



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Теоретическое моделирование процесса промывки межэлектродного пространства при копировально-прошивной электроэрозионной обработке изделий, выполненных из полимерных композитных материалов

Евгений Шлыков ^{a, *}, Тимур Абляз ^b, Карим Муратов ^c

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>,  Kruspert@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>,  lowrider11-13-11@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>,  Karimur_80@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.1.9

История статьи:

Поступила: 31 марта 2022

Рецензирование: 06 апреля 2022

Принята к печати: 12 апреля 2022

Доступно онлайн: 15 июня 2022

Ключевые слова:

Полимерные композитные материалы
Копировально-прошивная электроэрозионная обработка
Промывка
Шлам

Финансирование:

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-566.2021.4

Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Полимерные композитные материалы (ПКМ) используются для повышения механических свойств и увеличения сроков эксплуатации годных изделий. Для обработки изделий, выполненных из ПКМ, целесообразно применение электрофизических методов обработки. Одним из таких методов является копировально-прошивная электроэрозионная обработка (КПЭЭО). Применение таких методов обработки ПКМ обусловлено их высокими физико-механическими свойствами и сложностью обработки лезвийными методами. Ввиду того, что одним из элементов ПКМ является связующее – эпоксидная смола, которая в процессе электроэрозионной обработки разрушается на кромках получаемых отверстий и пазов, ПКМ можно считать труднообрабатываемым материалом. Во время КПЭЭО отверстий в изделиях из ПКМ происходит повышение температуры, зачастую вызванное неэффективным охлаждением в зоне обработки. Статья посвящена теоретическому моделированию в пакете Ansys, позволяющему оценить влияние способа промывки на эффективность КПЭЭО изделий из ПКМ на основе численного моделирования в программных системах конечно-элементного анализа. Целью работы является повышение производительности процесса КПЭЭО изделий, выполненных из ПКМ. **Методы.** Экспериментальные исследования проводились по методу классического эксперимента на копировально-прошивном электроэрозионном станке Smart CNC. Заготовка подвергалась обработке при постоянном напряжении $U = 50$ В, времени включения импульса $T_{on} = 100$ мкс и силе тока $I = 10$ А. Для теоретического моделирования потока использовалось программное обеспечение ANSYS CFX 20.1. Моделирование распределения потоков проводилось при трех значениях глубины обработки (2, 10, 15 мм), а также при трех значениях угла наклона форсунок (15° , 45° , 75°). **Результаты и обсуждения.** Анализ полученных данных показал, что при КПЭЭО ПКМ следует учитывать угол расположения форсунок промывки для увеличения производительности обработки глубоких глухих отверстий. Установлено, что наибольшее значение производительности достигается при расположении форсунок под углом 15° . Преобладает ламинарное движение. При данном расположении форсунок значение давления жидкости и вывод шлама являются стабильными как при КПЭЭО ПКМ на глубину 2 мм, так и при обработке на глубину 15 мм. Отмечено, что для обработки отверстий глубиной 10 мм и более стоит учитывать угол наклона форсунки промывки, для эффективной обработки из зазора необходимо удалить эродированные частицы. В процессе проведения экспериментального исследования при обработке отверстий глубиной 15 мм наблюдались налипания шлама на электрод-инструмент, а также замыкание процесса КПЭЭО, возникновение вторичных разрядов в зоне обработки, что вызывало остановку процесса обработки.

Для цитирования: Шлыков Е.С., Абляз Т.Р., Муратов К.Р. Теоретическое моделирование процесса промывки межэлектродного пространства при копировально-прошивной электроэрозионной обработке изделий, выполненных из полимерных композитных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 25–38. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-25-38.

*Адрес для переписки

Шлыков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29,
614990, г. Пермь, Россия
Тел: 8 (342) 2-198-324, e-mail: Kruspert@mail.ru

Введение

Внедрение новых материалов, инновационных технологий и оборудования напрямую связано с развитием отраслей современного машиностроения, в том числе авиационной и нефтегазовой. Актуальна разработка и повышение эффективности технологий обработки новых

полимерных композитных материалов (ПКМ), а также формирование требуемых физико-механических свойств изделий, выполненных из данных материалов [1].

На сегодняшний день существует разнообразная номенклатура ПКМ, одними из которых являются новые перспективные материалы на основе углепластика, разработанные в ФГУП «ВИАМ». Одним из таких материалов является препрег углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200. Данный материал изготовлен на основе равнопрочной углеродной ткани ВТкУ-2.200 и связующего ВСЭ-1212. Для обработки изделий, выполненных из ПКМ, в том числе из углепластиков типа ВКУ-39, целесообразно применение электрофизических методов обработки. Одним из таких методов является копировально-прошивная электроэрозионная обработка (КПЭЭО). Применение таких методов обработки ПКМ обусловлено их высокими физико-механическими свойствами и сложностью обработки лезвийными методами. Ввиду того что одним из элементов ПКМ является связующее – эпоксидная смола, которая в процессе электроэрозионной обработки разрушается на краях получаемых отверстий и пазов, ПКМ можно считать труднообрабатываемым материалом. Во время КПЭЭО отверстий в изделиях из ПКМ происходит повышение температуры, зачастую вызванное неэффективным охлаждением в зоне обработки [2–3].

В работах [4–6] представлены методы и особенности КПЭЭО ПКМ. На основе данных работ показано, что изделие из ПКМ при КПЭЭО подвергается воздействию электрических импульсов, в результате которого возникает плазменный канал, обладающий внутренней температурой порядка 9000...9500 °С, что приводит к смене состояния материала ПКМ. Происходит фазовый переход из твердого материала в паробразное вещество, что впоследствии приводит к тому, что пары ПКМ и расплавленные кусочки шлама электрода-инструмента (ЭИ) затвердевают при остывании и образуют продукты электроэрозионного шлама, негативно влияющего на качество и производительность КПЭЭО [7, 8].

Скопление эрозионного шлама и других продуктов эрозии в зоне КПЭЭО изделий из ПКМ вызвано плохой промывкой пространства между ЭИ и обрабатываемой заготовкой при получении глубоких отверстий, а также шлицевых и

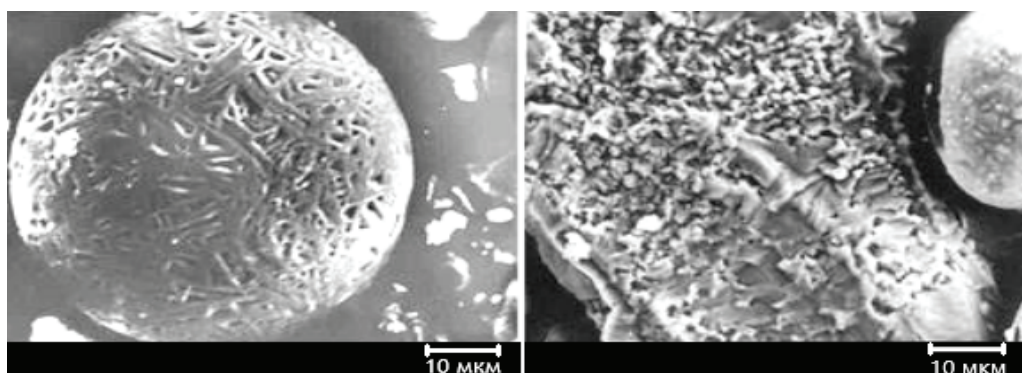
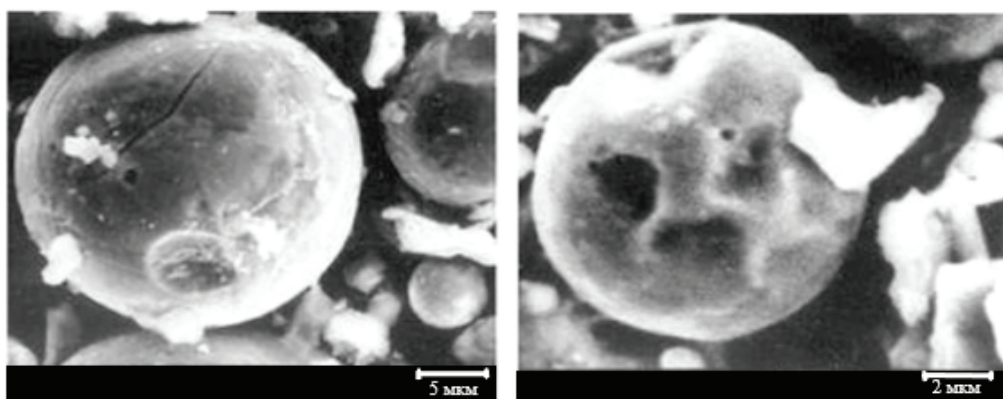
шпоночных пазов. Данное явление приводит к возникновению вторичных дендритных структур на поверхности ЭИ и заготовки и, как следствие, снижению качества и производительности КПЭЭО изделий из ПКМ [7].

Установлено, что движение шлама во время КПЭЭО изделий из ПКМ напрямую обусловлено процессом образования и движения газовых пузырей в зоне обработки [8–11]. В связи с тем, что диэлектрик (как правило, минеральное или трансформаторное масло) является вязким, электроэрозионный шлам может перемещаться в оболочке газового пузыря. В результате исследований, проведенных в работах [8–11], становится возможным визуально показать процесс перемещения эрозионного шлама в межэлектродном пространстве. Предлагается варьировать параметрами высоты подъема ЭИ из зоны КПЭЭО, а также скоростью подъема данного ЭИ. Однако в данных работах отсутствуют практические рекомендации для увеличения производительности и эффективности КПЭЭО изделий из ПКМ.

Строение эрозионного шлама, полученного в результате разрушения ЭИ и материала заготовки, показано в работах [12, 13]. Электроэрозионный шлам, получаемый при КПЭЭО заготовки, образует сферические и полусферические частицы, показанные на рис. 1, а. В процессе остывания испаренного материала заготовки происходит непосредственное формирование формы частиц в виде сферы. Большая часть полученных сферических и полусферических частиц эрозионного шлама обладает дендритной структурой, что говорит о низких скоростях охлаждения процесса КПЭЭО. Образование эрозионного шлама из разрушенного ЭИ происходит путем термического выкрашивания (рис. 1, б).

Частицы электроэрозионного шлама подвержены разрушению. Можно наблюдать, как с увеличением значения энергии импульса на поверхности сферических частиц появляются трещины, вмятины, а также зоны выкрашивания и разрушения (рис. 2).

Локальный нагрев обрабатываемого материала вызывает термическое разложение боридной фазы и диэлектрической среды [14, 15]. Данная диэлектрическая среда обработки находится в состоянии движения и постоянной циркуляции, что приводит к охлаждению ЭИ и материала заготовки. Однако поток паров становится тур-

*a**б**Рис. 1. Электроэрозионный шлам:**a* – с поверхности заготовки; *б* – с поверхности электрода-инструмента*Fig. 1. EDM sludge:**a* – from the workpiece surface; *б* – from the surface of the electrode-tool*a**б**Рис. 2. Поверхность частиц шлама сферической формы при разрушении:**a* – при масштабе 5 мкм; *б* – при масштабе 2 мкм*Fig. 2. The surface of spherical sludge particles after destruction:**a* – at a scale of 5 μm ; *б* – at a scale of 2 μm

булентным и может распадаться на маленькие части–фракции, где каждая часть может конденсироваться в жидкость и, как следствие, в твердое состояние.

Капля жидкого металла, скорость охлаждения которой снижают пары рабочей жидкости, способствует сфероидизации и дендритной ликвации частиц. Снижение содержания рабочей жидкости и паров металла при низкой входящей энергии приводит к уменьшению количества частиц с меньшим средним размером. При невысоких значениях энергии импульса шлам быстрее затвердевает. При этом поток паров материала и рабочей жидкости увеличивается вместе со значениями входной импульсной энергии [14, 15]. Так как движение частиц шлама является

турбулентным, то происходит их столкновение, в результате чего образуются трещины и вмятины на поверхности частиц данного шлама, а также возникает структура включений. Формирование электроэрозионного шлама существенным образом влияет на стабильность процесса КПЭО и, как следствие, производительность обработки.

Повышение производительности процесса КПЭО может быть достигнуто не только путем увеличения энергии импульсов, но и за счет интенсификации вывода продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. Увеличение производительности происходит при эффективной промывке и способствует интенсивному удалению из зазора эродированных частицы ПКМ

и ЭИ. Промывка также приносит чистое трансмиссионное масло в зазор и охлаждает ЭИ и ПКМ. Чем глубже обработка, тем труднее обеспечить надлежащую промывку зоны обработки. Это, в свою очередь, увеличивает время обработки, что негативно сказывается на производительности. При определенных условиях обработки эродированные частицы наплавляются на изделие из ПКМ. Это приводит к неравномерности обработки и снижению производительности или вовсе к ее остановке.

Промывка широко используется при КПЭЭО глубоких отверстий, в том числе при КПЭЭЭ изделий из ПКМ. Недостаточная промывка снижает эффективность удаления материала, так как материал, который остается в отверстии, повторно расплавляется в последующем импульсе и наплавляется на поверхность электродов.

Интенсификация промывки при КПЭЭО способствует увеличению скорости съема материала, особенно в глубоких и узких полостях при КПЭЭО. В работах [16, 17] установлено, что промывка поддерживает скорость эвакуации материала после разряда. В работе [17] исследовался эффект скачка ЭИ, который используется для эвакуации эродированного материала при погружении под давлением. Скорость движения электрода влияла на распределение эродированных частиц, а амплитуда движения влияла на количество чистого диэлектрика.

В работе [18] показано падение давления диэлектрической жидкости на глубине отверстия и влияние глубины отверстия на падение давления. Это была потеря 15 % длины из наблюдаемых 25 мм. Установлена также более высокая концентрация эродированного материала в углу обработанного отверстия (рис. 3).

Струйная или боковая промывка осуществляется трубками или промывочными соплами, которые направляют диэлектрическую жидкость в зазор, как показано на рис. 4.

Эффективность промывки при КПЭЭО глубоких отверстий в ПКМ при сложной геометрии каналов промывки электродов практически не исследована в полной мере. Существующие модели при обработке КПЭЭО ПКМ могут быть получены с помощью теоретического моделирования в программных системах конечно-элементного анализа, в том числе Ansys.

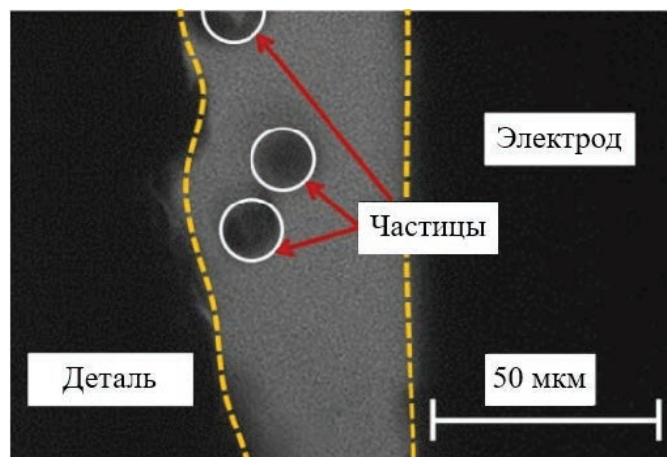


Рис. 3. Частичная трассировка в зазоре между электродом и заготовкой. Среднее значение скорости частиц составляет приблизительно 0,75 м/с

Fig.3. Partial tracing in the gap between the electrode and the workpiece. The average particle velocity is approximately 0.75 m/s

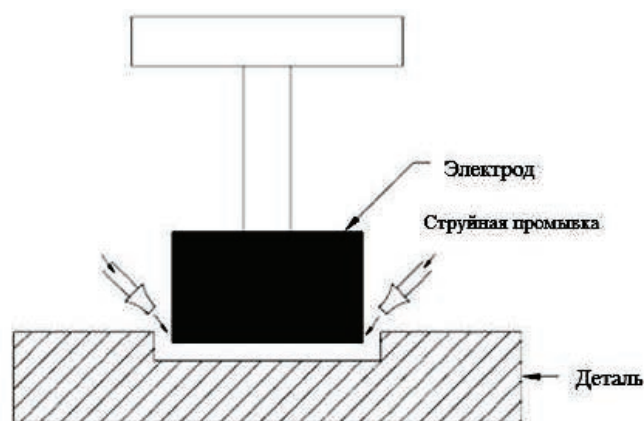


Рис.4. Схема струйной или боковой промывки

Fig.4. Scheme of jet or side flushing

Актуальной задачей является получение теоретической модели, позволяющей оценить влияние способа промывки на эффективность КПЭЭО изделий из ПКМ на основе численного моделирования в программных системах конечно-элементного анализа.

Цель работы: повышение производительности процесса КПЭЭО изделий, выполненных из ПКМ.

Задачи

1. Провести теоретический анализ влияния промывки форсунок рабочей жидкости на процесс КПЭЭО изделий, выполненных из ПКМ.
2. Провести экспериментальное исследование производительности процесса КПЭЭО изде-

лий, выполненных из ПКМ, и верификацию теоретической модели производительности КПЭЭО изделий, выполненных из ПКМ.

Методика исследований

Экспериментальные исследования проведены по методике, описанной в работах [4, 5, 19]. Для проведения экспериментов выбран ЭИ из меди М1 ГОСТ 859–2001. Заготовка выполнена из ПКМ марки ВКУ-39. Заготовка подвергалась обработке на копировально-прошивном электроэрозионном станке Smart CNC при постоянном напряжении $U = 50$ В, времени включения импульса $T_{on} = 100$ мкс и силе тока: $I = 10$ А [4, 5, 19].

Для теоретического моделирования потока использовалось программное обеспечение ANSYS CFX 20.1. Для вычисления основных направлений потока и распределения скорости в межэлектродном зазоре выбрано трансформаторное масло (Engineer oil). Температура масла задана стандартная, равная 25° . Для всех случаев давление равно $2,1 \text{ кг/см}^2 = 0,205 \text{ МПа}$. Моделирование распределения потоков проводилось при трех значениях глубины обработки (2, 10, 15 мм), а также при трех значениях угла наклона форсунок (15° , 45° , 75°), см. рис. 2–4.

Целью моделирования является получение теоретической модели распределения потоков рабочей жидкости в зоне обработки при усло-

вии изменения угла подачи промывки. Для достижения заданной в работе цели необходимо: построить геометрию расчетной области, задать граничные условия расчетной модели, произвести расчет модели для глубины обработки 2, 10, 15 мм и расположением форсунок 15° , 45° и 75° относительно оси инструмента (рис. 5).

Как показала экспериментальная часть, проведенная в работах [4–6], изделия из ПКМ в процессе КПЭЭО склонны к наплавлению шлама на обработанную поверхность. Это связано с нерациональным расположением форсунок промывки и образованием завихрений в зоне обработки.

Моделирование выполняется после задания имен граничных поверхностей: стенок детали, ЭИ и форсунок промывки. Для обработки 10 и 15 мм ограничения геометрии схожи, однако меняется только угол расположения форсунок (рис. 6).

С целью задания условий для форсунок промывки в каталоге Ansys CFXPRE выбрана рабочая жидкость – трансформаторное масло (Engineer oil). Температура масла задана стандартная, равная 25° .

На рис. 7 представлена расчетная сетка. Для построения сетки задаем минимальное и максимальное значение единичного воксела: min – 1 мм, max – 5 мм. Идентично делаем и для остальных расчетных случаев. При моделировании принято, что форсунки будут работать

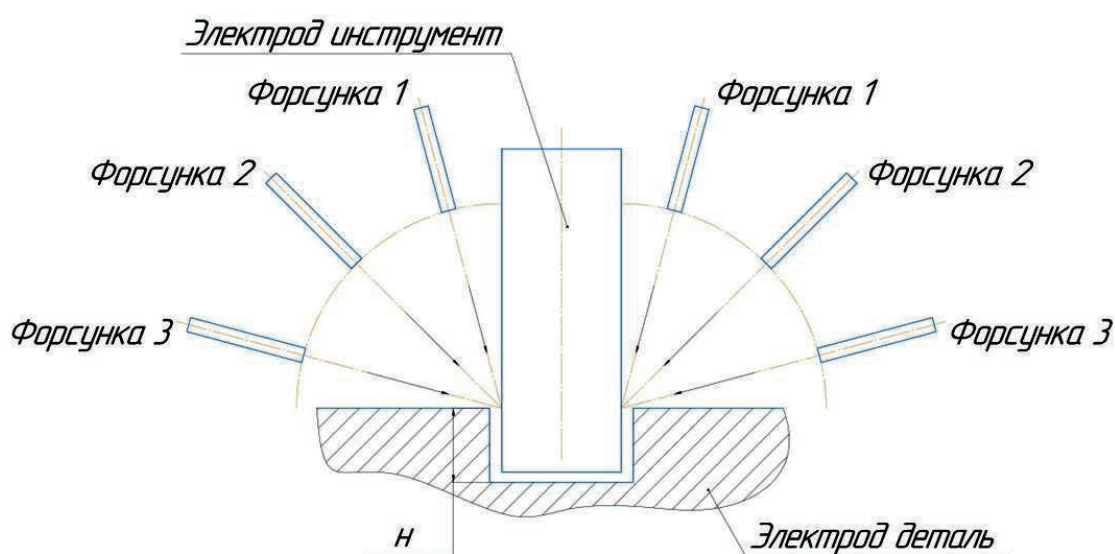


Рис. 5. Модель обработки, где H – глубина обработки

Fig. 5. Processing model, where H is the depth of processing

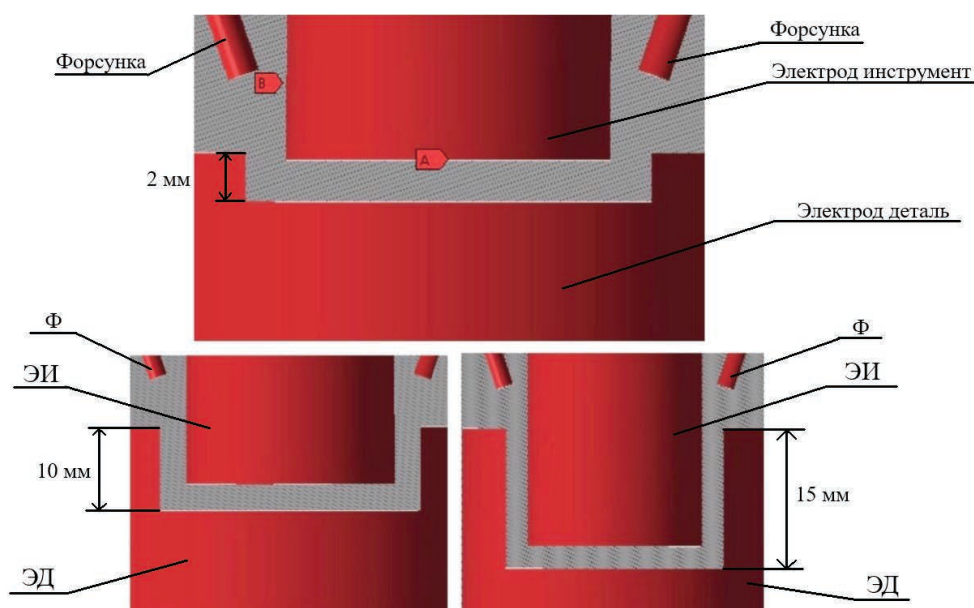


Рис. 6. Задание геометрических ограничений

Fig. 6. Processing model, where H is the depth of processing

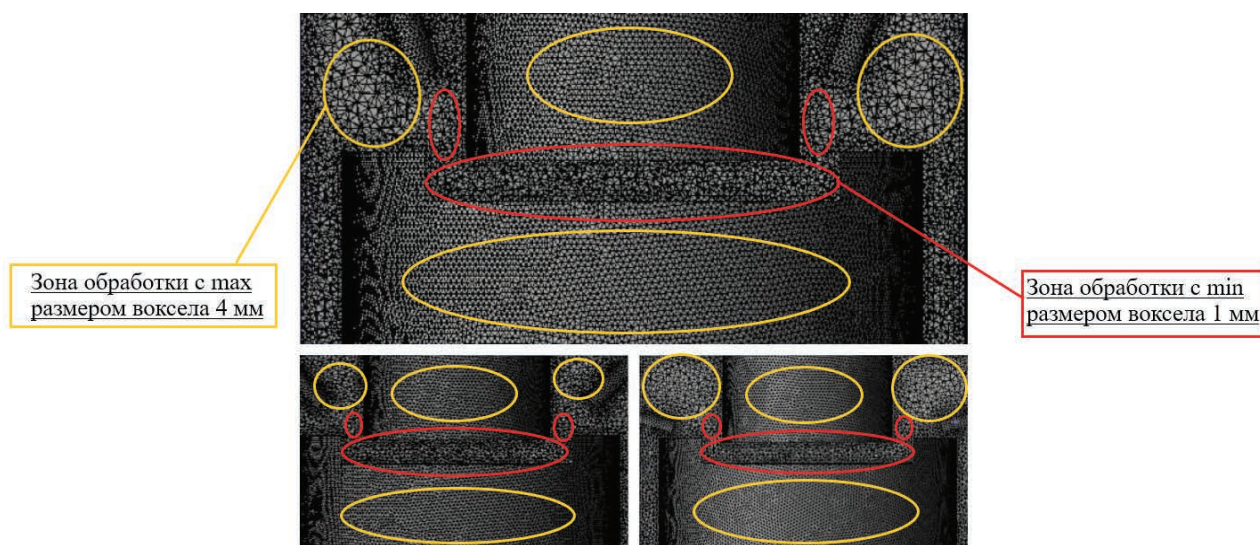


Рис. 7. Модель сетки для расчета

Fig. 7. Mesh model for calculation

с одинаковым давлением и углом расположения относительно оси инструмента. Для всех случаев давление идентично и равно $2,1 \text{ кг/см}^2 = 0,205 \text{ МПа}$.

Показано, что в области обработки и в граничных областях сетка приняла минимальные значения, что увеличит точность моделирования. Однофазный поток рабочей жидкости масла моделируется с использованием стандартной модели турбулентности (рис. 8).

Геометрические данные потока масла собираются с помощью увеличенного изображения поперечного сечения электрода и упрощаются для уменьшения времени вычислений. Количество элементов тетраэдрической сетки варьируется от 7,8 до 6,4 млн элементов в отверстии заготовки соответственно геометрии объемного потока из-за небольших геометрических особенностей внутри зоны обработки. Расчеты проводятся в модуле Ansys Fluid Flow.

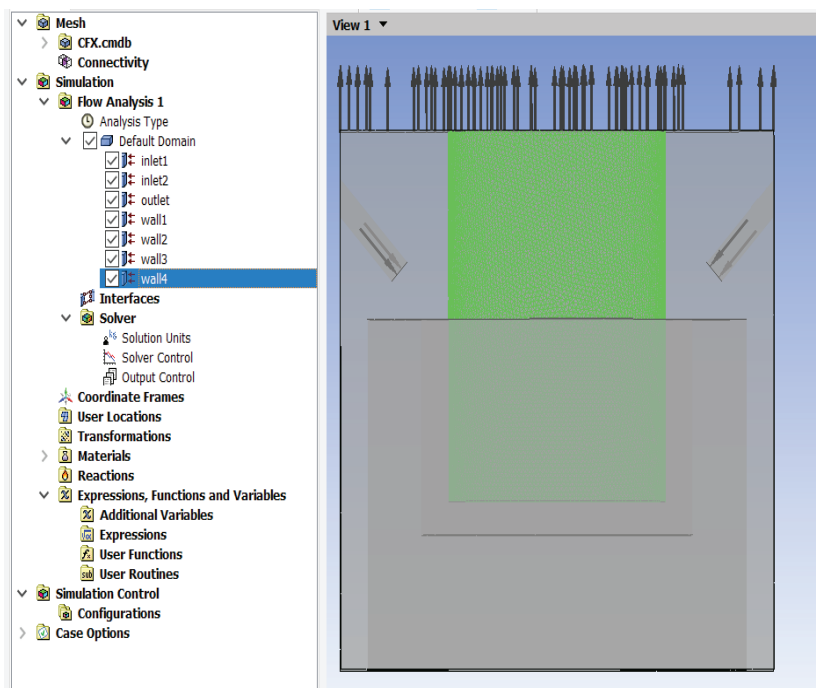


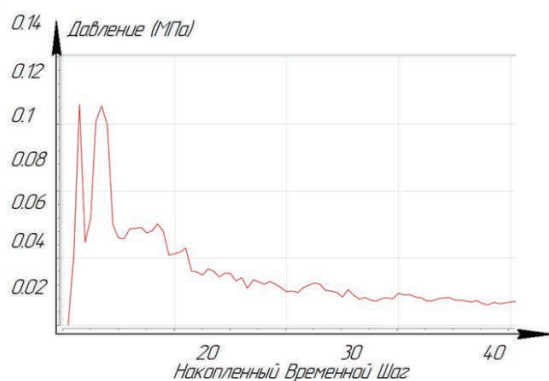
Рис. 8. Дерево построения расчета с конечной моделью модуля CFXPRE

Fig. 8. Calculation construction tree with the final model of the CFXPRE module

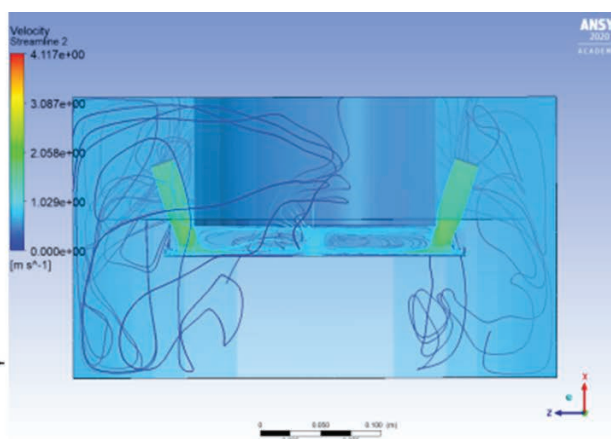
Результаты их обсуждение

На основе полученных данных установлено, что при обработке образца из ПКМ на глубину 2 мм влияние угла расположения форсунок на эффективность промывки не является существенным. На рис. 9–11 показано, что преобладает ламинарное течение жидкости.

При глубине обработки 10 мм установлено, что для форсунки, расположенной под углом 15° , преобладает ламинарное движение рабочей жидкости. Турбулентность образуется в зоне обработки, где сталкиваются потоки двух форсунок. Отмечено, что для форсунок, расположенных под углами 45° и 75° , турбулентность образуется в межэлектродном зазоре и влечет



а



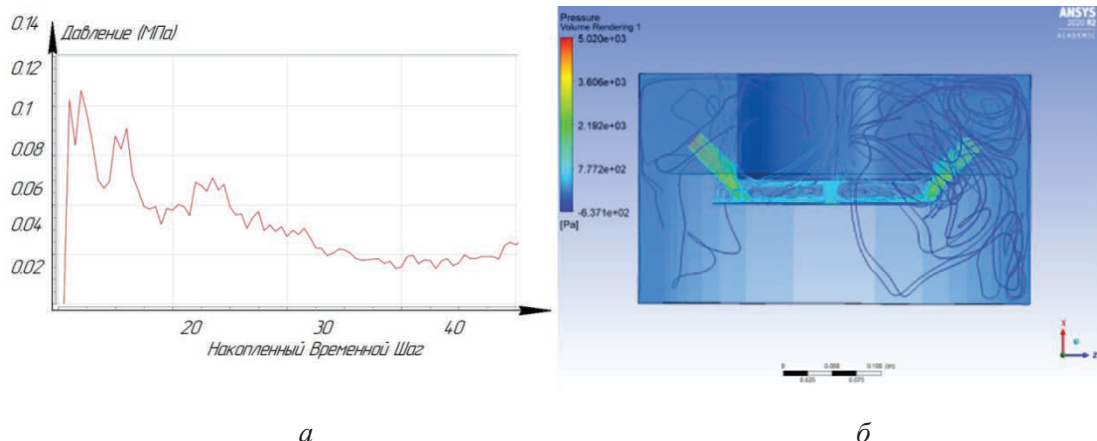
б

Рис. 9. Глубина 2 мм, угол расположения форсунок 15° :

а – расчет давления рабочей жидкости; б – модели распределения потоков

Fig. 9. Depth 2 mm, nozzle angle 15° :

а – calculation of the pressure of the working fluid; б – flow distribution models



а

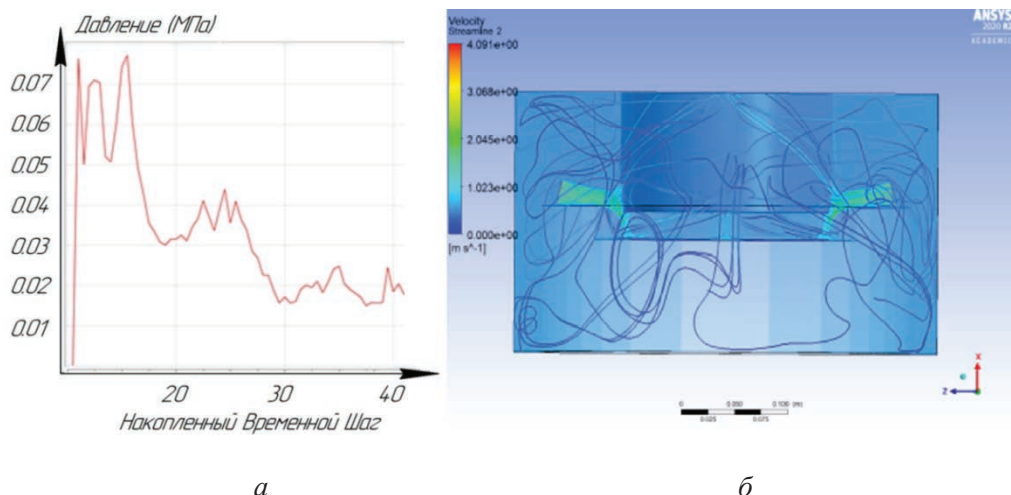
б

Рис. 10. Глубина 2 мм, угол расположения форсунок 45°:

а – расчет давления рабочей жидкости; б – модели распределения потоков

Fig. 10. Depth 2 mm, nozzle angle 45°:

а – calculation of the pressure of the working fluid; б – flow distribution models



а

б

Рис. 11. Глубина 2 мм, угол расположения форсунок 75°:

а – расчет давления рабочей жидкости; б – модели распределения потоков

Fig. 11. Depth 2 mm, nozzle angle 75°:

а – calculation of the pressure of the working fluid; б – flow distribution models

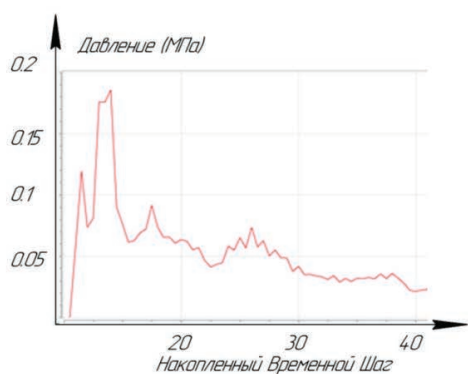
за собой незначительное снижение давления. Вывод шлама из зоны обработки затруднен (рис. 12–14).

На рис. 15–17 показано, что при глубине обработки 15 мм для форсунки, расположенной под углом 15°, ламинарное движение резко переходит в турбулентное. В зоне обработки, где сталкиваются потоки двух форсунок, полностью преобладает турбулентное движение. Установлено, что при обработке отверстий данной глубины и выше расположение форсунок под углом 45 и 75° относительно оси инструмента нецелесообразно в связи с высокой турбулентностью

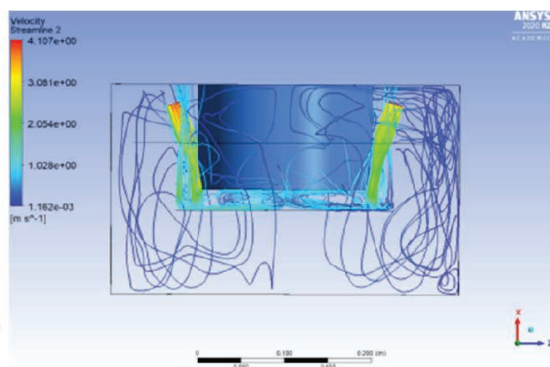
потока и потерей давления трансформаторного масла в зоне обработки (рис. 15–17).

Из представленных рисунков можно сделать вывод, что при расположении форсунок под углом 45 и 75° преобладает турбулентное движение, которое влечет за собой снижение давления. Значение давления для форсунки в 75° не превысило 0,07 МПа, в то время как форсунка в 15° обеспечила рациональное давление в зоне обработки от 0,1 до 0,2 МПа.

Показано, что расположение форсунки под углом 75° для обработки отверстий глубже 10 мм уменьшает давление в зоне обработки в два раза.



а



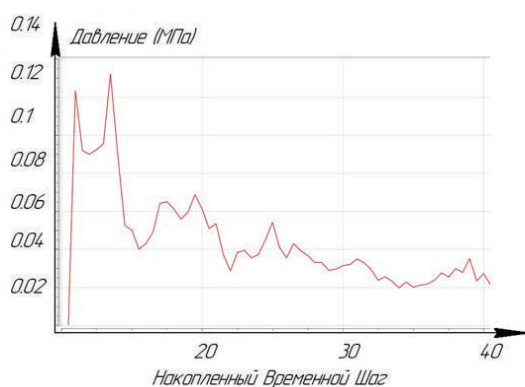
б

Рис. 12. Глубина 10 мм, угол расположения форсунок 15°:

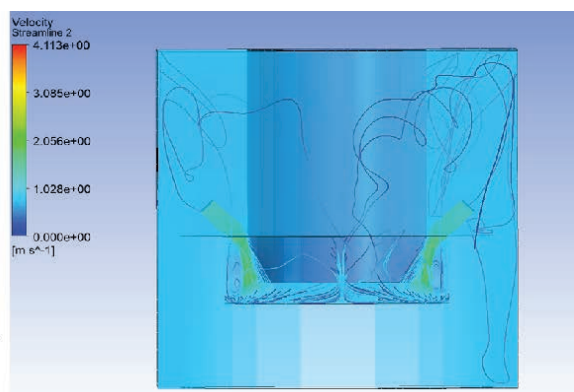
а – расчет давления рабочей жидкости; б – модели распределения потоков

Fig. 12. Depth 10 mm, nozzle angle 15°:

а – calculation of the pressure of the working fluid; б – flow distribution models



а



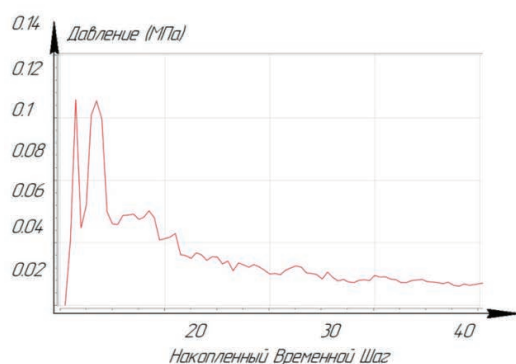
б

Рис. 13. Глубина 10 мм, угол расположения форсунок 45°:

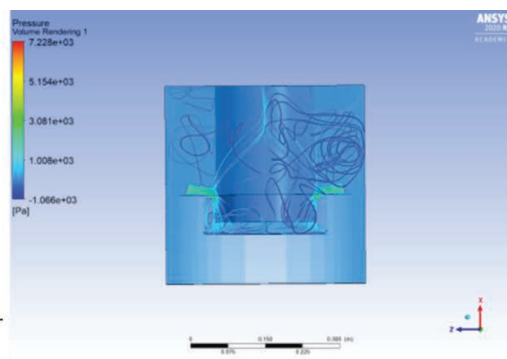
а – расчет давления рабочей жидкости; б – модели распределения потоков

Fig. 13. Depth 10 mm, nozzle angle 45°:

а – calculation of the pressure of the working fluid; б – flow distribution models



а



б

Рис. 14. Глубина 10 мм, угол расположения форсунок 75°:

а – расчет давления рабочей жидкости; б – модели распределения потоков

Fig. 14. Depth 10 mm, nozzle angle 75°:

а – calculation of the pressure of the working fluid; б – flow distribution models

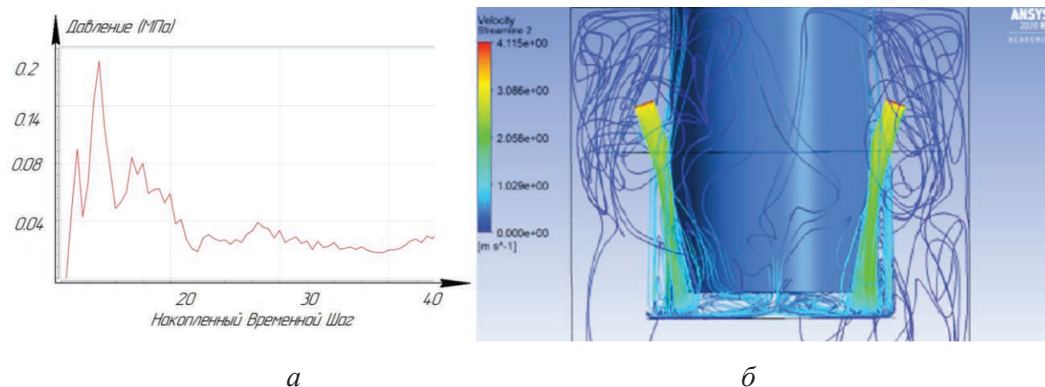

a
б

Рис. 15. Глубина 15 мм, угол расположения форсунок 15°:

a – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 15. Depth 15 mm, nozzle angle 15°:

a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models

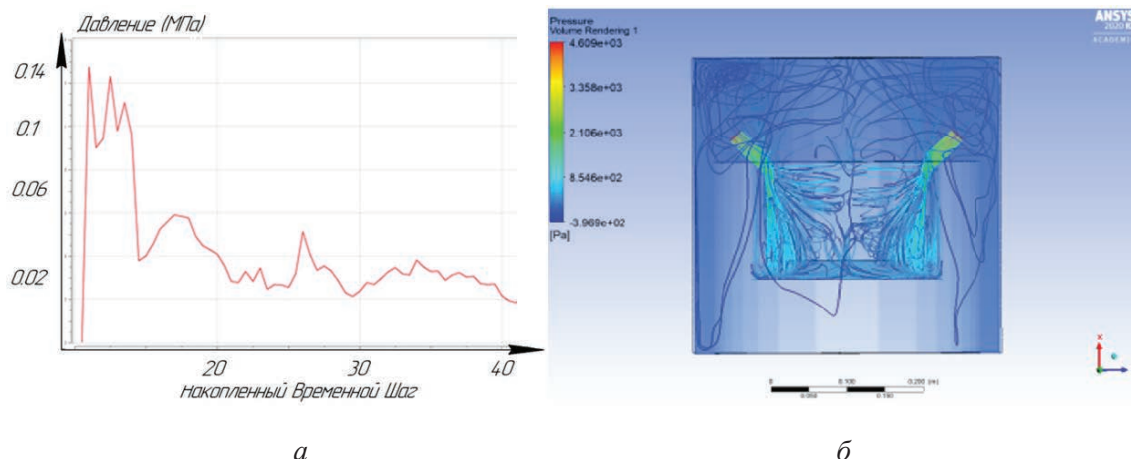

a
б

Рис. 16. Глубина 15 мм, угол расположения форсунок 45°:

a – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 16. Depth 15 mm, nozzle angle 45°:

a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models

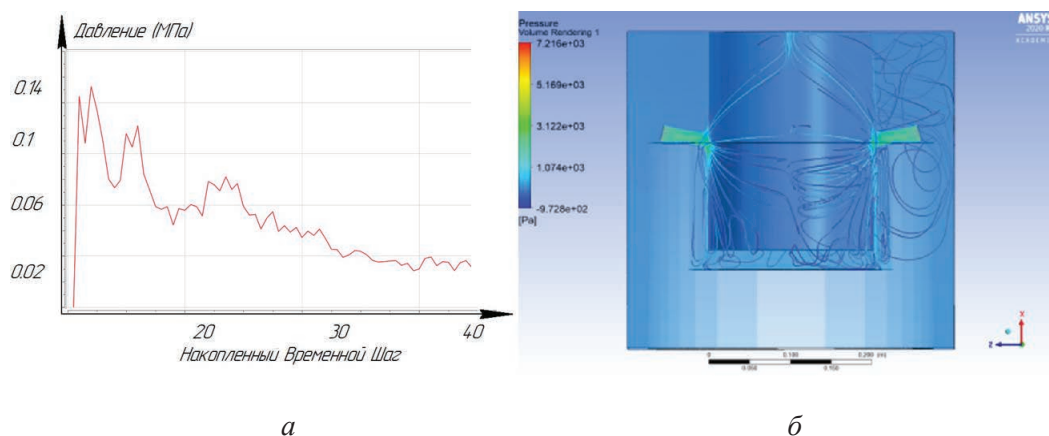

a
б

Рис. 17. Глубина 15 мм, угол расположения форсунок 75°:

a – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 17. Depth 15 mm, nozzle angle 75°:

a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models

Для обработки отверстий глубже 15 мм расположение форсунок под углом 75° критически влияет на давление, скорость рабочей жидкости и эвакуации эродированных частиц из зоны обработки, что негативно сказывается на производительности.

Для уточнения теоретического моделирования проведены экспериментальные исследования по измерению производительности КПЭЭО изделий из ПКМ (рис. 18).

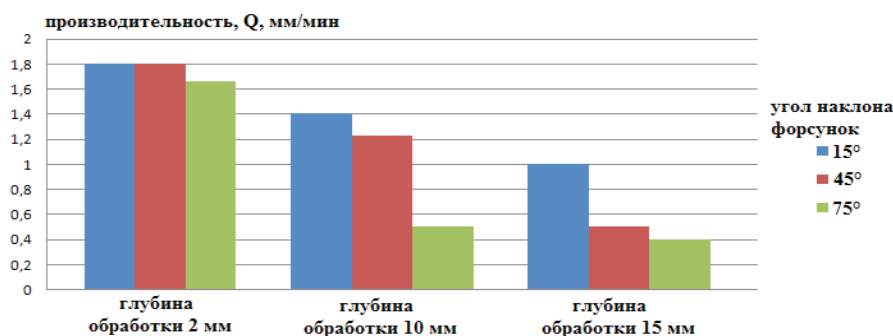


Рис. 18. Значения величины производительности

Fig. 18. Performance values

Показано, что при обработке отверстий глубиной 2 мм значение угла наклона форсунки промывки не влияет на производительность ЭЭО.

Эффект влияния угла наклона форсунок проявляется при КПЭЭО на глубину 10 и 15 мм. Наблюдается снижение величины значения производительности процесса КПЭЭО в связи с затруднением промывки межэлектродного пространства от шлама. Отмечено, что для обработки отверстий глубиной 10 мм и более стоит учитывать угол наклона форсунки промывки, а для эффективной обработки из зазора необходимо удалить эродированные частицы. В процессе проведения экспериментального исследования при обработке отверстий глубиной 15 мм наблюдались налипания шлама на ЭИ, а также замыкание процесса КПЭЭО, возникновение вторичных разрядов в зоне обработки, что вызывало остановку процесса обработки. Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты теоретического моделирования.

Выводы

1. Получена теоретическая модель, описывающая процесс промывки зоны КПЭЭО для различной глубины обработки и расположения форсунок подачи рабочей жидкости.

2. Установлено, что при глубине обработки 2 мм расположение форсунок не влияет на качество промывки и производительность КПЭЭО ПКМ ВКУ-39. Преобладает ламинарное течение жидкости.

3. Показано, что при КПЭЭО ПКМ ВКУ-39 на глубину 10 и 15 мм расположение форсунок влияет на качество промывки и производительность КПЭЭО ПКМ ВКУ-39. Наибольшее значение производительности достигается при

расположении форсунок под углом 15° . Для обработки отверстий глубиной 10 мм и более стоит учитывать угол наклона форсунки промывки. Для эффективной обработки из зоны обработки необходимо удалять эродированные частицы. При обработке под углом 45° и 75° возникает турбулентное течение жидкости, а также вероятность вторичных разрядов. Экспериментально подтверждено нали-

пание шлама на поверхности ЭИ и возникновение замыкания и, как следствие, нестабильности процесса КПЭЭО изделий из ПКМ ВКУ-39. Для обработки отверстий глубиной 15 мм расположение форсунок под углом 75° критически влияет на давление, скорость рабочей жидкости и эвакуацию эродированных частиц из зоны обработки, что негативно сказывается на производительности.

4. Проведенные экспериментальные исследования показывают работоспособность полученной теоретической модели. Установлено, что при обработке глухих отверстий глубиной порядка 15 мм необходимо устанавливать угол форсунки на величину 15° . При данном расположении форсунок значение давления жидкости и вывод шлама являются стабильными, обеспечивается наибольшая производительность при КПЭЭО глубоких отверстий в изделиях, выполненных из ПКМ ВКУ-39.

Список литературы

1. Sarde B., Patil Y.D. Recent research status on polymer composite used in concrete – An overview // Materials Today Proceedings. – 2019. – Vol. 18. – P. 3780–3790. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.316.

2. Mechanical performance of woven kenaf-Kevlar hybrid composites / R. Yahaya, S.M. Sapuan, M. Jawaid, Z. Leman, E.S. Zainudin // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2014. – Vol. 33 (24). – P. 2242–2254. – DOI: 10.1177/0731684414559864.
3. Thomason J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings // *Polymer Testing*. – 2020. – Vol. 85. – P. 106421. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106421.
4. Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Oglezneva S.A. Electrical discharge machining of polymer composites // *Russian Engineering Research*. – 2020. – Vol. 40. – P. 878–879. – DOI: 10.3103/S1068798X20100275.
5. Electric-discharge machining of polymer composites / T.R. Ablyaz, K.R. Muratov, E.S. Shlykov, G.S. Shipunov, T.V. Shakirzyanov // *Russian Engineering Research*. – 2019. – Vol. 39. – P. 898–900. – DOI: 10.3103/S1068798X19100058.
6. Analysis of wire-cut electro discharge machining of polymer composite materials / T.R. Ablyaz, E.S. Shlykov, K.R. Muratov, S.S. Sidhu // *Micromachines*. – 2021. – Vol. 12 (5). – P. 571. – DOI: 10.3390/mi12050571.
7. Yilmaz O., Okka M.A. Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 51. – P. 185–194. – DOI: 10.1007/s00170-010-2625-3.
8. Bozdana A.T., Ulutas T. The effectiveness of multichannel electrodes on drilling blind holes on Inconel 718 by EDM process // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 31. – P. 504–513. – DOI: 10.1080/10426914.2015.1059451.
9. Haas P., Pontelandolfo P., Perez R. Particle hydrodynamics of the electrical discharge machining process. Pt. 1: Physical considerations and wire EDM process improvement // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 6. P. 41–46. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.006.
10. Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf / A. Okada, Y. Uno, S. Onoda, S. Habib // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2009. – Vol. 58. – P. 209–212. – DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.003.
11. Takino H., Han F. Cutting of polished single-crystal silicon by wire electrical discharge machining using anti-electrolysis pulse generator // *Proceedings of the 14th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*. – Dubrovnik, Croatia, 2014. – Vol. 2. – P. 59–62.
12. Wang J., Han F. Simulation model of debris and bubble movement in consecutive-pulse discharge of electrical discharge machining // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2014. – Vol. 77. – P. 56–65. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.10.007
13. Schumacher B.M. About the role of debris in the gap during electrical discharge machining // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1990. – Vol. 39. – P. 197–199. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61034-8.
14. Su J.C., Kao J.Y., Tang Y.S. Optimisation of the electrical discharge machining process using a GA-based neural network // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2004. – Vol. 24. – P. 81–90. – DOI: 10.1007/s00170-003-1729-4.
15. Investigation of the scaling effects in meso-micro EDM / U. Maradia, K. Wegener, J. Stirnimann, R. Knaak, M. Boccadoro // *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. – San Diego, 2013. – Vol. 2B. – P. 63160. – DOI: 10.1115/IMECE2013-63160.
16. A new electrode sidewall insulation method in electrochemical drilling / J. Wang, W. Chen, F. Gao, F. Han // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 75. – P. 21–32. – DOI: 10.1007/s00170-014-6131-x.
17. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow field in discharge gap of high-speed small hole EDM drilling / Y.Q. Wang, M.R. Cao, S.Q. Yang, W.H. Li // *Advanced Materials Research*. – 2008. – Vol. 53–54. – P. 409–414. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.53-54.409.
18. Kliuev M., Baumgart C., Wegener K. Fluid dynamics in electrode flushing channel and electrode-workpiece gap during EDM drilling // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 68. – P. 254–259. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.058.
19. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R. Improving the efficiency of electrical discharge machining of special-purpose products with composite electrode tools // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – P. 6105. – DOI: 10.3390/ma14206105.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

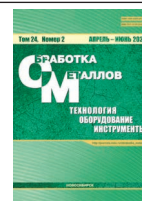
© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Theoretical simulation of the process interelectrode space flushing during copy-piercing EDM of products made of polymer composite materials

Evgeniy Shlykov^{a, *}, Timur Ablyaz^b, Karim Muratov^c

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>, Kruspert@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>, lowrider11-13-11@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>, Karimur_80@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 31 March 2022

Revised: 06 April 2022

Accepted: 12 April 2022

Available online: 15 June 2022

Keywords:

Polymer composite materials
 Copy-piercing electrical discharge machining
 Flushing
 Sludge

Funding

The work was supported by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of sciences No. MK-566.2021.4.

Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

ABSTRACT

Introduction. Polymer composite materials (*PCM*) are used to improve the mechanical properties and increase the working period of products. For the processing of products made of *PCM*, the use of electrophysical processing methods is standard. One of these methods is copy-piercing electrical discharge machining (*EDM*). The use of such methods for processing *PCM* is due to its high physical and mechanical characteristics and the complexity of processing by blade methods. Considering the fact that the *PCM* element is a binder – epoxy resin, which is destroyed at the edges of the resulting holes and grooves during *EDM*, *PCM* can be considered difficult to process. During the *EDM* of holes in *PCM* products, the temperature rises, and inefficient cooling often occurs in the processing zone. The paper is devoted to theoretical simulation in the *Ansys* package, which makes it possible to evaluate the impact of flushing method on the efficiency of the *EDM* of *PCM* products based on numerical simulation in finite element analysis software systems. The aim of the work is to increase the productivity of the processes of *EDM* for *PCM* products. **Methods.** Experimental studies were carried out according to the method of a classical experiment on a copy-piercing electrical discharge *Smart CNC* machine. The workpiece was processed at a constant voltage $U = 50$ V, pulse on-time $T_{on} = 100$ μ s and current: $I = 10$ A. For theoretical simulation of the flow, the *ANSYS CFX 20.1* software was used. Flow distribution simulation was carried out at three processing depths (2, 10, 15 mm), as well as at three nozzle inclination angles (15, 45, 75°). **Results And Discussion.** The analysis of the data obtained showed that in the case of the *EDM* of *PCM*, the angle of the location of the flushing nozzles should be taken into account in order to increase the productivity of processing deep, blind holes. It is established that the highest performance value is achieved when the nozzles are located at an angle of 15°. The laminar motion prevails. With this arrangement of the nozzles, the value of the liquid pressure and the removal of the sludge are stable both with the *EDM* of *PCM* to a depth of 2 mm, and when processing to a depth of 15 mm. It is noted that for processing holes with a depth of 10 mm or more, it is worth considering the angle of inclination of the flushing nozzle for effective processing, it is necessary to remove eroded particles from the gap. In the process of conducting an experimental study, when processing holes with a depth of 15 mm, sticking of sludge to the electrode-tool was observed, as well as the closure of the *EDM* process, the occurrence of secondary discharges in the processing zone, which caused the processing to stop.

For citation: Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Muratov K.R. Theoretical simulation of the process interelectrode space flushing during copy-piercing EDM of products made of polymer composite materials. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 25–38. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-25-38. (In Russian).

References

1. Sarde B., Patil Y.D. Recent research status on polymer composite used in concrete – An overview. *Materials Today Proceedings*, 2019, vol. 18, pp. 3780–3790. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.316.
2. Yahaya R., Sapuan S.M., Jawaid M., Leman Z., Zainudin E.S. Mechanical performance of woven kenaf-Kevlar hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, vol. 33 (24), pp. 2242–2254. DOI: 10.1177/0731684414559864.

* Corresponding author

Shlykov Evgeniy S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Perm National Research Polytechnic University
 29 Komsomolsky prospect
 614990, Perm, Russian Federation
 Tel.: 8 (342) 2-198-324, e-mail: Kruspert@mail.ru

3. Thomason J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings. *Polymer Testing*, 2020, vol. 85, p. 106421. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106421.
4. Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Oglezneva S.A. Electrical discharge machining of polymer composites. *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40, pp. 878–879. DOI: 10.3103/S1068798X20100275.
5. Ablyaz T.R., Muratov K.R., Shlykov E.S., Shipunov G.S., Shakirzyanov T.V. Electric-discharge machining of polymer composites. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, pp. 898–900. DOI: 10.3103/S1068798X19100058.
6. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Sidhu S.S. Analysis of wire-cut electro discharge machining of polymer composite materials. *Micromachines*, 2021, vol. 12 (5), p. 571. DOI: 10.3390/mi12050571.
7. Yilmaz O., Okka M.A. Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 51, pp. 185–194. DOI: 10.1007/s00170-010-2625-3.
8. Bozdana A.T., Ulutas T. The effectiveness of multichannel electrodes on drilling blind holes on Inconel 718 by EDM process. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, vol. 31, pp. 504–513. DOI: 10.1080/10426914.2015.1059451.
9. Haas P., Pontelandolfo P., Perez R. Particle hydrodynamics of the electrical discharge machining process. Pt. 1: Physical considerations and wire EDM process improvement. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 6, pp. 41–46. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.006.
10. Okada A., Uno Y., Onoda S., Habib S. Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58, pp. 209–212. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.003.
11. Takino H., Han F. Cutting of polished single-crystal silicon by wire electrical discharge machining using anti-electrolysis pulse generator. *Proceedings of the 14th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, Dubrovnik, Croatia, 2014, vol. 2, pp. 59–62.
12. Wang J., Han F. Simulation model of debris and bubble movement in consecutive-pulse discharge of electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, vol. 77, pp. 56–65. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.10.007.
13. Schumacher B.M. About the role of debris in the gap during electrical discharge machining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1990, vol. 39, pp. 197–199. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61034-8.
14. Su J.C., Kao J.Y., Tang Y.S. Optimisation of the electrical discharge machining process using a GA-based neural network. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, vol. 24, pp. 81–90. DOI: 10.1007/s00170-003-1729-4.
15. Maradia U., Wegener K., Stirnimann J., Knaak R., Boccadoro M. Investigation of the scaling effects in meso-micro EDM. *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Diego, 2013, vol. 2B, p. 63160. DOI: 10.1115/IMECE2013-63160.
16. Wang J., Chen W., Gao F., Han F. A new electrode sidewall insulation method in electrochemical drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 21–32. DOI: 10.1007/s00170-014-6131-x.
17. Wang Y.Q., Cao M.R., Yang S.Q., Li W.H. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow field in discharge gap of high-speed small hole EDM drilling. *Advanced Materials Research*, 2008, vol. 53–54, pp. 409–414. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.53-54.409.
18. Kliuev M., Baumgart C., Wegener K. Fluid dynamics in electrode flushing channel and electrode-workpiece gap during EDM drilling. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 68, pp. 254–259. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.058.
19. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R. Improving the efficiency of electrical discharge machining of special-purpose products with composite electrode tools. *Materials*, 2021, vol. 14, p. 6105. DOI: 10.3390/ma14206105.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).