



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9.048.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-102-114

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОКАЧКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В ХОДЕ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Федоров А.А., Бредгауэр Ю.О., Полонянкин Д.А., Гаранин Д.В., Бобков Н.В., Осташ С.В.

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Аннотация. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПВЭЭО) широко применяется в машиностроении, однако обрывы проволочного электрода-инструмента остаются в настоящее время одной из ключевых проблем, снижающих эффективность процесса. Исследование гидродинамики диэлектрической жидкости в рабочем зазоре позволяет выявить критические режимы обработки и минимизировать вероятность обрывов. Недостаточность сведений о месте образования мостика сварки и его влиянии на возникновение короткого замыкания и обрывы проволоки, а также противоречивость данных об условиях стабильной прокачки диэлектрической жидкости обуславливают актуальность данного исследования. Целью работы является экспериментальное исследование потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО для определения зон возникновения «мостика сварки» и предотвращения обрывов электрода-инструмента. Методом вычислительной гидродинамики выполнено компьютерное моделирование потоков жидкости с последующими макетными и натурными экспериментами на станке Sodick VZ 300L. Научная новизна работы заключается в установлении области столкновения встречных потоков диэлектрической жидкости в рабочем зазоре при ПВЭЭО, расположенной на 5% ниже геометрической полувысоты детали, подвергнутой обработке в режиме «CLOSE». На основе результатов моделирования предложена гипотеза о локализации области формирования «мостика сварки», приводящего к обрыву проволоки. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности оптимизации системы подачи диэлектрической жидкости в межэлектродный зазор, снижении вероятности обрывов проволоки и повышении производительности ПВЭЭО. С учетом полученных результатов представляет интерес моделирование условий удаления частиц шлама из межэлектродного промежутка при различных режимах промывки межэлектродного зазора (отключение одного из сопел, увеличение/уменьшение давления промывки для предотвращения образования «рециркуляционной зоны»). Альтернативным направлением развития дальнейших исследований является разработка алгоритмов адаптивного управления параметрами прокачки в реальном времени.

Ключевые слова: проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, обрыв проволоки, мостик сварки, прокачка жидкости, моделирование потоков жидкости, короткое замыкание

© Федоров А.А., Бредгауэр Ю.О., Полонянкин Д.А., Гаранин Д.В., Бобков Н.В., Осташ С.В., 2026

Для цитирования

Имитационное моделирование и экспериментальное исследование прокачки диэлектрической жидкости в ходе проволочно-вырезной электроэрозионной обработки / Федоров А.А., Бредгауэр Ю.О., Полонянкин Д.А., Гаранин Д.В., Бобков Н.В., Осташ С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 102-114. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-102-114>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF DIELECTRIC FLUID FLUSHING DURING WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Fedorov A.A., Bredgauer Iu.O., Polonyankin D.A., Garanin D.V., Bobkov N.V., Ostash S.V.

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. Wire electrical discharge machining (WEDM) is widely used in mechanical engineering; however, wire electrode breakage remains one of the key issues reducing process efficiency. Study of the hydrodynamics of the dielectric fluid in the machining gap makes it possible to identify critical machining conditions and minimize the probability of wire breakage. The lack of information regarding the location of weld bridge formation and its influence on short circuits and wire breakage, as well as contradictory data concerning the conditions required for stable dielectric fluid flushing, determine the relevance of this study. The aim of this work is to experimentally study dielectric fluid flows during WEDM in order to identify the regions where a “weld bridge” is formed and to prevent wire electrode breakage. Computational fluid dynamics has been employed to model fluid flows, followed by laboratory-scale and full-scale experiments conducted on a Sodick VZ300L machine tool. The scientific novelty of the study lies in identifying the region where opposing dielectric fluid flows collide within the machining gap during WEDM in the “CLOSE” mode. This region is located approximately 5% below the geometric mid-height of the workpiece. Based on the simulation results, a hypothesis is proposed regarding the localization of the weld bridge formation zone that leads to wire breakage. The practical relevance of the obtained results lies in the possibility of optimizing the dielectric fluid supply system in the interelectrode gap, reducing the likelihood of wire breakage, and increasing WEDM productivity. Considering the obtained findings, further research should focus on modeling the conditions for debris particle removal from the interelectrode gap under various flushing modes (such as disabling one of the nozzles or increasing/decreasing flushing pressure) to prevent the formation of a recirculation zone. Another promising direction is the development of adaptive real-time control algorithms for dielectric fluid flushing parameters.

Keywords: wire electrical discharge machining (WEDM), wire breakage, weld bridge, dielectric fluid flushing, fluid flow modeling, short circuit

For citation

Fedorov A.A., Bredgauer Iu.O., Polonyankin D.A., Garanin D.V., Bobkov N.V., Ostash S.V. Simulation and Experimental Study of Dielectric Fluid Flushing During Wire Electrical Discharge Machining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 102-114. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-102-114>

Введение

Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПВЭЭО) – высокотехнологичный электрофизический метод, обеспечивающий достижение высокой точности размеров, формы, а также низкой шероховатости поверхностного слоя деталей, в том числе из труднообрабатываемых сталей и сплавов при производстве вырубных матриц, пресс-форм и штамповой оснастки. Ключевыми преимуществами метода ПВЭЭО являются: 1) возможность обработки любых токопроводящих материалов, в том числе труднообрабатываемых лезвийными методами; 2) возможность бездеформационной обработки нетехнологичных конструктивных элементов, таких как узкие щели и прорези, тонкостенные элементы.

Вместе с тем сравнительно невысокая производительность до сих пор является неразрешенной проблемой технологии ПВЭЭО. Одной из главных причин снижения производительности в ходе ПВЭЭО являются обрывы проволоки, обуславливающие повышенное потребление электроэнергии, образование поверхностных дефектов и увеличение продолжительности обработки [1–6].

С момента выпуска первого коммерческого проволочно-вырезного электроэрозионного станка (1967 год) научно-технологическим сообществом предпринимаются попытки предотвращения обрывов проволочного электрода-инструмента, однако до настоящего времени проблема обрывов проволоки полностью не решена. К основным хорошо изученным причинам обрывов проволоки ученые относят совокупное влияние следующих факторов:

- тепловое воздействие разрядных искр и уменьшение сечения проволоки вследствие образования кратеров в ходе плавления и испарения материала на ее поверхности;
- термонапряжения в проволоке и ее механическое растяжение, вызываемое преднатягом;
- локальные нарушения в системе обратной связи (в системе мониторинга межэлектродного зазора).

К наименее изученной причине обрывов проволоки относится короткое замыкание (КЗ) проволочного электрода-инструмента и обрабатываемой детали и, как следствие, выделение большого количества тепла на проволоке и ее плавление [7–10]. В межэлектродном промежутке, величина которого в современных станках составляет от 30 до 50 мкм, нахо-

дятся частицы шлама, образующиеся при плавлении обрабатываемой детали. В подавляющем большинстве случаев частицы шлама обладают сферической формой, а их размеры варьируются от единиц до нескольких десятков микрометров, что является достаточным условием для перекрытия межэлектродного зазора одной или несколькими частицами, и возникновения короткого замыкания (КЗ) [10], обуславливающего обрывы проволоки.

В работах [11-15] рассматриваются особенности образования «мостика сварки» в ходе ЭЗО. В статье [11] упомянут «мостик шлама», который образуется вследствие накопления шлама в межэлектродном зазоре. Авторами статьи [12] сообщается о возникновении дуги между электродами при электроэрозионной обработке мелких отверстий, вызванной скоплением шлама в зазоре, вследствие чего происходит короткое замыкание. Авторы исследования [15] выполнили анализ движения частиц шлама под действием электростатической силы при ПВЭЗО и пришли к выводу, что частицы шлама образуют «мостики» между анодом и катодом во время паузы между импульсами.

В работе [15] установлено, что накопление частиц шлама в межэлектродном промежутке обеспечивает образование «мостика шлама» между электродом-инструментом и поверхностью обрабатываемой детали, перекрывая рабочий зазор, тем самым способствуя возникновению КЗ.

В процессе электроэрозионной обработки концентрация шлама в зазоре снижает производительность [11, 16–18]. По этой причине производители проволочно-вырезных станков оснащают их соплами для промывки межэлектродного зазора и удаления накапливающегося в нем шлама. Прокачка диэлектрической жидкости из верхнего и нижнего сопел должна предотвращать скопление шлама и эффективно удалять его из рабочего зазора. Однако в ходе исследования потоков жидкости с помощью высокоскоростной камеры обнаружено, что за проволокой в геометрическом центре детали возможно возникновение «рециркуляционного потока» [19], который образуется при столкновении потоков из нижнего и верхнего сопел, что также подтверждается методами вычислительной гидродинамики [9]. Аналогичное явление наблюдали и российские ученые в ходе анализа эффективности промывки межэлектродного промежутка при копировально-прошивной электроэрозионной обработке полимерных композиционных материалов. Экспериментальные данные и компьютерное моделирование свидетельствуют о том, что при определенном положении сопел в ходе обработки возникает турбулентное движение потоков, способствующее снижению давления промывки, а также налипанию шлама на электрод-инструмент и возникновению КЗ [20]. Образование «рециркуляционного потока» приводит к столкновению частиц шлама, а также является причиной неэффективной эвакуации частиц шлама из зоны обработки.

Исследование влияния уровня подачи диэлектрической жидкости на обрывы проволоки показало, что при снижении скорости прокачки происходит увеличение амплитуды колебаний проволоки, а также возрастает количество частиц шлама, скопившихся в зазоре, что особенно выражено при врезании электрода-инструмента в заготовку (первые 1–3 мм обработки) и способствует росту числа обрывов проволоки [20].

Как сообщается в работе [2], частота обрывов проволоки в нижней части заготовки выше, чем в верхней. Данный эффект возникает благодаря действию силы тяжести на потоки диэлектрической жидкости и частицы шлама, способствующей более интенсивному движению частиц шлама в нижнем направлении, что повышает вероятность образования их агломератов, «мостика сварки» и, как следствие, возникновения КЗ.

Таким образом, существующие подходы к решению проблемы удаления частиц шлама посредством теоретического и(или) экспериментального исследования условий прокачки диэлектрической жидкости через межэлектродный зазор представлены в литературе весьма ограниченно, кроме того, опубликованные данные обладают отчасти противоречивым характером.

В настоящее время механизм образования «мостика сварки» не изучен детально, в научнотехнической литературе обнаруживаются фрагментарные данные о влиянии частиц шлама и «мостика сварки» на возникновение КЗ и обрывы проволоки, что обуславливает актуальность и практическую значимость данной работы, целью которой является моделирование процесса прокачки диэлектрической жидкости при ПВЭЗО, определение области столкновения потоков и характера течений диэлектрической жидкости в межэлектродном зазоре.

Материалы и методы исследования

Работы по данному исследованию были разделены на три части:

- 1) Компьютерное моделирование потоков диэлектрической жидкости в рабочем промежутке в среде SolidWorks FlowSimulation.
- 2) Макетное моделирование потоков диэлектрической жидкости в рабочем промежутке.
- 3) Проверка полученных данных на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ300L.

1. Компьютерное моделирование потоков диэлектрической жидкости в рабочем промежутке в среде SolidWorks FlowSimulation.

Для компьютерного моделирования были спроектированы 3D-модели заготовки (30×30×80 мм) (рис. 1, а, позиция 1), проволоки диаметром 0,25 мм (рис. 1, а, позиция 2), верхнего и нижнего сопел (рис. 1, а, позиции 3 и 4 соответственно), диаметр выходного канала сопел равен 6 мм, что соответствует паспорту станка. С учетом диаметра проволоки (0,25 мм) и межэлект-

родного зазора (0,05 мм) в заготовке спроектирована прорезь, имитирующая заход проволочного электрода-инструмента (рис. 1, б) при работе станка.

Расположение сопел относительно заготовки регулируется на станке режимами «CLOSE», «OPEN» и «OPEN U» (рис. 2). В данном исследовании расположение сопел относительно заготовки соответствует режиму «CLOSE», так как опыт работы авторов на станке показывает, что обрывы проволоки чаще происходят в этом режиме. Режим «CLOSE» обеспечива-

ет расстояние между обрабатываемой заготовкой и соплами, равное 0,1 мм.

При моделировании была выбрана рабочая жидкость – деионизированная вода, ее плотность составляет 997 кг/м³. Скорость потока диэлектрической жидкости равна 75 м/с (рис. 3), это граничное условие задается в зависимости от площади выпускных отверстий сопел, при этом направление стрелок имитирует направление потоков, они направлены навстречу друг другу, что обеспечивает промывку межэлектродного промежутка.

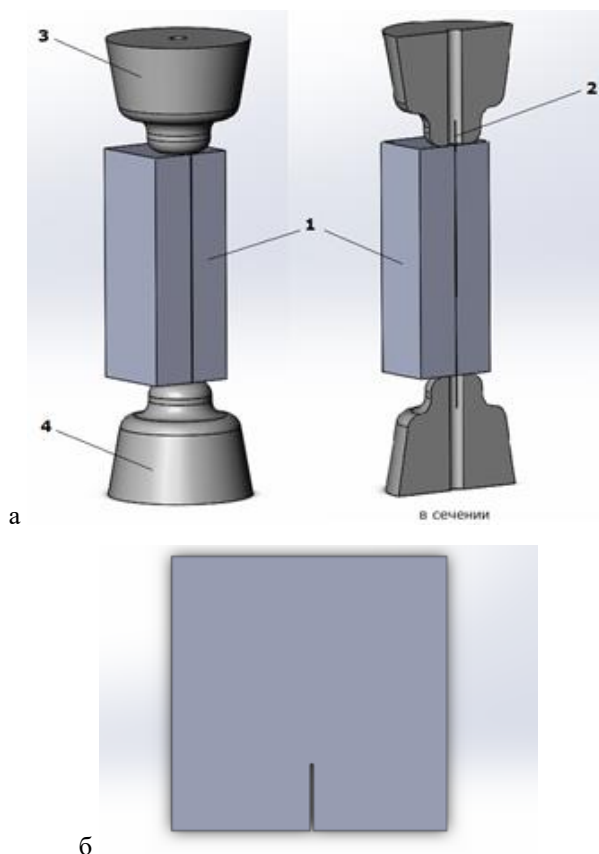


Рис. 1. Спроектированная 3D-модель для компьютерного моделирования (а) и вид заготовки сверху (б):
1 – заготовка; 2 – проволока; 3 – верхнее сопло; 4 – нижнее сопло

Fig. 1. Designed 3D model for computer simulation (a) and (б) top view of the workpiece:
1 is workpiece; 2 is wire; 3 is upper nozzle; 4 is lower nozzle



Рис. 2. Схематичное расположение сопел при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке:
а – в режиме «OPEN U»; б – в режиме «OPEN»; в – в режиме «CLOSE»

Fig. 2. Schematic diagram of nozzle disposition during WEDM: а is in the "OPEN U" mode;
б is in the "OPEN" mode; в is in the "CLOSE" mode

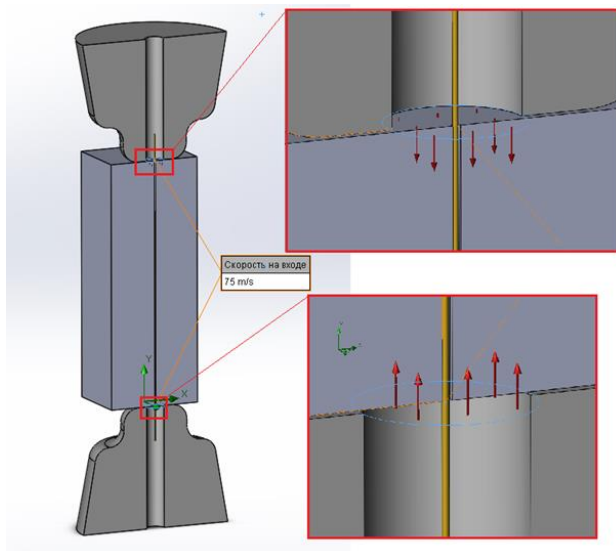


Рис. 3. Задание граничных условий (скорость потока диэлектрической жидкости равна 75 м/с)

Fig. 3. Specification of boundary conditions (the dielectric fluid flow velocity is 75 m/s)

Во время обработки проволоочный электрод-инструмент проматывается через рабочую зону со скоростью 13 м/мин. Процесс обработки обеспечивается перемещением стола по траектории, заданной программой. Для упрощения модели было пренебрежено указанными условиями, так как они незначительно влияют на условия промывки в рабочей зоне.

2. Макетное моделирование потоков диэлектрической жидкости в рабочем промежутке.

Для макетного моделирования потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО был изготовлен экспериментальный стенд (демонстрируется на рис. 4), состоящий из имитатора сопел электроэрозионного станка (рис. 4, а), макета заготовки (30×30×80 мм) из органического стекла с прорезью длиной 15 мм и шириной 0,35 мм в центре, которая имитирует рабочую зону при ПВЭЭО (рис. 4, б), емкости размерами 300×300×300 мм и толщиной стенки 4 мм, выполненной из оргстекла (рис. 4, г), а также силиконовых трубок для подачи жидкости (рис. 4, в, г) и гидростанции с насосом Grundfos (на рисунке не демонстрируется). Макет заготовки был изготовлен из оргстекла для реализации принципиальной возможности наблюдения потоков жидкости во время процесса прокачки. Регистрация потоков диэлектрической жидкости в макете заготовки выполнялась с использованием высокоскоростной камеры Microtron EoSens CL MC1363 (Германия) с частотой кадров 150 fps и разрешением 640×1024 пикселя на дюйм (см. рис. 4, г), при этом камера располагалась рядом с фотобоксом.

Имитатор сопел станка Sodick VZ 300L был изготовлен методом 3D-печати по технологии DLP (Digital Light Processing) на 3D-принтере Anycubic Photon Mono из фотополимерной смолы ELEGOO UV Standart Resin Red с учетом зазоров между соплами и обрабатываемой заготовкой в положении «CLOSE» (закрытая обработка – оба сопла находятся на расстоянии 0,1 мм от заготовки), диаметр сопел составлял 6 мм.

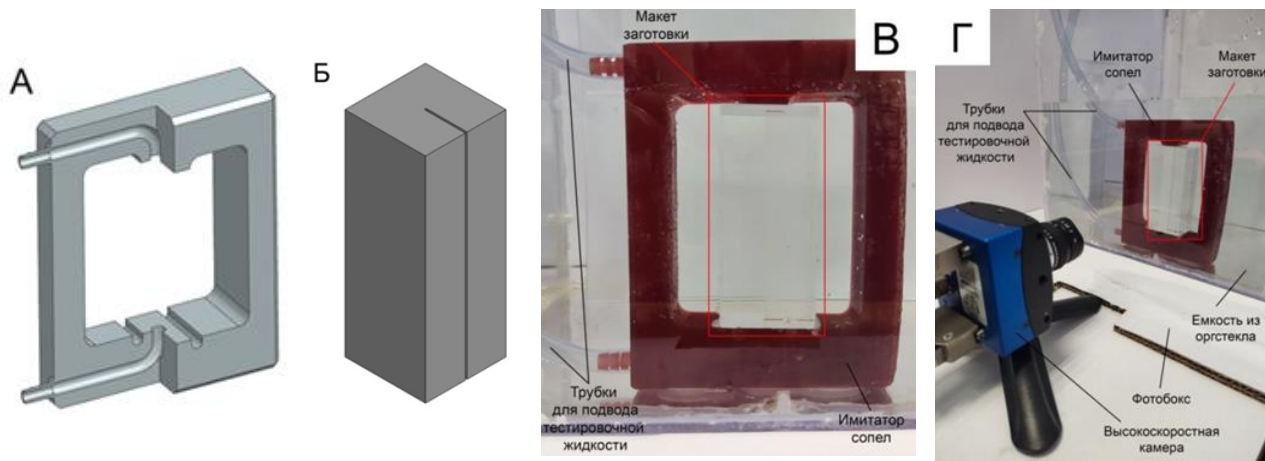


Рис. 4. Стенд для проведения высокоскоростной съемки потоков тестировочной жидкости при прокачке через рабочую зону макета заготовки: а – имитатор сопел станка Sodick VZ300L; б – 3D-модель макета заготовки; в – имитатор сопел с установленным макетом заготовки из оргстекла; г – общий вид стенда – взаимное расположение емкости из оргстекла, имитатора сопел, фотобокса, макета заготовки и высокоскоростной видеокамеры

Fig. 4. Experimental setup for high-speed imaging of the test fluid flow during flushing through the working zone of the workpiece mock-up: а is nozzle simulator of the Sodick VZ300L machine; б is 3D model of the workpiece mock-up; в is nozzle simulator with the installed acrylic workpiece mock-up; г is general view of the setup showing the relative positions of the acrylic tank, nozzle simulator, light box, workpiece mock-up, and high-speed video camera

Для видеорегистрации потоков жидкости в заготовке использовалась подкрашенная перманганатом калия с концентрацией 2 г/л дистиллированная вода (здесь и далее «тестирующая жидкость»), обеспечивающая возможность наглядной визуализации потоков на фоне оптически прозрачной деионизированной воды в условиях достаточного для регистрации высокоскоростной камерой контраста. Фиксация макета заготовки на имитаторе сопел, а также всей полученной конструкции на дне ванны из оргстекла выполнялась с использованием термоклея. Сборка ванны производилась с использованием разведенного в дихлорэтане небольшого количества полилактидной стружки (PLA – Polylactic Acid). После чего ванна заполнялась водой для проверки ее герметичности и последующего выполнения экспериментов.

Далее включалась запись высокоскоростной камеры, а затем кратковременно выполнялась подача тестирующей жидкости через силиконовые трубки, имитатор сопел, за счет чего тестирующая жидкость прокачивалась через рабочую зону макета заготовки с одновременной видеофиксацией процесса прокачки на высокоскоростную камеру.

3. Проверка полученных данных на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ300L.

В третьей части эксперимента полученные на стенде данные верифицировались на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ300L для сопоставления компьютерного и макетного моделирования с обработкой на промышленном оборудовании. В качестве заготовки (материал – сталь 5ХНМ) был использован параллелепипед (рис. 5) размерами 170×30×80 мм (Д×Ш×В), который устанавливался на столе станка и закреплялся стандартными прижимами. В параллелепипеде был изготовлен паз размерами 10×5×80 мм. Выпадающая часть, образованная при изготовлении паза проанализирована в пункте «Результаты макетного моделирования потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО на стенде». Электродом-инструментом являлась латунная проволока диаметром 0,25 мм (Cu – 60%, Zn – 40%). Диэлектрической жидкостью являлась дистиллированная вода. В ходе эксперимента положение сопел находилось в позиции «CLOSE» – оба сопла находились на расстоянии 0,1 мм от заготовки. Схема положения сопел представлена на рис. 2, в.

Действующие значения тока и напряжения, рассчитанные программным обеспечением станка, в

Таблица. Режимы проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на станке Sodick VZ 300L

Table. Wire-cut electrical discharge machining modes on the Sodick VZ 300L machine

ON	OFF	IP	MAO	SV	V	SF	WT	WS	WP	EPA
4,5*	7,5	15	243	21	8	3	12	13	55	0
008**	014	2215		+021,0	8,0	0030	120	130	055	

* В верхней части строки указано фактическое значение каждого параметра: длина импульса (ON), мкс; длина паузы между импульсами (OFF), мкс; максимальный ток (IP), А; критерии стабильности обработки (MAO) – в кодированных значениях; напряжение искрового зазора (SV), В; напряжение источника питания генератора (V), В; верхний предел скорости обработки (SF), мм/мин; усилие преднатяжения проволоки (WT), Н; скорость промотки проволоки (WS), м/мин; частота инвертора прокачки высокого давления (WP), Гц; EPA – упрощенная регулировка мощности.

** В нижней части строки указано зашифрованное кодовое значение со стойки ЧПУ-станка Sodick VZ300L.

процессе ПВЭЭО принудительно не изменялись и фиксировались с использованием встроенных вольтметра и амперметра. Среднее значение тока составило 8,8 А при изменении силы тока в диапазоне от 8,7 до 8,9 А, а среднее значение напряжения составило 24 В, при этом напряжение варьировалось в диапазоне от 22 до 26 В. Остальные параметры обработки приведены в таблице.



Рис. 5. Положение заготовки на столе станка

Fig. 5. Position of the workpiece on the machine table

Полученные результаты и их обсуждение

Общеизвестно, что ухудшение условий прокачки диэлектрической жидкости через МЭП приводит к снижению производительности ПВЭЭО, а также способствует повышению вероятности обрывов проволоки [19]. Другими словами, эффективность удаления шлама из межэлектродного промежутка потоками диэлектрической жидкости оказывает непосредственное влияние на стабильность процесса ПВЭЭО. Однако некоторые исследования зачастую демонстрируют противоречивые результаты [18, 21-22]. Поэтому для получения достоверных результатов с высокой степенью сходимости при моделировании были воспроизведены параметры, технологические режимы и характеристики промышленного оборудования.

1. Результаты компьютерного моделирования потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО.

Результаты 3D-моделирования представлены на рис. 6. Направление потоков диэлектрической жидкости указаны синими стрелками. Можно выделить три основных направления распределения потоков. Часть потоков из нижнего и верхнего сопел, указанные на рис. 6 цифрами 1 и 2, разбиваются о нижнюю и верхнюю поверхности заготовки, так как диаметр сопел (6 мм) значительно превышает размер межэлектродного промежутка (0,05 мм). Этот фактор не позволяет всему объему жидкости проникнуть в рабочую зону. Однако жидкость, попавшая в межэлектродный промежуток, продолжает движение по нему, тем самым обеспечивая промывку рабочей зоны. Движение диэлектрической жидкости вдоль межэлектродного промежутка продолжается до момента столкновения двух потоков, направленных из нижнего и верхнего сопел. По результатам моделирования можно заключить, что столкновение происходит в середине заготовки, так как нижнее и верхнее сопла равноудалены от заготовки и скорость потоков, направленных из них, одинакова.

Часть потока, обозначенная цифрой 3 на рис. 6, выходит из рабочей зоны в направлении, противоположном направлению обработки.

Как известно, при столкновении двух ламинарных потоков возникает интенсивное вихреобразование и турбулентность, поскольку потоки пытаются выров-

нять свои скорости. Поэтому, по нашему предположению, в зоне столкновения потоков, обозначенной красным квадратом на рис. 6, может наблюдаться рециркуляция потоков в связи с резким изменением направления движения жидкости. «Рециркуляционная зона» увеличивает эффективность эвакуации частиц из зоны столкновения потоков, однако может способствовать образованию «эффективных частиц», потенциально приводящих к короткому замыканию [22].

2. Результаты макетного моделирования потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО на стенде.

Для более детального анализа особенностей распространения тестировочной жидкости в межэлектродном промежутке макета-заготовки в различные моменты времени ($t = 19,034 - 19,397$ с) с видеозаписи были сделаны стоп-кадры, наглядно отражающие изменение характера движения потоков тестировочной жидкости (рис. 7). Как видно из рис. 7, все значимые события протекают в течение 0,363 с. Дальнейшее наблюдение потоков тестировочной жидкости становится невозможным в связи с полным заполнением ею межэлектродного промежутка макета-заготовки. Также необходимо пояснить начало появления значимых событий с 19-й секунды эксперимента. Данный временной интервал был необходим для подготовительных работ перед запуском насоса гидростанции, в то время как видеозапись уже была включена.

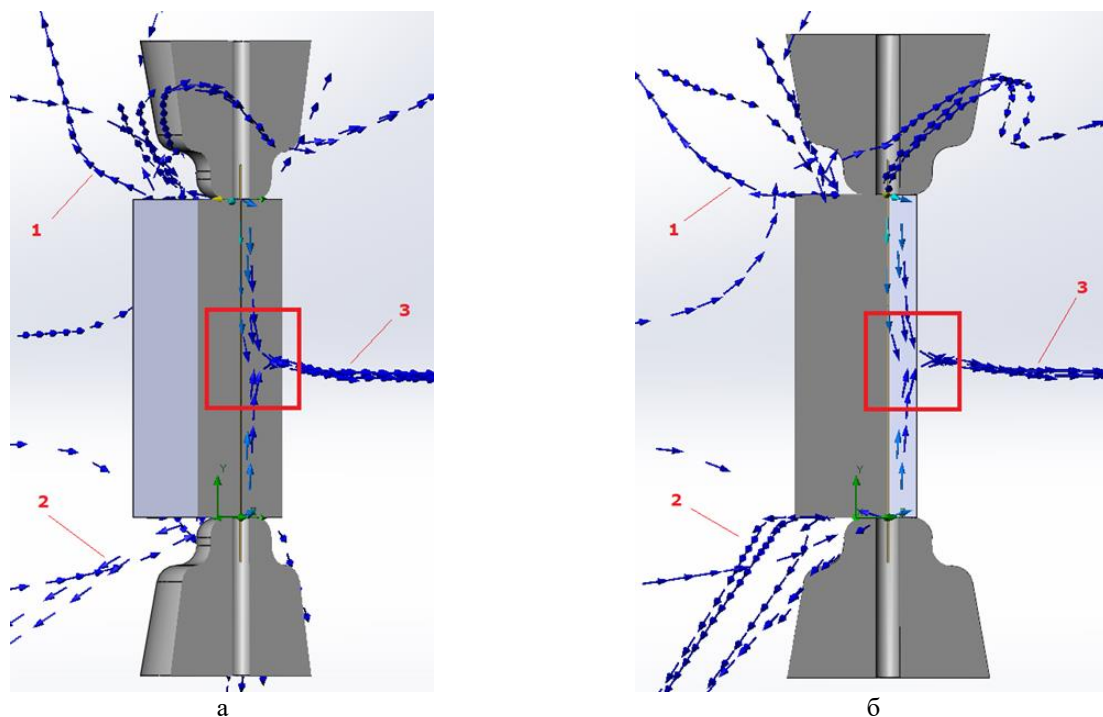


Рис. 6. Результаты 3D-моделирования потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО с помощью ПО SolidWorks FlowSimulation: а – поперечное сечение; б – продольное сечение

Fig. 6. Results of 3D modeling of dielectric fluid flows during WEDM using SolidWorks FlowSimulation software: а is cross section; б is longitudinal section

При анализе первого стоп-кадра с высокоскоростной камеры (рис. 7, а) наблюдаются два потока тестировочной жидкости из верхнего и нижнего сопел (показаны белыми стрелками). При этом более интенсивный поток тестировочной жидкости виден с верхнего сопла. Это можно объяснить сонаправленностью векторов силы притяжения и направления распространения потока из верхнего сопла. Через 0,028 с потоки выравниваются (рис. 7, б) и выглядят практически одинаковыми, встречаясь ниже середины длины заготовки на 5% от всей длины заготовки, о чем свидетельствует более насыщенный темно-фиолетовый цвет. Однако стоит отметить, что в связи с насыщенностью цвета тестировочной жидкости тяжело определить точное место столкновения потоков. Рис. 7, в-д демонстрирует дальнейшую интенсификацию процесса прокачки. Это хорошо прослеживается по усилению окраса центральной части межэлектродного промежутка. При этом потоки при столкновении в центре распространяются вправо – в единственно возможное направление, в область открытого реза. Распространение влево невозможно из-за конфигурации макета-заготовки (см. рис. 1, б). В этом можно убедиться, наблюдая четкую границу в

левой части макета-заготовки на каждом из снимков, представленных на рис. 7.

Рис. 7, е характеризуется более интенсивным заполнением межэлектродного промежутка тестировочной жидкостью, так как потоки с верхнего и нижнего сопла перемешиваются и двигаются. Мы предполагаем, что таким образом формируется «поток разворота», в котором сталкиваются частицы шлама при ПВЭО, формируя «мостик сварки». Однако здесь же можно наблюдать участки (отмечены белыми стрелками), где циркуляция тестировочной жидкости все еще отсутствует. Начиная с момента времени $t = 19,205$ с (см. рис. 7, е), на наш взгляд, образуются наиболее опасные условия прокачки с точки зрения образования застойной зоны и формирования «мостика сварки», поскольку он возникает непосредственно в ходе электроэрозионной обработки, при этом эффективное удаление шлама на всей длине межэлектродного промежутка не реализуется. Условия прокачки в момент времени $t = 19,205$ с и аналогичные ему моменты способствуют быстрому росту концентрации частиц шлама в межэлектродном промежутке и, как следствие, приводят к увеличению вероятности образования «мостика сварки» с последующим КЗ и обрывом проволоки.

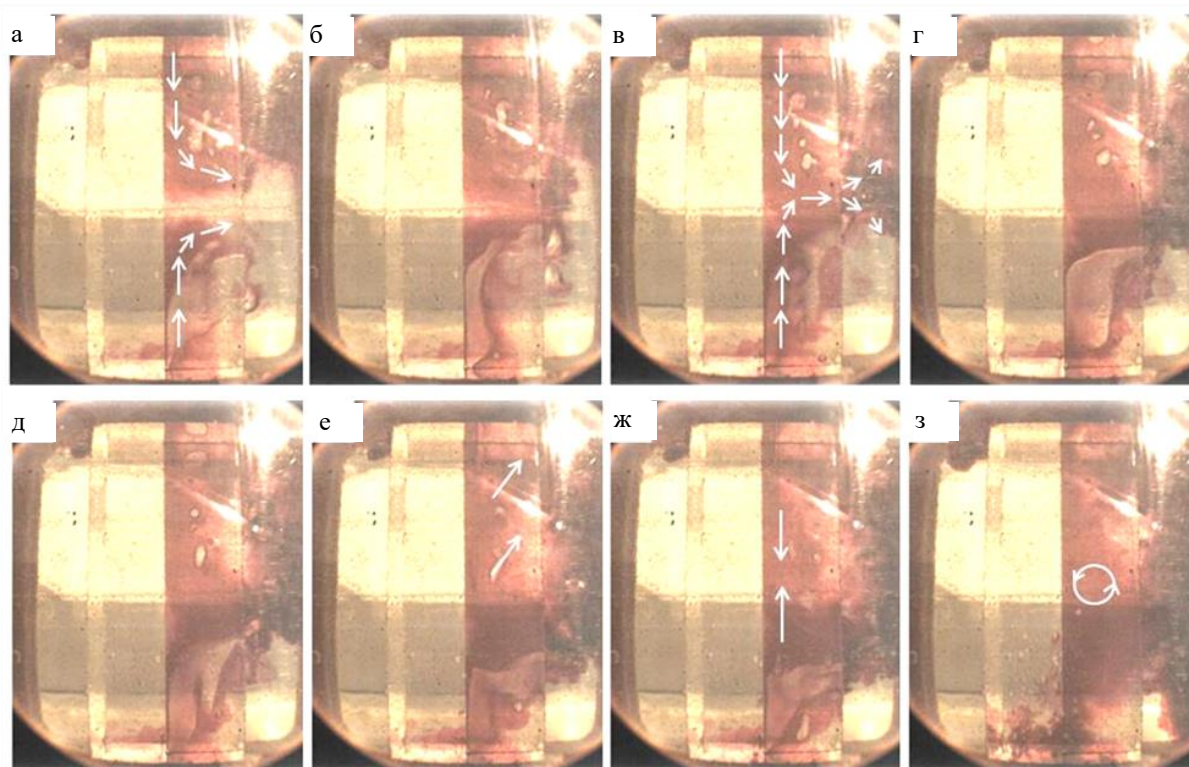


Рис. 7. Номера стоп-кадров и соответствующее им время на видеозаписи прокачки диэлектрической жидкости в различные моменты времени: а – 2779 (19,034 с); б – 2783 (19,062 с); в – 2791 (19,116 с); г – 2796 (19,150 с); д – 2798 (19,164 с); е – 2804 (19,205 с); ж – 2807 (19,226 с); з – 2832 (19,397 с)

Fig. 7. Frame numbers and corresponding timestamps on the video recording of dielectric fluid flushing at different moments in time: a is frame 2779 (19.034 s); б is frame 2783 (19.062 s); в is frame 2791 (19.116 s); г is frame 2796 (19.150 s); д is frame 2798 (19.164 s); е is frame 2804 (19.205 s); ж is frame 2807 (19.226 s); з is frame 2832 (19.397 s)

На **рис. 7, ж** можно наблюдать межэлектродный промежуток, практически полностью окрашенный тестировочной жидкостью. Наблюдение динамики потоков становится затруднительным. Важно отметить наличие центра столкновения потоков, он представлен одним из самых темных участков фотографии (указан белыми стрелками).

Дальнейшие снимки процесса прокатки, где $t = 19,397$ с (**рис. 7, з**), не представляют интереса, так как заполнение МЭП тестировочной жидкостью полностью окрасило межэлектродный промежуток и делает наблюдение практически невозможным. Стоит отметить, что вихревые потоки (отмечены белыми стрелками) создают дополнительное сопротивление движению основного потока, препятствуя более эффективно удалению частиц шлама.

3. *Результаты исследования прокатки диэлектрической жидкости на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ300L.*

В ходе эксперимента был зафиксирован один обрыв проволоки, несмотря на использование заводских параметров реза, рассчитанных программным обеспечением станка, которые считаются оптимальными и должны предотвращать обрывы проволоки. Этот факт еще раз подчеркивает необходимость исследований, направленных на минимизацию количества обрывов проволочного электрода-инструмента.

Полученный на указанных в **таблице** режимах образец (выпадающая часть) представлен на **рис. 8**.



Рис. 8. Выпадающая часть образца стали 5XhNM, обработанного в режиме «CLOSE»: В.С. – положение верхнего сопла, Н.С. – положение нижнего сопла

Fig. 8. Detached part of the 5KhNM steel sample machined in the “CLOSE” mode: B.C. is position of the upper nozzle; H.C. is position of the lower nozzle

На образце четко визуализируются три зоны: зоны 1, зоны 2, зона 3. Как видно, зоны 1 протяженностью 15 мм находятся в верхней и нижней частях образца. Они имеют самый светлый оттенок, что свидетельствует о минимальном количестве налипшего на них шлама, следовательно, уровень прокатки диэлектрической жидкости и вымывания шлама в этих областях были наилучшими. Это объясняется тем, что верхнее и нижнее сопла во время эксперимента были приближены к детали на 0,1 мм и поток деионизированной воды попадал непосредственно в межэлектродный зазор, интенсивно вымывая шлам. Столкновение частиц шлама и возможность образования «мостика сварки» в этих зонах маловероятны.

Зоны 2 следуют непосредственно за зонами 1 и также расположены в верхней и нижней частях образца. Очевидно, что из-за падения давления уровень прокатки в зонах 2 менее интенсивный, чем в зонах 1, следовательно, налипшего шлама в этих зонах больше (проследивается по более темному оттенку). Также следует отметить, что зона 2 для верхнего сопла более протяжённая, чем для нижнего.

После зон 2 на образце выделяется зона 3, обладающая наименьшей протяженностью. Необходимо отметить, что центр зоны 3 располагается не на полувысоте детали, а немного ниже ее, примерно на 5% от всей длины заготовки, ближе к нижнему соплу. Это также можно объяснить действием силы притяжения. Цвет зоны 3 – черный, что объясняется большим количеством налипшего шлама. Это свидетельствует о наименьшем уровне прокатки диэлектрической жидкости и, как следствие, наихудшем вымывании шлама и наличии застойной зоны с потоками разворота и столкновениями частиц шлама, приводящих к формированию «мостика сварки», инициирующему КЗ и обрыв проволоки.

В центре зоны 3 наблюдается участок более светлого оттенка по сравнению с остальной частью данной зоны. Как показывают результаты моделирования условий прокатки, описанные выше в пункте 1, участку светлого оттенка в зоне 3 соответствует область столкновения верхнего и нижнего потоков диэлектрической жидкости. Уровень вымывания шлама в этой области, вероятно, более высокий по сравнению с остальной частью зоны 3, поэтому его налипание происходит менее интенсивно.

4. *Обобщение данных компьютерного моделирования, макетного моделирования на стенде и промышленного реза на станке.*

Для комплексной оценки проведенных исследований необходимо провести сравнение результатов, описанных в пунктах 1-3.

При сопоставлении результатов численного моделирования, выполненного с применением методов вычислительной гидродинамики, с экспериментальными данными, полученными на промышленном электроэрозионном станке, выявлено частичное несо-

ответствие моделей реальным процессам в части расположения места столкновения потоков. В компьютерном моделировании место столкновения соответствует геометрическому центру высоты заготовки, однако по результатам макетного моделирования и реального реза на оборудовании наблюдается смещение места столкновения потоков на 5% ниже геометрического центра заготовки. Предположительно расхождения могут обуславливаться следующими факторами. Во-первых, наличием выраженного уменьшения потоков – попадание струи рабочей жидкости, выходящей из сопла диаметром 6 мм, в узкий межэлектродный промежуток (0,05 мм). Это может быть связано с формированием нелинейных эффектов вторичных течений, вызванных уменьшением потока (соотношение диаметра струи к ширине зазора менее 0,01). Во-вторых, гравитационным воздействием на диэлектрическую жидкость: верхний поток под собственным весом отклоняется вниз, изменяя точку его встречи с противоположным потоком. Для повышения результатов компьютерного моделирования требуются дальнейшие исследования, направленные на уточнение математических моделей течений в условиях узких прорезей и щелей с учетом микрогеометрии поверхности, по которой распространяется течение, и гравитационных сил.

Также полученные в ходе экспериментальных исследований данные (пункты 1-3) целесообразно сопоставить с данными компьютерного моделирования [18] в программном продукте STAR-CCM+, который позволяет рассчитывать данный вид модели прокатки посредством вычислительной гидродинамики. Компьютерная модель показала неустойчивость потока прокачиваемой жидкости из-за сильной турбулентности при длине прорези менее 2 мм и образовании за проволокой, в средней части пропила, застойной зоны. Здесь же японские исследователи упоминают, что при длине пропила более 3 мм сопла диаметром 6 мм полностью находятся: нижнее – под деталью, верхнее – над деталью, и большая часть потока из сопел поступает в обработанный пропил, делая поле потока устойчивым. При этом стабильность прокатки должна быть высокой, а количество обрывов проволоки минимальным. Однако авторами данного исследования при макетном моделировании прокатки на стенде, даже при длине прорези 15 мм, не было получено стабильного потока прокатки (см. пункт 2). Вероятно, данное противоречие связано с тем, что в [18, рис. 3] компьютерное моделирование не учитывает микропульсации гидравлического потока, присутствующие в реальных гидравлических системах.

Также необходимо сопоставить данные **рис. 8**, полученного при промышленном резе, и данные анализа отслеживания частиц шлама в зазоре, полученные с помощью модели Лагранжа [18, рис. 4]. Модель учитывает движение твердофазного шлама в потоке деионизированной воды. При толщине детали 10 мм А. Окада и др. [18] разделили деталь условно на 10

слоев, каждый высотой 1 мм, и в каждом слое расположили 5 частиц шлама в межэлектродном зазоре – между проволокой и обрабатываемой заготовкой. Таким образом, в модели каждую секунду в межэлектродном зазоре генерировалось 50 частиц. Результаты расчёта показали, что при прокатке в середине прорези за проволокой образуется «застойная зона» и некоторые частицы шлама могут задерживаться в ней в течение длительного периода времени, вплоть до 50 мкс. Этот факт удовлетворительно коррелирует с нашей гипотезой о формировании «мостика сварки», когда одна частица сталкивается с дугой, образуя агломерат, способный перекрыть межэлектродный промежуток и вызвать КЗ с дальнейшим обрывом проволоки. Однако в модели есть и противоречащие **рис. 8** данные. В частности, не объясняется отсутствие скопления частиц шлама непосредственно в месте столкновения потоков, хотя, по нашим данным (см. **рис. 8**, зона 3), в нем должно присутствовать значительное количество шлама (см. пункт 3). Кроме того, **рис. 8** свидетельствует об ухудшающемся вымывании шлама в зоне 3, которое значительно хуже, чем в зоне 2, а расчетная модель [18], напротив, показывает наибольшее скопление шлама в зонах 2 и интенсивное удаление в зоне 3.

Проведенные исследования с использованием компьютерного, макетного и промышленного моделирования позволили установить, что место столкновения потоков при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке в режиме «CLOSE» находится на 5% ниже середины геометрического центра заготовки – наиболее вероятном месте образования эффективных частиц и «мостика сварки». Полученные данные могут быть использованы для дальнейшей оптимизации технологии ПВЭЭО с целью снижения обрывов проволоки и повышения производительности обработки.

Таким образом, экспериментальные данные (см. пункт 3) демонстрируют удовлетворительную сходимость с результатами моделирования (см. пункты 1 и 2), подтверждая адекватность использованного подхода.

Заключение

На основании проведенных исследований по компьютерному и макетному моделированию потоков диэлектрической жидкости на стенде с последующей верификацией данных на промышленном оборудовании для проволочно-вырезной электроэрозионной обработки можно сформулировать следующие выводы:

1. Сопоставляя данные макетного моделирования и реального реза, можно отметить, что область фактического столкновения потоков прокачиваемого диэлектрика находится приблизительно на 2-5% ниже геометрической полувысоты детали в режиме «CLOSE», что, вероятно, связано с сонаправленностью силы гравитационного притяжения и направления распространения потока диэлектрика из верхнего сопла.

2. Наиболее вероятной областью обрывов проволоки в процессе ПВЭЭО в режиме «CLOSE» является полувысота детали – ближе к нижнему соплу. Это обусловлено снижением скорости прокачки диэлектрической жидкости в области столкновения потоков и формированием в ней застойной зоны с образованием мостиков сварки из частичек шлама, формируемых в ходе оплавления заготовки и проволочного электрода-инструмента.

3. Анализ показал, что компьютерное моделирование демонстрирует ограниченную точность при описании потоков в реальных условиях обработки, особенно в областях с экстремально малыми зазорами. Перспективным направлением совершенствования моделей является детальное изучение гидродинамики в стесненных межэлектродных промежутках.

На основании полученных выводов интерес представляет моделирование условий удаления частиц шлама из межэлектродного промежутка при различных режимах промывки (отключение одного из сопел, увеличение/уменьшение давления промывки для уменьшения возможности образования «рециркуляционной зоны»). В будущем планируется проведение таких исследований по влиянию режимов промывки рабочей жидкости на обрыв проволоки при ПВЭЭО.

Список источников

1. Yan M. T., Huang P. H. Accuracy improvement of wire-EDM by real-time wire tension control // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004, vol. 44, no. 7-8, pp. 807-814.
2. Kinoshita N., Fukui M., Gamo G. Control of wire-EDM preventing electrode from breaking // *CIRP Annals*. 1982, vol. 31, no. 1, pp. 111-114. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63279-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63279-X)
3. Wang W. M., Rajurkar K. P. Monitoring sparking frequency and predicting wire breakage in WEDM // *Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*. Publ by ASME, 1992. С. 49-64.
4. Tosun N., Cogun C. An investigation on wire wear in WEDM // *Journal of materials processing technology*. 2003, vol. 134, no. 3, pp. 273-278. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01045-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01045-2)
5. Abhilash P. M., Chakradhar D. Failure detection and control for wire EDM process using multiple sensors // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021, vol. 33, pp. 315-326.
6. Исследование причин обрыва электрода при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке паке-тированных заготовок / Шлыков Е. С. и др. // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 5. С. 76-76.
7. Investigation of the impact of Rehbinder effect, electrical erosion and wire tension on wire breakages during WEDM / Fedorov A.A. et al. // *Journal of Materials Processing Technology*. 2018, vol. 256, pp. 131-144. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.02.002>
8. Pramanik A., Basak A. K. Sustainability in wire electrical discharge machining of titanium alloy: understanding wire rupture // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 198, pp. 472-479. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.045>.
9. A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718 / Tanjilul M. et al. // *Journal of Materials Processing Technology*. 2018, vol. 255, pp. 263-274. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.016>
10. Study on the Movement Rule of Discharge Products in Large Area Titanium Alloy Machining by Electrical Discharge Machining / Dong L. I. et al. // *Journal of Mechanical Engineering*. 2017, vol. 53, no. 21, pp. 200-208. <https://doi.org/10.3901/JME.2017.21.200>
11. Bommeli B., Frei C., Ratajski A. On the influence of mechanical perturbation on the breakdown of a liquid dielectric // *Journal of electrostatics*. 1979, vol. 7, pp. 123-144. [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(79\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0304-3886(79)90067-6)
12. Kumar R., Singh I. Productivity improvement of micro EDM process by improvised tool // *Precision Engineering*. 2018, vol. 51, pp. 529–535.
13. Yanatori K., Kunieda M. Study on debris movement in EDM gap // *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers*. 1995, vol. 29, no. 61, pp. 19-27.
14. Li Z., Bai J. Influence of alternating side gap on micro-hole machining performances in micro-EDM // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, vol. 94, no. 1, pp. 979-989. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0959-9>
15. Schumacher B. M. About the role of debris in the gap during electrical discharge machining // *CIRP annals*. 1990, vol. 39, no. 1, pp. 197-199. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61034-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61034-8)
16. Suda T. Movement of conductive particles in EDM gap // *JSEME*. 1974, vol. 7, no. 14, pp. 19-28.
17. Yanatori K., Kunieda M. Study on debris movement in EDM gap // *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers*. 1995, vol. 29, no. 61, pp. 19-27. https://doi.org/10.2526/jseme.29.61_19
18. Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf / Okada A. et al. // *CIRP annals*. 2009, vol. 58, no. 1, pp. 209-212. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.003>
19. 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. <http://dx.doi.org/10.17212/1994-6309-2022-24.2-25-38>
20. Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM / Okada A. et al. // *CIRP annals*. 2015, vol. 64, no. 1, pp. 233-236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.034>
21. Optimization of nozzle flushing method for smooth debris exclusion in wire EDM / Fujimoto T. et al. // *Key Engineering Materials*. 2012, vol. 516, pp. 73-78. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.516.73>
22. Investigating wire breakage during EDM with fractographic analysis // *Journal of Physics: Conference Series / Bredgauer I. O. et al. // IOP Publishing*. 2021, vol. 1791, no. 1, pp. 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1791/1/012005>

References

1. Yan M.T., Huang P.H. Accuracy improvement of wire-EDM by real-time wire tension control. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004;44(7-8):807-814.
2. Kinoshita N., Fukui M., Gamo G. Control of wire-EDM preventing electrode from breaking. *CIRP Annals*. 1982;31(1):111-114. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63279-X
3. Wang W.M., Rajurkar K.P. Monitoring sparking frequency and predicting wire breakage in WEDM. *Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*. New York: ASME, 1992, pp. 49-64.
4. Tosun N., Cogun C. An investigation on wire wear in WEDM. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;134(3):273-278. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)01045-2
5. Abhilash P.M., Chakradhar D. Failure detection and control for wire EDM process using multiple sensors. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021;33:315-326.
6. Shlykov E.S. et al. Study of the causes of electrode breakage during wire electrical discharge machining of stacked blanks. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013;(5):76. (In Russ.)
7. Fedorov A.A. et al. Investigation of the impact of Rehbinder effect, electrical erosion and wire tension on wire breakages during WEDM. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;256:131-144. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.002
8. Pramanik A., Basak A.K. Sustainability in wire electrical discharge machining of titanium alloy: understanding wire rupture. *Journal of Cleaner Production*. 2018;198:472-479. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.045
9. Tanjilul M., [et al.]. A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;255:263-274. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.12.016
10. Dong L.L., [et al.]. Study on the Movement Rule of Discharge Products in Large Area Titanium Alloy Machining by Electrical Discharge Machining. *Journal of Mechanical Engineering*. 2017;53(21):200-208. DOI: 10.3901/JME.2017.21.200
11. Bommeli B., Frei C., Ratajski A. On the influence of mechanical perturbation on the breakdown of a liquid dielectric. *Journal of Electrostatics*. 1979;7:123-144.
12. Kumar R., Singh I. Productivity improvement of micro EDM process by improvised tool. *Precision Engineering*. 2018;51:529-535.
13. Kunieda M., Yanatori K. Study on debris movement in EDM gap. *International Journal of Electrical Machining (IJEM)*. 1995;29(61):19-27.
14. Li Z., Bai J. Influence of alternating side gap on micro-hole machining performances in micro-EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;94(1):979-989. DOI: 10.1007/s00170-017-0959-9
15. Schumacher B.M. About the role of debris in the gap during electrical discharge machining. *CIRP Annals*. 1990;39(1):197-199. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61034-8
16. Suda T. Movement of conductive particles in EDM gap. *Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers (JSEME)*. 1974;7(14):19-28.
17. Yanatori K., Kunieda M. Study on debris movement in EDM gap. *Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers*. 1995;29(61):19-27. DOI: 10.2526/jseme.29.61_19
18. Okada A. et al. Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf. *CIRP Annals*. 2009;58(1):209-212. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.003
19. Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Muratov K.R. Theoretical modeling of the process of interelectrode gap flushing during die-sinking electroerosion machining of products made of polymer composite materials. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metalworking (technology, equipment, tools)]. 2022;24(2):25-38. (In Russ.) DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-25-38
20. Okada A. et al. Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM. *CIRP Annals*. 2015;64(1):233-236. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.034
21. Fujimoto T. et al. Optimization of nozzle flushing method for smooth debris exclusion in wire EDM. *Key Engineering Materials*. 2012;516:73-78. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.516.73
22. Bredgauer I.O. et al. Investigating wire breakage during EDM with fractographic analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing. 2021;1791(1):012005. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012005

Поступила 26.11.2025; принята к публикации 27.03.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 26/11/2025; revised 27/03/2026; published 30/06/2026

Федоров Алексей Аркадьевич – кандидат технических наук,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: aafedorov@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6681-087X

Бредгауэр Юлия Олеговна – старший преподаватель,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: jobredgauer@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-0267-8179

Полонянкин Денис Андреевич – кандидат педагогических наук,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: dapolonyankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0001-6799-3105

Гаранин Денис Владимирович – старший преподаватель,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: dvgaranin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-7920-5783

Бобков Николай Владимирович – старший преподаватель,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: nvbobkov@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-5831-282X

Осташ Софья Викторовна – студент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: ostash.sofiya@mail.ru . ORCID 0009-0004-5644-6885

Alexey A. Fedorov – PhD (Eng.),
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: aafedorov@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6681-087X

Iulia O. Bredgauer – Senior Lecturer,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: jobredgauer@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-0267-8179

Denis A. Polonyankin – PhD (Eng.),
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: dapolonyankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0001-6799-3105

Denis V. Garanin – Senior Lecturer,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
Email: dvgaranin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-7920-5783

Nikolay V. Bobkov – Senior Lecturer,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
Email: nvbobkov@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-5831-282X

Sophia V. Ostash – Student,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
Email: ostash.sofiya@mail.ru. ORCID 0009-0004-5644-6885