

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И МОРФОЛОГИИ ЧАСТИЦ ШЛАМА В КОНТЕКСТЕ ОБРАЗОВАНИЯ МОСТИКОВ СВАРКИ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ

Ю. О. Бредгауэр✉, А. А. Федоров, Д. А. Полонянкин

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

✉ jobredgauer@omgtu.ru

В статье представлены результаты исследования частиц шлама, включая их элементный состав, а также анализ потенциального влияния шлама на образование мостика сварки, что может приводить к короткому замыканию и обрыву проволоки при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке штамповой стали 5ХНМ на станке Sodick VZ 300L.

Для определения размеров, морфологии, формы и элементного состава частиц шлама использованы методы растровой электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и лазерного дифракционного анализа. Установлено, что средние значения размеров частиц шлама составили $25,04 \pm 5,26$ мкм для образцов, собранных со стола, и $20,97 \pm 15,10$ мкм — для частиц со дна ванны. Доля эффективных частиц, имеющих критический размер (более 25 мкм) и способствующих образованию мостика сварки, достигает 35 % (для частиц со стола) и 45 % (для частиц со дна ванны). Элементный анализ выявил, что частица состоит из цинка и меди, что соответствует элементному составу материала электрода-инструмента — латуни.

Полученные результаты позволяют лучше понять механизм возникновения дефектов и предложить меры для оптимизации технологического процесса.

Ключевые слова: проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, частицы шлама, мостик сварки, короткое замыкание, растровая электронная микроскопия, лазерный дифракционный анализ, элементный состав

Для цитирования: Бредгауэр Ю. О., Федоров А. А., Полонянкин Д. А. Исследование гранулометрического состава и морфологии частиц шлама в контексте образования мостиков сварки при электроэрозионной обработке штамповой стали. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 40–48. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-40-48>. EDN: RWWOHA.



© Бредгауэр Ю. О., Федоров А. А., Полонянкин Д. А., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

INVESTIGATION OF GRANULOMETRIC COMPOSITION AND MORPHOLOGY OF DEBRIS PARTICLES IN THE CONTEXT OF WELDING BRIDGE FORMATION AT ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF THE STAMPED STEEL

Iu. O. Bredgauer✉, A. A. Fedorov, D. A. Polonyankin

Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

✉ jobredgauer@omgtu.ru

This article presents the results of a study of debris particles, including their elemental composition, and an analysis of the potential impact of debris particles on welding bridge formation, which can lead to short circuits and wire breakage during of welding bridge formation at electrical discharge machining of the 5NiCrMo stamp steel on a Sodick VZ 300L machine.

The authors use the scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy and the laser diffraction analysis to determine the size, morphology, shape and elemental composition of debris particles. Moreover, the authors have established that the average debris particles sizes are

25.04 ± 5.26 microns for samples from the tabletop and 20.97 ± 15.10 microns for samples from the bottom of the tub. The proportion of effective particles with a critical size (greater than 25 microns) that contribute to welding bridge formation reaches 35 % (for particles from the tabletop) and 45 % (for particles from the bottom of the tub). An elemental analysis reveals that the particle consists of zinc and copper, corresponding to the elemental composition of the electrode-tool — brass material.

Therefore, the results provide a better understanding of the defect formation mechanism and suggest measures to optimise the process.

Keywords: wire electrical discharge machining, debris particles, welding bridge, short circuit, scanning electron microscopy, laser diffraction analysis, elemental composition

For citation: Bredgauer Iu. O., Fedorov A. A., Polonyankin D. A. Investigation of granulometric composition and morphology of debris particles in the context of welding bridge formation at electrical discharge machining of the stamped steel. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):40–48. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-40-48>. EDN: RWWOHA. (In Russ.).



© Bredgauer Iu. O., Fedorov A. A., Polonyankin D. A., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПВЭО) повсеместно используется при изготовлении штамповой оснастки и пресс-форм для лопаток авиационных газовых турбин, так как имеет ряд преимуществ перед традиционными методами: обработка любых токопроводящих материалов вне зависимости от их физико-механических характеристик, возможность получения узких прорезей и щелей, отсутствие силы резания и, как следствие, деформации тонкостенных деталей. Однако низкая производительность метода до сих пор является серьезным ограничением, на что в большей степени влияет такое явление, как обрыв проволоки во время обработки, поэтому исследование причин в настоящее время является актуальной задачей.

Учеными выдвинут ряд гипотез о том, что является истинной причиной обрыва проволоки во время ПВЭО [1–6]. Одной из причин является короткое замыкание, происходящее из-за наличия проводимых частиц в межэлектродном промежутке [3, 6]. В научной литературе широко используется термин «мостик сварки» [3, 6, 7–11]. Под этим понятием подразумевается скопление проводящих частиц в зоне обработки. Эти частицы могут включать как материал заготовки, так и материал электрода-инструмента, находящийся в рабочем промежутке, поскольку система промывки не всегда обеспечивает полное удаление шлама [12–14]. Важно отметить, что такие частицы образуются при каждом разряде и в значительном количестве присутствуют в межэлектродном зазоре. Об этом также утверждает ряд источников, полагающих, что короткое замыкание, а вследствие и обрыв проволоки происходили значительно чаще при загрязненной рабочей жидкости [3, 14].

Цель исследования

По нашему мнению, мостик сварки образуется из частиц шлама. Однако с целью повышения ясности механизма формирования такого мостика необходимо детально исследовать частицы шлама, так как их морфология и размеры могут значительно влиять на него, вызывая короткое замыкание, обуславливающее обрыв проволоки. Таким образом, цель работы — исследовать частицы шлама, включая их элементный состав, а также проанализировать потенциальное влияние шлама на образование мостика сварки.

Существуют работы по исследованию размеров и морфологии частиц [8, 10, 11], но ни одна из них не описывает механизм образования мостика сварки. Также отсутствует информация о какой-либо классификации частиц шлама.

Методология

В качестве образца использовался параллелепипед из стали 5ХНМ с габаритными размерами 50×50×150 (Д×Ш×В) мм. Электродом-инструментом являлась мягкая латунная проволока, содержащая 65 % Cu и 35 % Zn, диаметром 250 мкм. Эксперименты произведены на проволочном электроэрозионном станке Sodick VZ 300L (Япония), который использует дистиллированную воду в качестве рабочей жидкости. Во время проведения эксперимента положение сопел соответствовало закрытой обработке (рис. 1).

Текущие значения электрических параметров (тока и напряжения), которые были автоматически рассчитаны программным обеспечением станка, во время экспериментов не изменялось вручную и фиксировалось при помощи встроенных вольтметра и амперметра. Сила тока имела среднее значение в 10,5 А (диапазон от 10,4 до 10,6 А), а среднее значение напряжения составило 40 В (диапазон от 38 до 42 В).

По указанным режимам производился рез заготовки в одном направлении с целью образования частиц шлама. Во время обработки были зарегистрированы 4 обрыва проволоки, 2 из них —

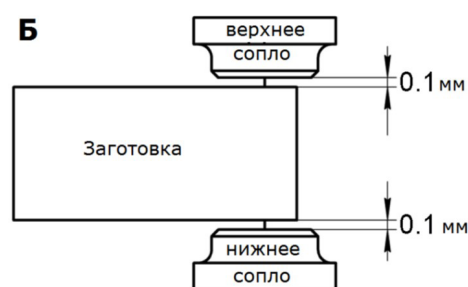


Рис. 1. Схема положения сопел: режим закрытой обработки (верхнее и нижнее сопла расположены на расстоянии 0,1 мм от детали)
Fig. 1. Scheme of the nozzle disposition in the "CLOSE" mode (upper and lower nozzles are located at a distance of 0.1 mm from the part)

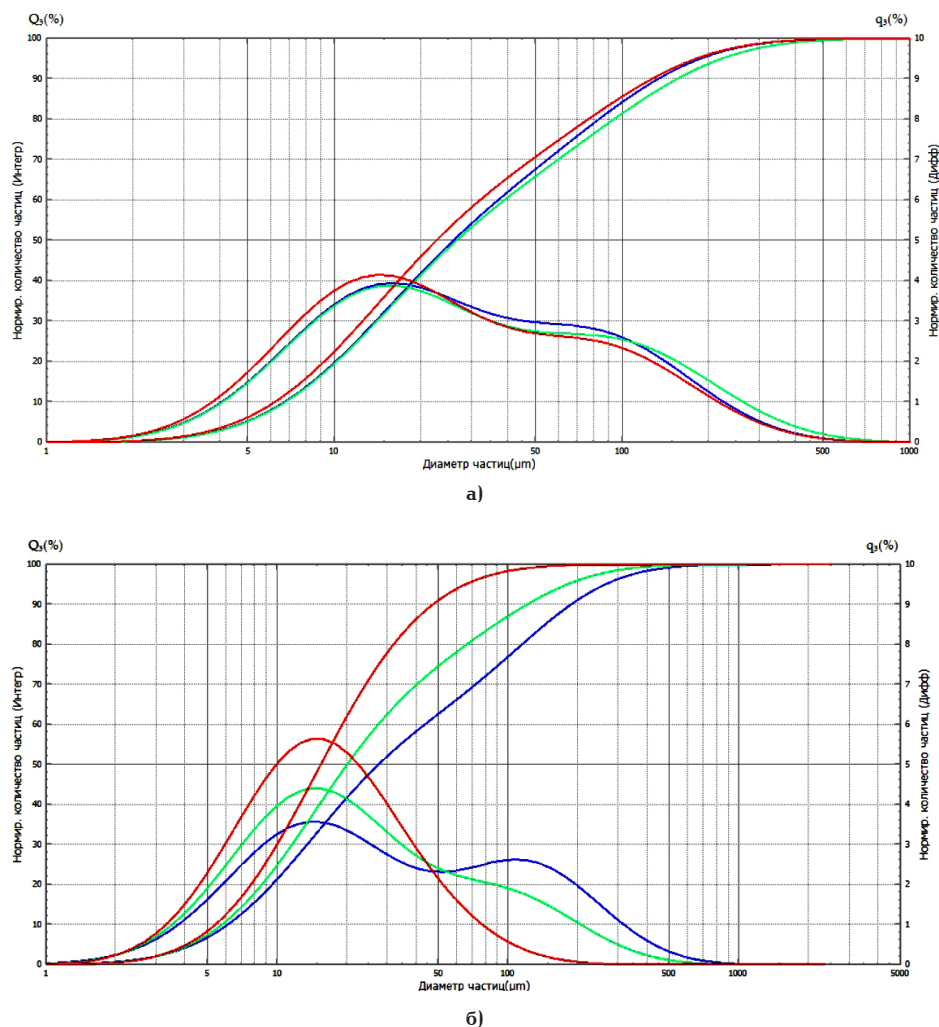


Рис. 2. Диаграммы дифференциального и интегрального распределения частиц шлама:
а) со стола; б) со дна ванны
Fig. 2. Diagrams of differential and integral distributions of debris particles:
a) from the tabletop; б) from the bottom of the tub

в начале реза. После обработки заготовки ванная с диэлектрической жидкостью была естественным образом (без обдува, подогрева и т. д.) высушена. Частицы шлама были собраны с поверхности рабочего стола и со дна ванны для исследования.

Собранный шлам был исследован на растровом электронном микроскопе JEOL JCM-5700 с энергодисперсионным спектрометром JED-2300. Большинство наблюдений было проведено с помощью сигнала SEI (вторичные электроны). Параметр размера пятна — 50, ускоряющее напряжение равнялось 15 кВ. Из-за разномасштабности исследований требовалось различное увеличение, которое лежало в диапазоне от $\times 1000$ до $\times 5000$. Двусторонняя токопроводящая клейкая лента была размещена на дне держателя образцов для растровой электронной микроскопии. Избыточное количество шлама, прикрепленного к ленте, удалялось потоком сжатого воздуха.

Интегральное и дифференциальное распределения размеров шлама получали методом лазерного дифракционного анализа на приборе Shimadzu SALD-2300, оснащённом лазером с длиной волны 680 нм, обеспечивающим измерения в диапазоне от 17 нм до 2500 мкм. Для более точного исследования было проведено по три измерения каждого объема шлама, собранного отдельно со стола и с ванны. Итого 6 измерений.

Результаты и обсуждение

Предполагается, что скопление частиц шлама между электродами обуславливает образование мостика сварки. Однако не все частицы способны быть «строительным материалом» для него, поэтому необходимо классифицировать их по степени влияния на формирование мостика сварки. Результаты исследования помогут понять механизм образования мостика сварки. С этой целью проведено исследование распределения частиц шлама по размерам, форме и морфологии поверхности. Установлена вероятность формирования агломератов и образования мостика сварки из них.

1. Размеры частиц шлама

Размер частиц шлама является важным параметром при обсуждении механизма формирования мостика сварки, поскольку величина межэлектродного зазора в большинстве современных станков составляет 50 мкм, и необходимо понимать, из какого количества частиц формируется мостик сварки — одна частица размером 50 мкм, две частицы по 25 мкм, три частицы по 17 мкм и т. д.

С помощью лазерного дифракционного анализа (ЛДА) были проанализированы размеры частиц шлама, собранных со стола и со дна ванны электроэрозионного оборудования после обработки заготовки. По результатам анализов были получены диаграммы дифференциального и интегрального

Таблица 1. Распределение размеров частиц шлама
Table 1. Size distribution of debris particles

Размеры частиц мусора	Распределение размеров, %							
	Забор со стола				Забор со дна ванны			
	1	2	3	Среднее значение	1	2	3	Среднее значение
От 0,1 до 10 мкм	16	17	20	18	12	13	15	13
От 10 до 25 мкм	36	47	58	47	40	45	42	42
От 25 до 50 мкм	11	12	17	13	14	13	12	13
От 50 до 250 мкм	37	24	5	22	34	29	31	32

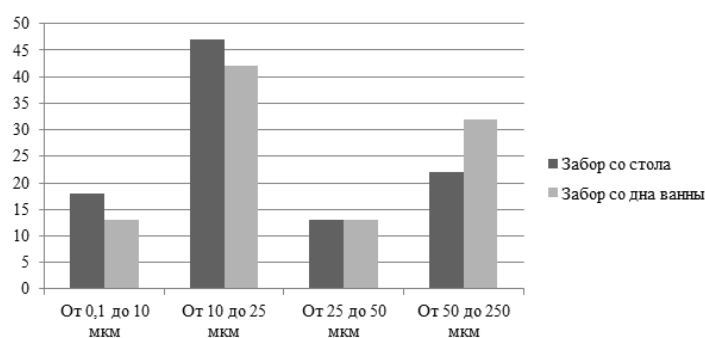


Рис. 3. Диаграмма распределения размеров частиц шлама по среднему значению (в процентном соотношении)
Fig. 3. Particle size distribution diagram for debris by average value (percentage)

распределения частиц шлама, которые представлены на рис. 2. Результаты анализа показали бимодальный характер распределения частиц. Основная масса частиц обладает размерами от 10 до 25 мкм.

Средние значения размеров составили $25,04 \pm 5,26$ мкм для частиц шлама, собранного со стола, и $20,97 \pm 15,10$ мкм — для частиц шлама со дна ванны. Широкий диапазон допустимых отклонений, особенно для частиц, собранных со дна ванны, объясняется образованием агломератов. Размеры частиц, определенные методом ЛДА, находятся в диапазоне от 0,1 до 250 мкм. Для наглядности результаты анализа занесены в табл. 1, на основании таблицы составлена диаграмма (рис. 3).

Рис. 2, 3 и табл. 1 позволяют увидеть, что основная часть шлама имеет размер от 0,1 до 250 мкм. Важно отметить, что в шламе также встречаются частицы с размерами более 25 мкм. Это является важным, поскольку вероятность образования мостика сварки из двух частиц по 25 мкм выше, чем из трех и более частиц.

В собранном со дна ванны шламе больше процентное содержание частиц мусора, обладающих размером от 25 мкм и больше (в среднем 35 и 45 % соответственно). Это можно объяснить тем, что осевший шлак на дне ванны может слеживаться и образовывать агломераты. Также существует предположение, что образование подобных частиц большого размера могло произойти из-за слипания нескольких частиц после обработки заготовки [9]. Вместе с тем наличие таких частиц не свидетельствует о том, что они попадают в межискровый зазор во время обработки. Собранный со стола шлак является сравнительно более мелкодисперсным, чем шлак со дна ванны.

В исследовании [10] были проанализированы размеры частиц шлама, полученных при микро-

сверлении методом электроэрозионной обработки (ЭЭО), и были выявлены следующие результаты: 70–80 % частиц имеют размер 5–15 мкм и 20–30 % частиц — от 15 до 140 мкм. Эти результаты отличаются от тех, что были получены в работе [15]. В работе [15] исследовали шлак, образовавшийся после единичного разряда при различных длинах импульса, и выяснили, что в среднем 60–65 % частиц шлама имеют размер более 30 мкм. Однако такую разницу в результатах можно объяснить различием методов ЭЭО, материала заготовок, используемых для проведения эксперимента, и параметров обработки. Кроме того, в работах [10, 15] не указано место сбора частиц шлама.

Таким образом, в шламе обнаруживаются частицы с различными размерами, в том числе превышающими величину межискрового зазора, которая составляет 50 мкм. Распределение частиц шлама по размерам необходимо для расчета вероятности формирования мостика сварки из частиц определенного размера.

2. Морфология частиц шлама

Частицы, собранные со стола станка, имеют более мелкие размеры, чем частицы, собранные со дна ванны. Это также подтверждают результаты ЛДА. На рис. 4 представлены снимки частиц шлама при тысячекратном увеличении, собранных со стола станка. Можно отметить, что большинство частиц имеют сферическую форму, их размеры не превышают 20 мкм (рис. 4а). В шламе, собранном с рабочего стола, обнаружены мелкие частицы размером около 1 мкм, что удовлетворительно согласуется с результатами исследований [8]. Установлено, что большинство частиц также имеет сферическую гладкую форму.

На рис. 4б большее количество частиц также имеет сферическую форму. Некоторое количество

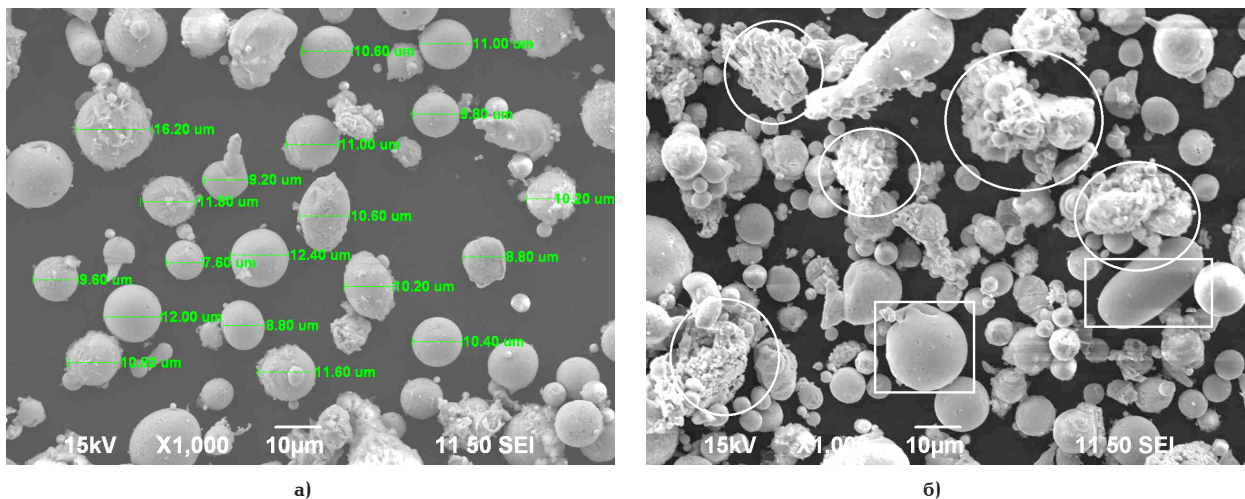


Рис. 4. Микрофотографии частиц шлама, собранных со стола станка:
а) микрофотография частиц с нанесением размеров в мкм; б) морфология частиц различной формы

Fig. 4. Micrographs of sludge particles collected from the machine tabletop:
a) micrograph of particles with dimensions in microns; б) morphology of particles of various shapes

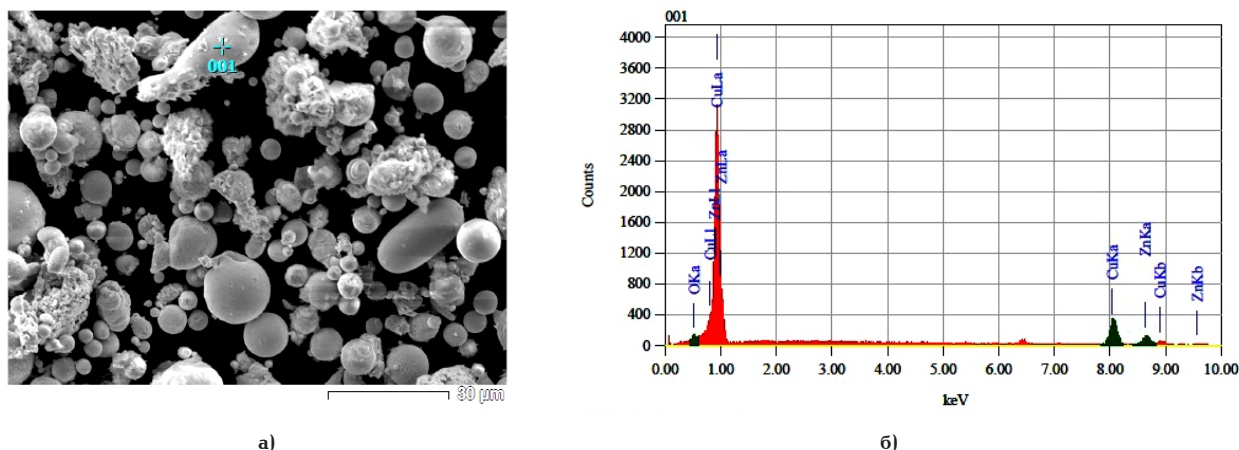


Рис. 5. Анализ элементного состава частицы шлама:
а) микрофотография с указанием места проведения химического анализа;
б) энергодисперсионный спектр химических элементов

Fig. 5. Elemental analysis of a debris particle:
a) micrograph, indicating the location of the chemical analysis;
б) energy-dispersive spectrum of chemical elements

имеет овальную форму (выделены квадратной рамкой). Однако можно наблюдать и агломераты, состоящие из нескольких частиц (выделены окружностью на рис. 4б). Их размеры превышают 20 мкм, а поверхность не является однородной.

Наличие у растрового электронного микроскопа энергодисперсионного спектрометра JED-2300 позволило провести элементный анализ частиц шлама, собранного со стола. Элементный анализ позволит получить более точные данные об электропроводности, теплопроводности и других физических характеристиках, необходимых для дальнейших исследований механизма формирования мостика сварки и расчета выделяемого тепла при коротком замыкании.

На рис. 5а отмечено место (001) проведения анализа, а на рис. 5б представлен энергодисперсионный спектр, где по горизонтальной оси отмечена энергия характеристического рентгеновского излучения, а по вертикальной — число импульсов.

Для большей наглядности процентное содержание химических элементов в массовой и атомной долях представлены в табл. 2. Можно сделать вывод, что частица состоит из цинка и меди, что соот-

ветствует элементному составу материала электрода-инструмента — латуни.

При исследовании частиц шлама со дна ванны методом растровой электронной микроскопии были обнаружены крупные агломераты размерами от 25 до 80 мкм (рис. 6). Наличие таких частиц не свидетельствует о том, что они находились в межискровом зазоре во время обработки. В работе [8] также предполагается, что образование подобных частиц несферической формы могло произойти из-за слипания нескольких частиц после обработки заготовки.

Однако на рис. 6б продемонстрирована частица при увеличении в 3000 крат, размеры которой равны 25 мкм. Такая частица не могла образоваться путём слёживания. Вероятнее всего такая частица образовалась при плавлении материала во время обработки, а поэтому находилась в межискровом зазоре. Также при анализе микрофотографий можно заметить, что присутствуют агломераты, как более крупные (рис. 6а, б, в), так и более мелкие (рис. 6г).

Размеры агломератов сложно описать только одним параметром, так как в различных направлениях размеры варьируются. Важно отметить, что поверх-

Таблица 2. Элементный состав частицы шлама со стола (на основе рис. 5)
Table 2. Elemental composition of a debris particle from a tabletop (based on the Fig. 5)

Химические элементы	Энергия характеристического рентгеновского излучения, keV	Массовая доля, %	Атомная доля, %
O	0,525	1,84	6,98
Cu	8,040	66,15	63,26
Zn	8,630	32,01	29,76

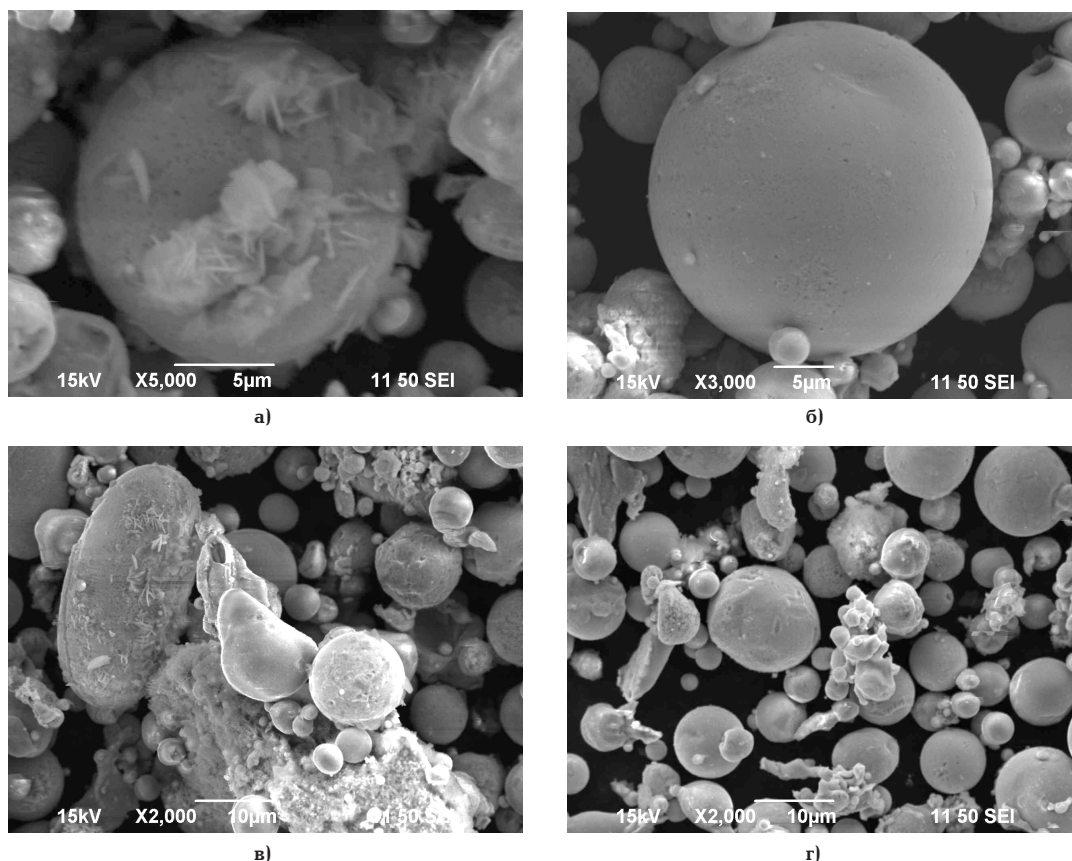


Рис. 6. Микрофотографии частиц шлама, собранных со стола станка:

- а) частица с мартенситными пластинками при увеличении 5000×;
б) «эффективная» частица при увеличении 3000×;
в) конгломерат при увеличении 2000×; г) конгломераты при увеличении 2000×
Fig. 6. Micrographs of debris particles collected from the machine tabletop:
а) particle with martensite platelets at 5000× magnification;
б) "effective" particle at 3000× magnification;
в) conglomerate at 2000× magnification; г) conglomerates at 2000× magnification

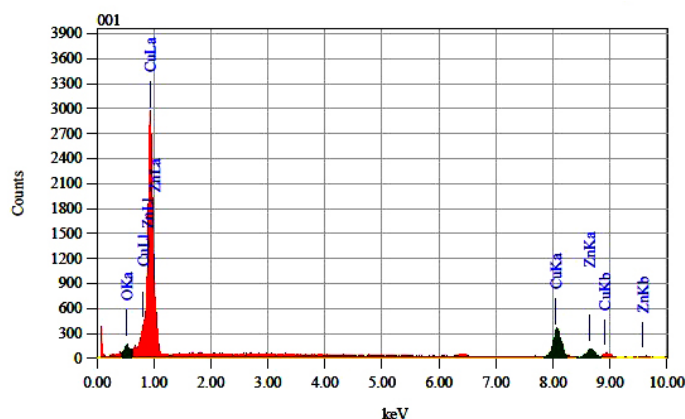
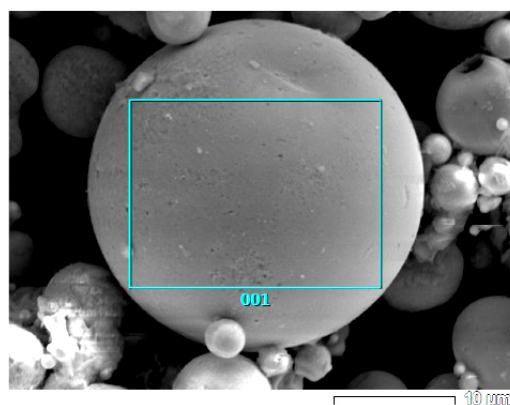


Рис. 7. Анализ элементного состава частицы шлама: а) микрофотография с указанием места проведения химического анализа; б) энергодисперсионный спектр химических элементов
Fig. 7. Elemental analysis of a debris particle: а) micrograph, indicating the location of the chemical analysis;
б) energy-dispersive spectrum of chemical elements

Таблица 3. Элементный состав частицы шлама с ванны (на основе рис. 7)
Table 3. Elemental composition of a debris particle from a tub (based on the Fig. 7)

Химические элементы	Энергия характеристического рентгеновского излучения, keV	Массовая доля, %	Атомная доля, %
O	0,525	2,93	10,79
Cu	8,040	69,33	64,23
Zn	8,630	27,74	24,98

ности агломератов неровные, состоят из большого количества более мелких частиц сферической и несферической форм. На рис. 6а поверхность агломератов имеет мартенситные пластинки в виде тонких игл. В работе [16] поясняется механизм их формирования на поверхности шлама.

Для частиц шлама, собранных со дна ванны, был проведен анализ элементного состава энергодисперсионной спектроскопией.

Результаты представлены на рис. 7 и занесены в табл. 3.

Элементный анализ частицы, отмеченной на рис. 7 и в табл. 2, указывает на то, что состав материала (массовая доля Cu — 69,33 %, Zn — 27,74 %) соответствует материалу электрода-инструмента (Cu — 65 %, Zn — 35 %).

3. Классификация частиц шлама

В соответствии с полученными данными о размерах и морфологии частиц шлама (из п. 1 и 2), их можно разделить на «эффективные» и «неэффективные» частицы. Это означает, что некоторые из них обладают способностью образовывать мостик сварки и, следовательно, могут спровоцировать короткое замыкание, в то время как другие не имеют такой вероятности.

Неэффективные частицы шлама (можно в большом количестве наблюдать на рис. 4а и рис. 6г) имеют сферическую форму, гладкую поверхность, они полностью кристаллизованы, а их размер не превышает половины величины межискрового зазора (размер межискрового зазора — 50 мкм). Такие частицы, по всей вероятности, не могут вызвать короткого замыкания, т. к. они свободно вымываются потоками диэлектрической жидкости с рабочей зоны. Благодаря сферической форме, гладкости поверхности и размерам, даже соударение неэффективных частиц в потоке прокачиваемой жидкости не приведет к их сцеплению (и, следовательно, не произойдет образование агломерата, способного перекрыть межискровую зазор).

Эффективными частицами шлама могут называться частицы, имеющие размеры, равные или превышающие половину величины межэлектродного промежутка (25 мкм и более) или имеющие несферическую форму (рис. 6а, б, в). Размеры таких частиц невозможно задать одним лишь параметром, как в случае с частицами сферической формы (диаметр), их необходимо описывать несколькими параметрами.

Эффективные частицы шлама способны объединяться друг с другом, образуя более крупные агломераты из-за неровностей своей поверхности. Частицы, имеющие сферическую форму и размеры, равные или превышающие половину величины межискрового зазора, способны перекрыть межискровую промежуток, особенно, когда амплитуда колебания проволоки достигает половины межискрового промежутка [17].

Таким образом, приведенная классификация частиц шлама позволяет определить потенциально

опасные частицы, учитывая их способность к образованию мостиков сварки, которые, в свою очередь, вызывают короткое замыкание, обуславливающее обрыв проволоки.

Выводы и заключение

На основании полученных данных растровой электронной микроскопии и лазерного дифракционного анализа возможно сделать следующие выводы:

1. Средние значения размеров составили $25,04 \pm 5,26$ мкм для частиц шлама, собранного со стола, и $20,97 \pm 15,10$ мкм — для частиц шлама, собранного со дна ванны. Размеры частиц, определенные методом лазерного дифракционного анализа, варьируются от 0,1 мкм до 250 мкм. Размеры частиц, идентифицированные методом растровой электронной микроскопии, согласуются с данными распределения частиц по размерам, полученными методом лазерного дифракционного анализа.

2. Относительная доля эффективных частиц, обладающих критическими размерами (более 25 мкм) и наиболее вероятно способствующих образованию мостика сварки, составляет 35 % (для частиц шлама, собранного со стола) и 45 % (для частиц шлама, собранного со дна ванны).

3. Результаты анализа элементного состава частиц шлама, собранного со стола и со дна ванны, соответствуют материалу латунной проволоки (Cu — 65 %, Zn — 35 %), используемой в качестве электрода-инструмента.

Проведенные исследования гранулометрического состава и морфологии частиц шлама позволят в дальнейшем определить механизм формирования мостика сварки при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке. Более того, анализ элементного состава частиц позволит определить электро- и теплопроводность мостика, необходимых для прогнозирования распределения температуры и энергии в проволочном электроде-инструменте при плавлении мостика сварки в условиях короткого замыкания.

Список источников / References

1. Obara H. Detection of Discharging Position in Wire EDM. *ISEM 10th*, 1992. 1992;404. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573105974921743872>.
2. Obara H. An attempt to detect wire temperature distribution during wire EDM. *Proc. of ISEM-11*. 1995;67. <https://doi.org/10.2526/jseme.28.21>.
3. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M. Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. *CIRP Annals*. 2005;54(2):64–87. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60020-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60020-1).
4. Dekeyser W., Snoeys R., Jennes M. A thermal model to investigate the wire rupture phenomenon for improving performance in EDM wire cutting. *Journal of Manufacturing Systems*. 1985;4(2):179–190. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(85\)90024-X](https://doi.org/10.1016/0278-6125(85)90024-X).

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. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.04.009>.

6. Kumar R., Singh I. Productivity improvement of micro EDM process by improvised tool. *Precision Engineering*. 2018;51:529–535. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.10.008>.

7. Kunieda M., Yanatori K. Study on Debris Movement in EDM Gap. *International Journal of Electrical Machining*. 1997;2:43–49.

8. Dong L., Zhigang L., Yiqing W. [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. <https://doi.org/10.3901/JME.2017.21.200>.

9. 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. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0959-9>.

10. Tanjilul M., Afzaal Ahmed, Senthil Kumar A. [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. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.016>.

11. Wang J., Sánchez J. A., Wang Z. [et al.]. Observations on debris composition and size distribution in WEDM. *Procedia CIRP*. 2020;95:331–336. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.323>.

12. Iwai H., Ebisu T., Okada A. [et al.]. Influence of nozzle jet flushing on working fluid flow and wire electrode in trim-cut WEDM. *Procedia CIRP*. 2020;95:250–254. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.267>.

13. Fujimoto T., Okada A., Okamoto Y. [et al.]. Optimization of nozzle flushing method for smooth debris exclusion in wire EDM. *Key Engineering Materials*. 2012;516:73–78. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.516.73>.

14. 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*. 2009;58(1):209–212. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.003>.

15. Yoshida M., Kunieda M. Study on the distribution of scattered debris generated by a single pulse discharge in EDM process. *International Journal of Electrical Machining*. 1998;3:39–47.

16. Fedorov A. A., Linovsky A. V., Morgunov A. P. The influence of steel 35 wire EDM parameters on the surface roughness and morphology. *Journal of Mechanical Engineering*. 2017;14(2):37–49. EDN: UYСJHE.

17. Zhang G., Li H., Zhang Zh. [et al.]. Vibration modeling and analysis of wire during the WEDM process. *Machining Science and Technology*. 2016;20(2):173–186. <https://doi.org/10.1080/10910344.2015.1085312>.

Вклад авторов:

Ю. О. Бредгауэр. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, проведение лабораторных исследований на проволочном электроэрозионном станке Sodick VZ 300L, анализ результатов исследования, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

А. А. Федоров. Проведение лабораторных исследований на проволочном электроэрозионном станке Sodick VZ 300L, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

Д. А. Полонянкин. Проведение лабораторных исследований частиц шлама методами растровой электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и лазерного дифракционного анализа, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

Authors' contribution:

Iuliia O. Bredgauer. Setting research goal and objectives, analysing the state of the issue, conducting laboratory research on a Sodick VZ 300L wire electrical discharge machine, analysing research results, formulating conclusions, preparing the text of the article.

A. A. Fedorov. Conducting laboratory research on a Sodick VZ 300L wire electrical discharge machine, analysing research results, preparing the text of the article.

D. A. Polonyankin. Conducting laboratory studies of debris particles using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy and laser diffraction analysis, analysing the results of the study, preparing the text of the article.

Информация об авторах:

БРЕДГАУЭР Юлия Олеговна, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 8551-8356

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0267-8179>

AuthorID (SCOPUS): 57208868308

ResearcherID: ABF-3261-2020

e-mail: jobredgauer@omgtu.ru

ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4626-9660

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6681-087X>

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

e-mail: aafedorov@omgtu.ru

ПОЛОНЯНИН Денис Андреевич, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8251-9838

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6799-3105>

AuthorID (SCOPUS): 57201867901

ResearcherID: B-3236-2014

e-mail: dapolonyankin@omgtu.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 17.11.2025; одобрена после рецензирования 24.04.2026; принята к публикации 15.05.2026.

Information about the authors:

BREDGAUER Iuliia Olegovna, Senior Lecturer of the Mechanical Engineering Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 8551-8356

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0267-8179>

AuthorID (SCOPUS): 57208868308

ResearcherID: ABF-3261-2020

e-mail: jobredgauer@omgtu.ru

FEDOROV Aleksey Arkad'yevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4626-9660

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6681-087X>

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

e-mail: aafedorov@omgtu.ru

POLONYANKIN Denis Andreevich, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 8251-9838

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6799-3105>

AuthorID (SCOPUS): 57201867901

ResearcherID: B-3236-2014

e-mail: dapolonyankin@omgtu.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 17.11.2025; approved after reviewing 24.04.2026; accepted for publication 15.05.2026.