proc.*, 2016, vol. 31, no. 4, p. 447.
- Li, L., Diver, C., Atkinson, J., Giedl-Wagner, R., et al., Sequential laser and EDM micro-drilling for next generation fuel injection nozzle manufacture, *CIRP annals*, 2006, vol. 55, no. 1, p. 179.

21. Abdulkarimov, E.T., Mirkarimov, A.S. and Zaripov A.A., Electroerosion treatment of dielectric materials, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2007, vol. 43, no. 2, p. 77.
22. Melk, L., Antti, M.L. and Anglada, M., Material removal mechanisms by EDM of zirconia reinforced MWCNT nanocomposites, *Ceram. Int.*, 2016, vol. 42, no. 5, p. 5792.
23. Зарипов, А.А., Ашуров, Х.Б., Феноменологический механизм воздействия кавитации на ЭЭО стекла, *ЭОМ*, 2014, т. 50, № 2, с. 105.
24. Yue, X., Yang, X., Tian, J., He, Z., et al., Thermal, mechanical and chemical material removal mechanism of carbon fiber reinforced polymers in electrical discharge machining, *Int. J. Machine Tools Manufact.*, 2018, vol. 133, p. 4.
25. Yue, X., Li, Q. and Yang, X., Influence of thermal stress on material removal of Cf/SiC composite in EDM, *Ceram. Int.*, 2020, vol. 46, no. 6, p. 7998.
26. Rajput, V., Goud, M. and Suri, N.M., Study on effective process parameters: toward the better comprehension of EDCM process, *Int. J. Modern Manufact. Technol.*, 2019, vol. XI, no. 2, p. 105.
27. Dutta, H., Debnath, K. and Sarma, D.K., A study of material removal and surface characteristics in microelectrical discharge machining of carbon fiber reinforced plastics, *Polymer Compos.*, 2019, vol. 40, no. 10, p. 4033.
28. Klocke, F., Mohammadnejad, M., Zeis, M. and Klink, A., Investigation on the variability of existing models for simulation of local temperature field during a single discharge for electrical discharge machining (EDM), *Procedia CIRP*, 2018, vol. 68, p. 260.
29. Зарипов, А.А., Ашуров, Х.Б., Вклады различных факторов в процесс электроимпульсной обработки, *Узбекский физический журнал*, 2016, т. 18, № 3, с. 214.
30. Зарипов, А.А., *Процессы при электроэрозионной обработке диэлектриков*, Автореф. докт. дис., Инст. ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, 2019.
31. Pahlevani, F. and Sahajwalla, V., Effect of glass aggregates and coupling agent on the mechanical behaviour of polymeric glass composite, *J. Cleaner Product.*, 2019, vol. 227, p. 119.
32. Thomason, J.L., Glass fibre sizing: A review, *Composites Part A: Appl. Sci. Manufact.*, 2019, vol. 127, art. ID 105619.
33. Furutani, K. and Maeda, H., Machining a glass rod with a lathe-type electro-chemical discharge machine, *J. Micromechan. Microeng.*, 2008, vol. 18, no. 6, art. ID 065006.
34. Paul, L. and Hiremath, S.S., Improvement in machining rate with mixed electrolyte in EDCM process, *Procedia Technol.*, 2016, vol. 25, p. 1250.
35. Yan, B.H., Wang, A.C., Huang, C.Y. and Huang, F.Y., Study of precision micro-holes in borosilicate glass using micro EDM combined with micro ultrasonic vibration machining, *Int. J. Machine Tools Manufact.*, 2002, vol. 42, no. 10, p. 1105.
36. Bobbili, R., Madhu, V. and Gogia, A.K., Effect of wire-EDM machining parameters on surface roughness and material removal rate of high strength armor steel, *Mater. Manufact. Proc.*, 2013, vol. 28, no. 4, p. 364.
37. Mohammadi, A., Tehrani, A.F., Emanian, E. and Karimi, D., Statistical analysis of wire electrical discharge turning on material removal rate, *J. Mater. Proces. Technol.*, 2008, vol. 205, nos. 1–3, p. 283.
38. Ашуров, Х.Б., Зарипов, А.А., Экспериментальное изучение и модельное описание импульсного коронного разряда вблизи твердого тела, помещенного в сильный электролит, Доклады Академии Наук Узбекистана, 2013, № 1, с. 26.
39. Mohammad, Y.A., Maleque, M.A., Banu, A., Sabur, A., et al., Micro electro discharge machining of non-conductive ceramic, *Mater. Sci. Forum*, 2018, vol. 911, p. 20.
40. Wei, C., Xu, K., Ni, J., Brzezinski, A.J., et al., A finite element based model for EDCM in discharge regime, *Int. J. Adv. Manufact. Technol.*, 2011, vol. 54, p. 987.
41. Wei, C., Hu, D., Xu, K. and Ni, J., Electro chemical discharge dressing of metal bond micro grinding tools, *Int. J. Machine Tools Manufact.*, 2011, vol. 51, p. 165.
42. Bilal, A., Perveen, A., Talamona, D. and Jahan, M.P., Understanding material removal mechanism and effects of machining parameters during EDM of zirconia-toughened alumina ceramic, *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 1, p. 67.
43. Rajput, V., Goud, M. and Suri, N.M., Finite element modeling based material removal analysis of non-conductive materials in EDCM using adaptive tool feed system, *Int. J. Modern Manufact. Technol.*, 2020, vol. XII, no. 1, p. 164.
44. Kirko, D.L., Oscillatory processes in the plasma of the discharge in electrolyte in a magnetic field, *Techn. Phys.*, 2015, vol. 60, no. 4, p. 505.
45. Словецкий, Д.И., Терентьев, С.Д., Электрический разряд в электролитах – источник неравновесной плазмы при атмосферном давлении, *Химия высоких энергий*, 2003, т. 37, № 5, с. 355.
46. Fascio, V., Wiithrich, R., Viquerat, D. and Langen H., 3D micro structuring of glass using EDCM. *Proc. Int. Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 1999, p. 179.
47. Fascio, V., Langen, H.H., Bleuler, H. and Comminellis, C., Investigations of the SACE, *Electrochem. Commun.*, 2003, vol. 5, p. 203.
48. Basak, I. and Ghosh, A., Mechanism of spark generation during electrochemical discharge machining: a theoretical model and experimental verification, *J. Mater. Proces. Technol.*, 1996, vol. 62, nos. 1–3, p. 46.
49. Fascio, V., Wuthrich, R. and Bleuler, H., SACE in the light of electrochemistry, *Electrochim. Acta*, 2004, vol. 49, p. 3997.

50. Gu, M., Huang, C., Xiao, S. and Liu, H., Improvements in mechanical properties of TiB₂ ceramics tool materials by the dispersion of Al₂O₃ particles, *Mater. Sci. Eng.: A*, 2008, vol. 486, nos. 1–2, p. 167.
51. Schneider, S.J. and McDaniel, C.L., Effect of environment upon the melting point of Al₂O₃, *J. Res. Nat. Bureau Standards. Sect. A, Phys. Chem.*, 1967, vol. 71, no. 4, p. 317.
52. Jalali, M., Maillard, P. and Wüthrich, R., Toward a better understanding of glass gravity-feed micro-hole drilling with electrochemical discharges, *J. Micromech. Microeng.*, 2009, vol. 19, no. 4, art. ID 045001.
53. Paul, L. and Hiremath, S.S., Improvement in machining rate with mixed electrolyte in ECDM process, *Procedia Technol.*, 2016., vol. 25, p. 1250.
54. Zaripov, A.A. and Ashurov, Kh.B., Electrical discharge machining of nonconductive materials, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 47, no. 3, p. 197.
55. Mohamed A.R., Asfana B. and Mohammad Y.A., Investigation of recast layer of non-conductive ceramic due to micro-EDM, *Advanced Materials Research – Trans Tech Publications Ltd*, 2014, vol. 845, p. 857.
56. Han, M.S., Min, B.K. and Lee, S.J., Improvement of surface integrity of electro-chemical discharge machining process using powder-mixed electrolyte, *J. Mater. Proces. Technol.*, 2007, vol. 191, nos. 1–3, p. 224.
57. Yang, C.T., Song, S.L., Yan, B.H. and Huang, F.Y., Improving machining performance of wire electrochemical discharge machining by adding SiC abrasive to electrolyte, *Int. J. Machine Tools Manufact.*, 2006, vol. 46, no. 15, p. 2044.
58. Macdonald, D.D., The history of the point defect model for the passive state: a brief review of film growth aspects, *Electrochim. Acta*, 2011, vol. 56, no. 4, p. 1761.
59. Descoedres, A., *Characterization of electrical discharge machining plasmas*, THÈSE NO 3542, Lausanne, EPFL, 2006.
60. Siegel, D.M., *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory: Molecular vortices, displacement current, and light*. Cambridge University Press, 2003.
61. Ивченко, Г., Токи смещения в металлах, диэлектриках и в вакууме. <http://new-idea.kulichki.net/pubfiles/190712004817.pdf>
62. Абдукаримов, Э.Т., Миркаримов, А.М., Зарипов, А.А., Исследование электрического разряда в водном растворе электролита, *Узбекский физический журнал*, 2003, т. 5, № 1, с. 52.
63. Brennen, C.E., *Cavitation and bubble dynamics*, Cambridge University Press, 2014.
64. Kuo, K.Y., Wu, K.L., Yang, C.K. and Yan, B.H., Wire electrochemical discharge machining (WECDM) of quartz glass with titrated electrolyte flow, *Int. J. Machine Tools Manufact.*, 2013, vol. 72, p. 50.

Summary

Ceramics and composites, many of whose physico-chemical properties significantly exceed similar properties of metals and their alloys, are processed qualitatively mainly by the electroerosion method. Despite the existing works, the mechanism of the initial stage of the removal of materials has not yet been identified. For a comprehensive understanding of the mechanism of the removal of dielectrics, a new model is proposed based on the experimental results obtained on an improved electroerosion installation. It was revealed that the initial stage of the removal of a dielectric material consists of three successive stages which are associated with the synergistic effect on the process of the anionic group of electrolytes, plasma flare, and the cavitation shock. This makes it possible to better understand the mechanism of the removal of composite and ceramic materials, which should contribute to ensuring the machinability of those materials and their wide use in promising technologies.

Keywords: electroerosion treatment, material removal mechanism, material removal rate, synergetic effect, cavitation, bubbles, collapse, electrolytes, anionic group, plasma flame, pulse discharge