

**COMPARATIVE ANALYSIS OF CRATERS FORMED
ON CATHODE AND ANODE SPOTS OF A SPARK DISCHARGE
IN AIR ON IRON ELECTRODES**

*Artyom Dmitrievich Maksimov^{1a}, Evgeny Iosifovich Azarkevich¹,
Igor Valentinovich Beketov^{1,2}, Dianna Sergeyevna Koleukh¹*

¹ Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Amundsen str. 106, 620016, Yekaterinburg, Russia

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Mira str. 19, 620002, Yekaterinburg, Russia

^a a.d.maksimov1415@gmail.com

ABSTRACT

The article describes the procedure for fast processing of images of electrode spots of an oscillatory and unipolar spark discharge on a flat surface of an iron electrode in an atmosphere of air. The images were taken using a NewView 5010 surface analyzer (interference microscope). Crater diameters were measured using a program for measuring the particle size of nanopowders. A comparative statistical analysis of the distributions of diameters was carried out using tests for comparing samples, as well as analysis of variance procedures included in the Excel soft package. The spot number (i.e. discharge energy) and experimental conditions (cathode, anode, oscillatory discharge) were as factors. It is shown that the parameters of the crater diameter distribution weakly or even insignificantly depend on the capacitor energy. At the same time, they very significantly depend on the discharge conditions. It is also shown that the maximum relief heights and crater depths in the case of an oscillatory discharge are several times higher than their values for a unipolar discharge.

KEYWORDS

Electric discharge; electrode spot; craters; interference microscope; data analysis; statistical characteristics.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРАТЕРОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ
НА КАТОДНЫХ И АНОДНЫХ ПЯТНАХ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА
В ВОЗДУХЕ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ**

*Арте́м Дми́триевич Макси́мов^{1a}, Евге́ний Ио́сифович Аза́ркевич¹,
Иго́рь Вале́нтинович Беке́тов^{1,2}, Ди́анна Серге́евна Колеу́х¹*

¹ Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

^a a.d.maksimov1415@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В статье описывается процедура быстрой обработки снимков электродных пятен колебательного и униполярного искрового разряда на плоскую поверхность железного электрода в атмосфере воздуха. Снимки сделаны с помощью интерференционного микроскопа – анализатора поверхности NewView 5010. Диаметры кратеров измерялись с помощью программы для измерения размера частиц нанопорошков. Производился сравнительный статистический анализ распределений диаметров с использованием тестов сравнения выборок, а также дисперсионного анализа, входящих в пакет Excel. В качестве факторов служили энергия разряда (номер пятна) и условия опыта (катод, анод, колебательный разряд). Показано, что характеристики распределения диаметров кратеров слабо или даже незначимо зависят от энергии конденсатора. В то же время они весьма значимо зависят от условий разряда. Показано также, что максимальные высоты рельефа и глубины кратеров в случае колебательного разряда в несколько раз превышают их значения для униполярного разряда.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электрический разряд; электродное пятно; кратеры; интерференционный микроскоп; обработка данных; статистические характеристики.

Введение

Среди физических методов получения наночастиц есть целая группа методов испарения-конденсации. Сюда относятся, в частности, абляция лучом лазера [1], электронным пучком [2], электрический взрыв проводников [3]. Последние два десятка лет развивается метод искрового разряда. Опубликован ряд обзорных статей по этому методу [4–6], а также монография [7]. Лаборатория авторов также развивает этот метод [8–10]. Важным преимуществом метода по сравнению с другими является высокая чистота и малый размер частиц (порядка 10 нм) получаемых нанопорошков. Механизмом образования наночастиц является эрозия электродов под действием тока искрового разряда. Одним из условий развития метода и увеличения его производительности является дальнейшее исследование эрозии электродов.

Эрозия электродов изучалась главным образом в целях усовершенствования контактов сильноточных электрических аппаратов [11]. Как сопутствующий процесс она изуча-

лась при исследовании катодных и анодных пятен искрового и дугового разряда, обычно в вакууме [12–18]. Специально эрозии посвящена работа [19].

Под действием разряда на электроде образуется разрядное пятно, представляющее собой систему кратеров, разделенных валами. Поверхность разрядного пятна изучалась, как правило, с помощью оптических и растровых электронных микроскопов. Но они дают недостаточную информацию о глубине кратеров. Профиль достаточных больших кратеров изучался с помощью механических профилометров [11, 13]. Построение объемной картины кратера производилось с помощью стереоскопического микроскопа [19, 17]. Но это довольно трудоемкая работа. Следует также отметить, что с целью изучения механизмов образования кратеров эксперименты обычно проводились при небольших импульсных токах, до 100 А, когда образуются единичные кратеры. В условиях производства нанопорошков используются сильноточные разряды,

порядка 10^4 А, когда пятно содержит сотни кратеров. В этом случае перечисленные методы просто непригодны.

Возможность исследования поверхности электродов при сильноточных разрядах возникла с появлением в широком доступе приборов, основанных на принципе интерференционного микроскопа. В данной работе мы получали снимки пятен разрядов с помощью анализатора поверхности NewView 5010 [20]. Получение выборок диаметров кратеров по снимкам осуществлялась с помощью программы измерения частиц нанопорошков по фотографиям. Полученные выборки подвергались статистическому анализу в программном пакете Excel с применением пакета анализа данных. В работе описывается процедура получения выборок диаметров кратеров и результаты их статистического исследования. Попутно излагаются предварительные результаты анализа высотных характеристик разрядных пятен.

1. Методика проведения эксперимента

Исследование пятен искровых разрядов проводилось на экспериментальной установке синтеза наночастиц, подробнее описанной в [8, 10]. Была проведена серия одиночных импульсных разрядов в воздухе на плоскую поверхность электродов из стали Ст3. Поверхность электродов полировалась. Среднеарифметическое отклонение профиля по ГОСТ 2789-73 [21] на случайно выбранном участке поверхности составило $Ra = 0,054$ мкм.

Цепь разряда представляла собой колебательный *LCR*-контур. Параметры разрядного контура: емкость 0,1 мкФ (конденсатор ИК-100-0,1), период тока 1,6 мкс, декремент затухания 1,45. На электрод производились че-

тыре разряда при зарядных напряжениях 10, 13, 16 и 19 кВ, что соответствует запасенной энергии 5, 8,5, 13 и 18 Дж. Длина разрядного промежутка составляла 2 мм. Датчиком тока служил пояс Роговского, сигнал которого через делитель напряжения и кабель регистрировался цифровым осциллографом Tektronix TDS1012 [22]. Сигнал тока вычислялся путем интегрирования сигнала датчика в компьютере.

Кроме колебательного импульса, с целью сравнительного изучения эрозии анода и катода, на электрод производились серии униполярных разрядов при тех же четырех уровнях напряжения. Для этого в цепь включался графитовый резистор с сопротивлением, близким к критическому. Далее эти подразделения: катод, анод, колебательный разряд (КР) мы будем называть условиями опыта.

Для сравнения с данной работой привлекались также результаты аналогичной работы 2018 года [23]. Она отличалась тем, что разряды колебательного контура производились на полированную боковую поверхность цилиндрического электрода из стали Ст3. Длина разрядного промежутка составляла 12 мм. Было создано 4 пятна при уровнях запасенной энергии конденсатора от 12 до 44 Дж.

2. Методика первичной обработки данных

На электродах оставались следы разряда – электродные пятна диаметром 1–2 мм, по 4 пятна на электроде. Общий вид пятен фотографировался на оптическом микроскопе Olympus с увеличением $5\times$ и $10\times$. На рис. 1 показано изображение пятен колебательного разряда (КР).

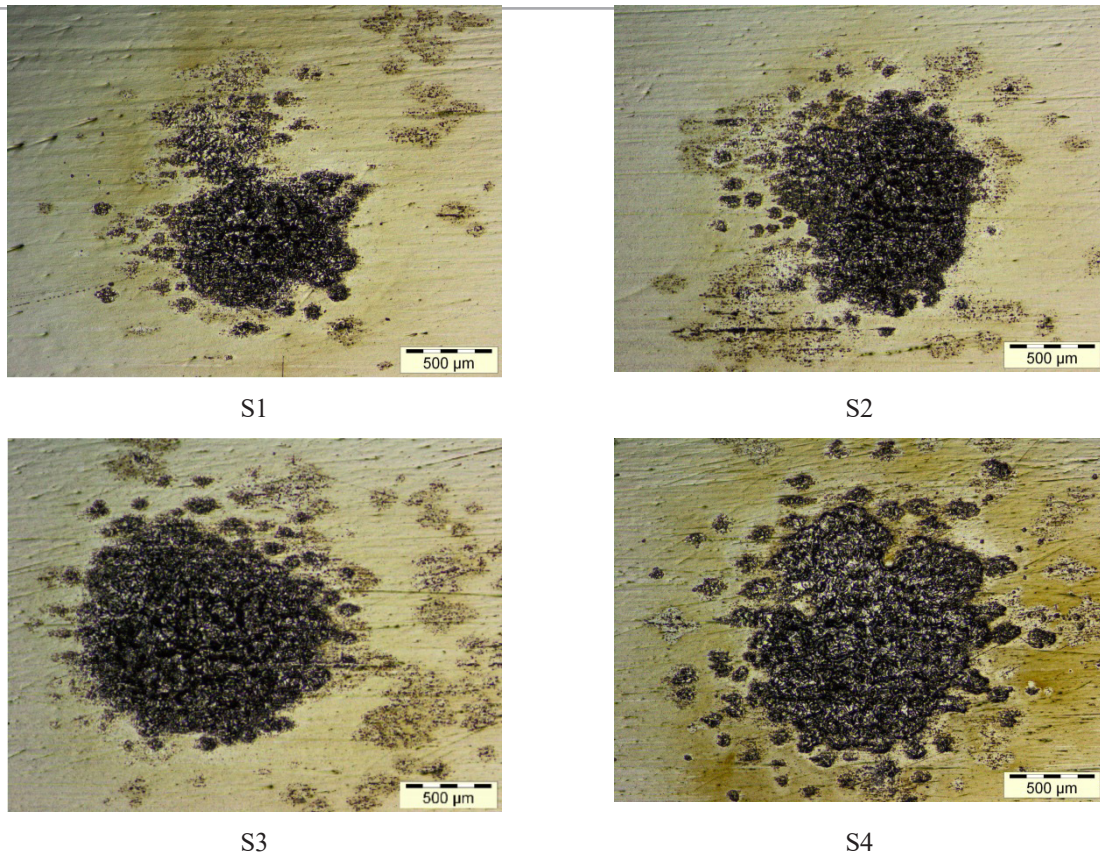


Рис. 1. Оптические снимки разрядных пятен от четырех разрядов в порядке возрастания зарядного напряжения

Fig. 1. Optical images of discharge spots from four discharges in ascending order of charging voltage

Площади пятен определялись путем построения в графическом редакторе маски, покрывающей область компактного расположения ячеек пятна. Площадь этой маски подсчитывалась по числу и размеру пикселей. В табл. 1 приведены значения площади пятна и средней по пятну плотности тока в момент первого максимума тока при ука-

занных зарядных напряжениях для опыта КР. Как видно, площадь пятна возрастает с ростом напряжения, причем так, что средняя плотность тока остается примерно постоянной. Регрессионный анализ модели линейной зависимости плотности тока от зарядного напряжения показал отсутствие такой зависимости.

Таблица 1. Площадь пятна и плотность тока в зависимости от зарядного напряжения

Table 1. Spot area and current density as a function of charging voltage

Номер пятна/ Spot number	Зарядное напряжение, кВ/ Charging voltage, kV	Площадь пятна, мм ² / Spot area, mm ²	Плотность тока, кА/мм ² / Current density, kA/mm ²
S1	10	1,13	3,17
S2	13	1,31	3,56
S3	16	1,75	3,28
S4	19	2,12	3,22

Более детально электродные пятна исследовались с помощью анализатора структуры поверхности NewView 5010 фирмы Zygo (США) [20]. Из имеющихся интерферометрических объективов применялись объективы Миро (Mira) кратностью $20\times$ или $10\times$. С помощью внутренней оптики микроскопа для каждого объектива обеспечивается 6 ступеней масштаба (Zoom): от 0,4 до 2,0. Это дает возможность съемки участков исследуемой поверхности от $1,75\times 1,31$ до $0,17\times 0,13$ мм. Наиболее характерным преимуществом интерференционного микроскопа является высокое разрешение по вертикали – до 3 нм в условиях настоящей работы [20]. На каждое пятно делалось от 3 до 8 снимков таким образом, чтобы они частично перекрывали друг друга и по возможности охватывали большую часть площади пятна.

Программное обеспечение микроскопа создает для каждого снимка выходной файл данных, содержащий матрицу высот рельефа размером 640×480 пикселей. На монитор выводится изображение, содержащее карту высот в цветовой кодировке, 3D график рельефа и профиль высот по выбранному сечению. Высоты на графиках отсчитываются от базовой плоскости, построенной по имеющимся данным методом наименьших квадратов.

В выходном файле имеется некоторая доля точек, для которых прибор NewView не может определить высоты. Доля пропусков в типичном случае составляет до 10–15% от всех точек, но иногда и больше. Обычно пропуски данных принадлежат крутым склонам рельефа (наклон поверхности более $14\text{--}18^\circ$). Такая ситуация является штатной для данного прибора [20]. Они могут быть вызваны и другими причинами: недостаточно тщательной фокусировкой объектива или настройкой параметров управления, а также, возможно, плохим оптическим качеством отдельных участков исследуемой поверхности. Как бы то ни было, они существуют. Кроме пропусков, встречаются и другие особенности данных, например острые выбросы.

Созданные нами программы обработки снимков в среде Mathcad и C++ [23, 24] позволяют воссоздать картину рельефа пятна, выделить отдельные кратеры и измерить их размеры, глубины, площади и объемы. Но работа в них довольно трудоемка: на обработку одного снимка может потребоваться 1–2 дня, а таких снимков только для железного электрода около 60. Поэтому полная обработка данных – задача на будущее. В настоящей же работе внимание уделено предварительной экспрессной обработке снимков, пусть даже менее точной и информативной.

Для быстрого измерения диаметров кратеров использовалась имеющаяся в нашем распоряжении программа измерения диаметров частиц нанопорошков по электронно-микроскопическим снимкам. Эта программа устанавливает масштаб снимка, интерактивно с помощью мыши рисует круг желаемого диаметра на месте выбранного объекта, сохраняет в файле диаметр круга, сохраняет фотографию с нарисованными кругами. В программе можно обработать последовательно несколько снимков (в том числе с разными масштабами) и записать результаты в один общий файл. Для измерений использовалась цветовая карта высот из выходного изображения микроскопа, потому что на ней картина кратеров и валов выглядит наиболее отчетливо. Типичный снимок масштаба 0,4 или 0,5 содержал 50–70 кратеров. При обработке нескольких снимков одного пятна следили за тем, чтобы не считать дважды один кратер на перекрывающихся снимках.

Кратеры не обязательно имеют круглую форму, поэтому возникает вопрос, что считать диаметром кратера. Для круглого кратера измерительный круг доводили до внутреннего контура вала. Для вытянутого кратера рисовали круг, на глаз равновеликий площади кратера. Пример снимка с нанесенными на него кругами приведен на рис. 2. На части снимка измерений нет, потому что она перекрывается с другим снимком, на котором эти кратеры учтены.

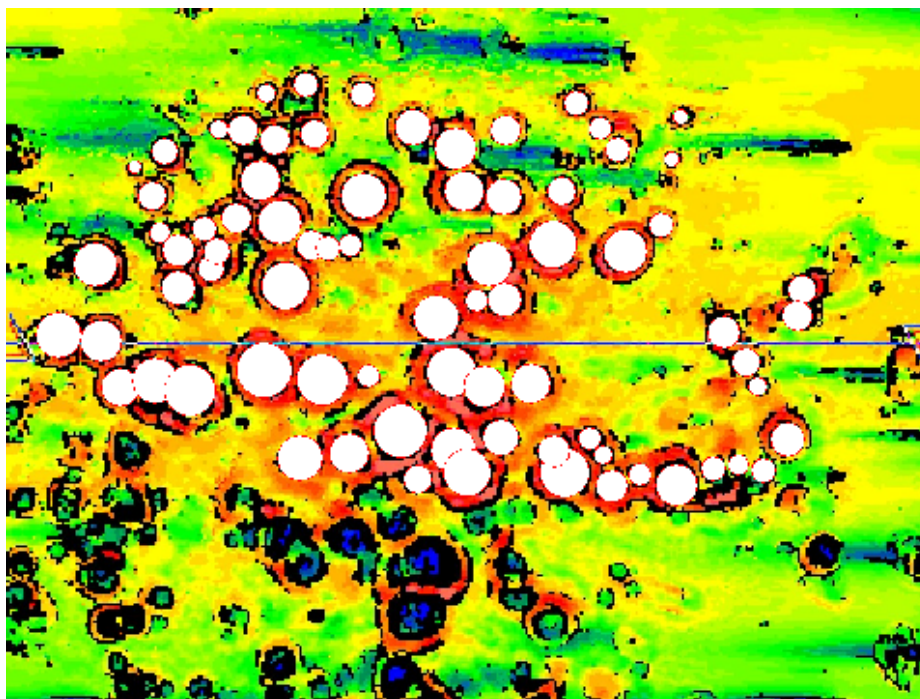


Рис. 2. Пример снимка с измеренными кратерами.
Условия: униполярный разряд, анод, пятно номер S3, снимок 09

Fig. 2. Sample image with measured craters.
Conditions: unipolar discharge, anode, spot number S3, shot 09

Всего обработано 60 снимков и получено 12 выборок диаметров: для трех условий разряда по 4 пятна для 4 уровней энергии. Выборки содержали от 81 до 547 диаметров, всего около 2600 значений. Кроме диаметров, снимки дают некоторую информацию о высотах и глубинах рельефа, которая будет обсуждена ниже, в разделе 4.

3. Статистический анализ выборочных данных

Поскольку диаметры кратеров в каждой выборке обладают значительным разбросом и представляют собой случайные величины, то сравнивать имеет смысл только параметры распределений выборок, а не параметры отдельных кратеров. Таким образом, приходим к необходимости статистического анализа данных.

Основной вопрос, который нас интересует: зависят ли какие-либо параметры выборок диаметров кратеров от влияющих факторов: от условий опыта, т.е. от формы импульса тока (колебательный или унипо-

лярный) и от полярности электрода (катод или анод), а также от номера пятна (или от энергии разряда). В статистике для решения подобных вопросов существует целый раздел – проверка статистических гипотез. Ей предшествует еще ряд этапов: описательная статистика и разведочный анализ; проверка выборок на нормальное распределение; проверка на однородность дисперсий; проверка на различие средних значений.

Статистическое исследование проводилось по большей части с использованием пакета «Анализ данных», входящего в программу Excel. Если его было недостаточно, то использовались также рекомендации и алгоритмы, описанные в [25, 26]; в этих случаях расчеты проводились с участием набора статистических функций Excel. Ниже кратко описываются результаты анализа данных в указанной выше последовательности.

Вычислялся обычный для пакета «Анализ данных» набор характеристик выборки: среднее, медиана, дисперсия, стандартное отклонение, минимум, максимум, размах.

По опыту работы [23] следовало ожидать, что выборки диаметров имеют логарифмически-нормальное распределение (ЛНР), следовательно, логарифмы диаметров должны иметь нормальное распределение (НР). Поэтому создавались выборки логарифмов (десятичных), и для них вычислялся тот же набор описательной статистики. Кроме того, вычислялись значения некоторых квантилей: 5, 25, 50, 75, 95%. В табл. 2 приведены два фрагмента данных описательной статистики: средние значения и стандартные отклонения

логарифмов диаметров. В дальнейшем они используются в тестах сравнения выборок и дисперсионного анализа.

В качестве разведочного анализа был построен график выборок с отмеченными на них значениями квантилей. По оси абсцисс откладывались условия эксперимента, а внутри каждого условия – номера пятен от 1 до 4. Дополнительно на графике приведены условия работы [23] (с обозначением Fe_2018). График приведен на рис. 3.

Таблица 2. Средние значения и стандартные отклонения логарифмов диаметров кратеров

Table 2. Mean values and standard deviations of logarithms of crater diameters

	Логарифмы диаметров кратеров (мм) / Log crater diameters (mm)			
	Катод / Cathode	Анод / Anode	Fe_2023	Fe_2018
Пятно / Spot	Среднее значение / Mean value			
S1	1,24	1,43	1,44	1,47
S2	1,35	1,45	1,45	1,51
S3	1,31	1,45	1,53	1,47
S4	1,37	1,45	1,52	1,55
	Стандартное отклонение / Standard deviation			
S1	0,137	0,143	0,167	0,176
S2	0,136	0,167	0,148	0,185
S3	0,121	0,156	0,174	0,193
S4	0,135	0,158	0,187	0,176

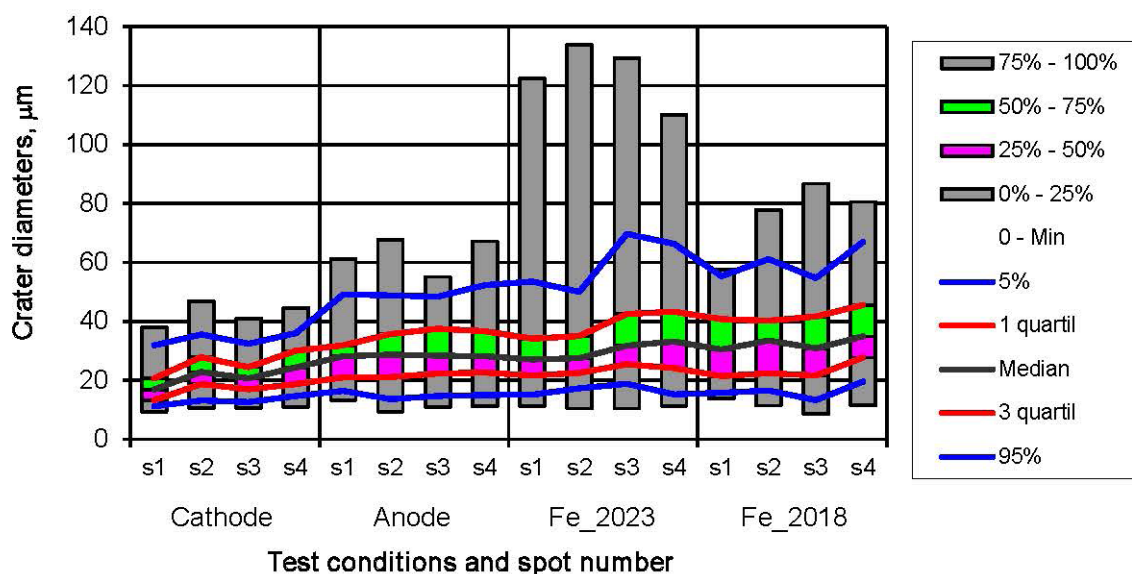


Рис. 3. График квантилей выборок диаметров кратеров

Fig. 3. Quantile plot of crater diameters samples

По этому рисунку можно сделать ряд предварительных качественных заключений о поведении распределений диаметров в зависимости от условий разряда.

1. Распределения диаметров характеризуются значительной асимметрией: они вытянуты в сторону больших диаметров. Диапазон четвертого квартиля (75–100%) превышает диапазон остальных квартилей, вместе взятых.

2. Средняя часть выборок (межквартильный интервал 25–75% с медианой в середине) почти не зависит от номера пятна и слабо зависит от условий разряда. Медиана и квартили несколько возрастают в порядке: катод – анод – КР.

3. Минимальные диаметры во всех выборках примерно одинаковы, около 10 мкм.

4. Заметное влияние условий имеет место на правом конце выборок, в области больших диаметров. Максимальный диаметр кратера на катоде составляет около 50 мкм, на аноде – 70 мкм, у КР он достигает 130 мкм.

5. Различие выборок между пятнами одного условия опыта значительно меньше, чем между условиями. Этот факт коррелирует с тем, что средняя плотность тока во всех пятнах примерно одинакова. То есть, при увеличении тока образуется больше кратеров и увеличивается площадь пятна, но сами кратеры не увеличиваются.

Проверка логарифмов диаметров на нормальное распределение проводилась в два этапа. Сначала проводится предварительная визуальная проверка на нормальность с помощью квантильного (вероятностного) графика, построение которого описано в [25]. На оси абсцисс откладываются логарифмы диаметров, а по оси ординат – квантили Q стандартного НР от выборочной функции распределения. Если распределение нормальное, то точки на графике ложатся вдоль прямой линии. На рис. 4 показаны такие графики для всех пятен колебательного разряда, от $S1$ до $S4$. Этот рисунок иллюстрирует степень близости распределений диаметров кратеров для разных пятен. Заметно, что графики отклоняются от прямой, но не очень сильно.

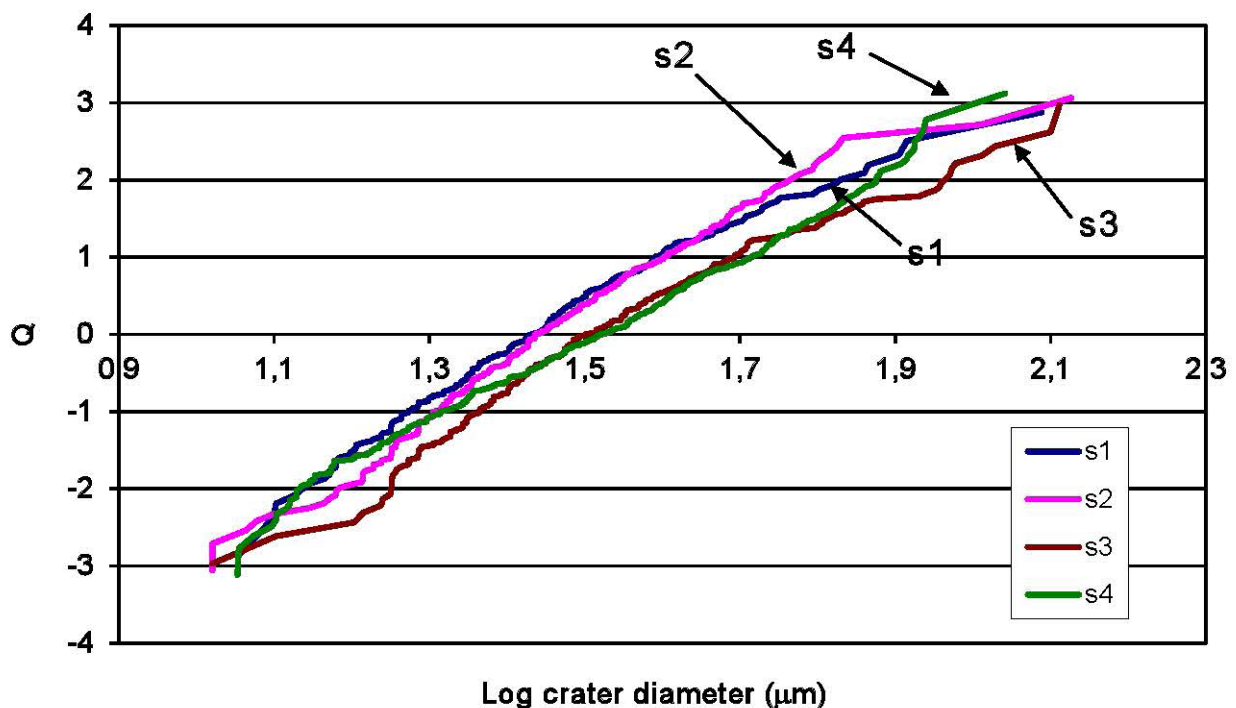


Рис. 4. Графики для визуального контроля нормальности распределений. Колебательный разряд

Fig. 4. Graphs for visual control of the normality of distributions. Oscillatory discharge

Более строгая проверка проводится по так называемым критериям согласия. Мы использовали два популярных критерия: критерий ω^2 (омега-квадрат) Мизеса–Крамера–Смирнова и критерий Колмогорова–Смирнова. Алгоритмы применения этих критериев приведены в [25, 26]. Они рекомендуются также в ГОСТ 11.006-74. Результаты проверки по всем условиям и пятнам (S1...S4) приведены в табл. 3. Здесь слово YES означает, что выборка не отклоняется от НР на принятом уровне значимости; слово NO – что отклоняется. Во всех расчетах был принят уровень значимости 10%.

По данным табл. 3 можно сделать следующие выводы. Только на двух выборках из 16 два теста дали разные результаты. В 8 случаях они оба отклонили гипотезу НР, а в 6 случаях не отклонили ее. Отклонение гипотезы НР происходит из-за влияния «хвостов» выборок. Лучше всего согласуются с НР выборки работы 2018 года, где определение диаметров происходило по результатам полной обработки файлов микроскопа. Наиболее отклоняются от НР выборки КР 2023 года. В итоге можно считать, что все выборки не слишком отклоняются от НР, и их можно использовать в дальнейших параметрических тестах, рассчитанных на нормальные выборки. Но к результатам этих

тестов надо будет относиться с известной осторожностью.

При сравнении или дисперсионном анализе выборок предполагается, что они имеют одинаковые дисперсии. Поэтому очередной этап обработки данных – проверка выборок на однородность (одинаковость) дисперсий. Сравнение будем проводить для всех пятен в пределах каждого условия опыта. Во всех дальнейших тестах был принят уровень значимости 5%.

В пакете «Анализ данных» имеется тест Фишера (F-тест) только для сравнения дисперсий двух выборок. В случае нескольких выборок нужно проводить попарное сравнение для всех их сочетаний. Кроме двухвыборочных, имеются (но не в Excel) тесты для сравнения сразу нескольких выборок. Наиболее рекомендуемый из них – критерий Бартлетта ([26], с. 417). Были применены оба теста. Они дали одинаковые результаты. Оказалось, что для катода, анода и опыта 2018 года выборки всех пятен однородны по дисперсиям. Для КР 2023 года дисперсии оказались различными. Сильнее отличается от других выборка пятна 2. Во всех случаях статистика теста близка к критическому значению, так что с некоторой натяжкой выборки можно подвергать дальнейшему исследованию.

Таблица 3. Результаты проверки выборок на нормальность распределения

Table 3. Results of testing samples for normal distribution

Критерий / Criterion	Катод / Cathode				Анод / Anode			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
ω^2	NO	NO	YES	NO	NO	YES	YES	YES
Колмогорова / Kolmogorov	NO	NO	YES	NO	NO	NO	YES	YES
	Fe_2023				Fe_2018			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
ω^2	NO	NO	NO	YES	YES	YES	NO	YES
Колмогорова / Kolmogorov	NO	NO	NO	NO	YES	YES	NO	YES

После предыдущих исследований можно приступать к нашему основному вопросу: существует ли зависимость каких-либо параметров выборок кратеров от влияющих факторов, указанных выше? В качестве величины, характеризующей воздействие разряда на поверхность электрода, мы примем среднее значение логарифма диаметра кратера, он же логарифм среднегеометрического диаметра. В качестве влияющих факторов примем номер пятна и условия опыта. Поиск зависимости сводится к задаче проверки гипотез. Нулевая гипотеза, как обычно, утверждает отсутствие различия средних значений выборок. Уровень значимости в этих тестах был принят 5%.

Сначала проведем сравнение средних для разных пятен одного условия опыта. Оно производится в процедуре «Однофакторный дисперсионный анализ» пакета «Анализ данных». Принцип ее работы описан в [25, 26]. Результаты таковы. Для анода и опыта 2018 года средние не различаются на принятом уровне значимости, т.е. нет зависимости от номера пятна. Для катода и КР есть значимая зависимость среднего от номера пятна.

После этого проводится двухфакторный дисперсионный анализ, в котором выборки проверяются на наличие их зависимости от условий опыта как главного фактора и номера пятна как дополнительного фактора. Сначала анализу подвергался только набор средних значений, помещенный в табл. 2. Результаты таковы. В основном варианте (три условия – катод, анод и КР) не выявлена зависимость от номера пятна. Но зависимость от условия установлена четко. Сравнение данных катода и анода также не выявляет зависимость от номера пятна, но обнаруживает зависимость от условия.

Следующим этапом проводился двухфакторный анализ выборок. В процедуре Excel выборки должны иметь одинаковый объем. Поэтому перед анализом производилось сокращение выборок случайным образом

до минимального объема – 81 значение. Для этого в Excel содержится специальная процедура. Сокращенные выборки проверялись на репрезентативность, т.е. на одинаковость дисперсий и средних значений с исходными выборками.

Дисперсионный анализ проводился в двух вариантах: первый – для трех условий опыта и второй – для анода и катода. В обоих вариантах выявилась очень четкая и значимая (на уровне значимости порядка 10^{-46} – 10^{-28}) зависимость среднего значения выборок от условия опыта. Зависимость от номера пятна также имеется, но довольно слабая, на грани уровня значимости.

4. Высоты, глубины и плотность расположения кратеров

Кроме диаметров, снимки микроскопа дают некоторую количественную информацию о высотах и глубинах рельефа. Вместе с изображением выводятся рассчитанные параметры: максимальный перепад высот (PV), максимальные высоты и глубины, среднее квадратическое (rms) и среднее арифметическое (Ra) отклонения высот по всей площади снимка. Для каждого пятна мы отбирали максимальные значения по всем снимкам, относящимся к данному пятну. Оценивалась также плотность расположения кратеров на участках снимков с их компактным расположением. На рис. 5 показаны перепады высот, глубины кратеров и среднеквадратические отклонения высот в зависимости от условий опыта, усредненные по всем пятнам.

Как видно, высотные характеристики колебательного разряда (Fe_2023) примерно в 4–5 раз превышают характеристики униполярного импульса (анод и катод). Характеристики опыта 2018 года занимают промежуточное положение. Таким образом, наибольшее отличие КР от униполярного импульса заключается в глубине проплавления электрода, в то время как диаметры кратеров различаются сравнительно мало.

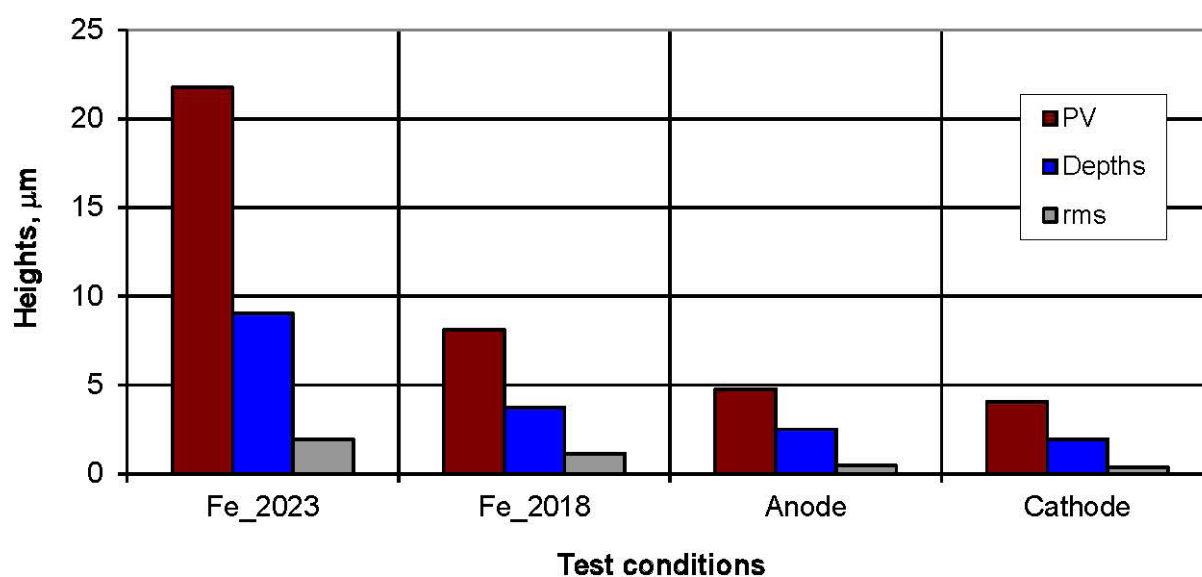


Рис. 5. Усредненные по пятнам перепады высот (PV), глубины кратеров и среднеквадратичные отклонения высот (rms) в зависимости от условий опыта

Fig. 5. Spot-averaged height differences (PV), crater depths, and root-mean-square height deviations (rms) depending on experimental conditions

Плотность расположения кратеров усреднялась по всем снимкам одного пятна. Полученные значения подвергались двухфакторному дисперсионному анализу по условиям опыта и номерам пятен. Анализ показал отсутствие значимой зависимости плотности кратеров от влияющих факторов. Это не значит, что она действительно отсутствует, а означает только недостаточность наших данных и их большой разброс. Средняя плотность кратеров оказалась равной 320 ± 60 кратеров/мм² (вторая цифра – среднеквадратическое отклонение). Если расположить эти кратеры по узлам квадратной сетки, то среднее расстояние между ними будет равно 56 мкм.

Выводы

В представленной работе проведено предварительное исследование поверхности электродных пятен искрового разряда на железном электроде в условиях, близких к условиям получения нанопорошков. По снимкам интерференционного микроскопа проведено измерение диаметров кратеров в 16 разрядных пятнах. Проведен статистический

анализ выборок диаметров. Выяснено, что распределение выборок удовлетворительно описывается логарифмически-нормальным распределением. По данным дисперсионного анализа, средние значения логарифмов диаметров зависят прежде всего от условий эксперимента (колебательный или униполярный разряд, электрод является анодом или катодом). Значительно слабее они зависят от запасенной энергии конденсатора. Изменение запасенной энергии ведет к изменению площади пятна, причем таким образом, что средняя плотность тока через пятно остается примерно постоянной. Плотность расположения кратеров не зависит значимо от условий эксперимента. Униполярный разряд отличается от колебательного прежде всего меньшей глубиной проплавления поверхности электрода. Катод отличается от анода несколько меньшими средним диаметром и глубиной кратеров.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 21-79-10394.

The research was carried out with financial support of Russian Science Foundation (RSF), grant No. 21-79-10394.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Osipov V. V., Kotov Yu. A., Ivanov M. G., Samatov O. M., Lisenkov V. V., Platonov V. V., Murzakaev A. M., Medvedev A. I., Azarkevich E. I. Laser Synthesis of Nanopowders // *Laser Physics*. 2006. V. 16, Iss. 1. P. 116–125. DOI: 10.1134/S10546660X06010105.
2. Соковнин С. Ю., Ильвес В. Г. Применение импульсного электронного пучка для получения нанопорошков некоторых оксидов металлов. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2011. 318 с.
3. Котов Ю. А. Электрический взрыв проволоки – метод получения слабоагрегированных нанопорошков // *Российские нанотехнологии*. 2009. № 4 (1–2). С. 40–51.
4. Pfeiffer T. V., Feng J., Schmidt-Ott A. New developments in spark production of nanoparticles // *Advanced Powder Technology*. 2014. V. 25, Iss. 1. P. 56–70. DOI: 10.1016/j.apt.2013.12.005.
5. Feng J., Biskos G., Schmidt-Ott A. Toward industrial scale synthesis of ultrapure singlet nanoparticles with controllable sizes in a continuous gas-phase process // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. Article number 15788. DOI: 10.1038/srep15788.
6. Иванов В. В., Ефимов А. А., Мыльников Д. А., Лизунова А. А., Багазеев А. В., Бекетов И. В., Щербинин С. В. Высокопроизводительное получение наноразмерных частиц в импульсно-периодическом многоазорном газоразрядном генераторе // *Письма в ЖТФ*. 2016. № 42, № 16. С. 95–101. DOI: 10.1134/S106378501608023X.
7. Schmidt-Ott A. (ed.) *Spark ablation: Building blocks for nanotechnology*. Jenny Stanford Publishing Pte. Ltd., 2020. P. 456.
8. Maksimov A. D., Beketov I. V., Bagazeev A. V., Azarkevich E. I., Medvedev A. I., Cholah S. O., Murzakaev A. M. Preparation of metal oxide nanopowders by the spark discharge method // *AIP Conference Proceedings*. 2019. V. 2174, Iss. 1. Article number 020037. DOI: 10.1063/1.5134188.
9. Rhee C. K., Maksimov A. D., Beketov I. V., Medvedev A. I., Murzakaev A. M. Features of nickel nanoparticles structure synthesized by the spark discharge method // *J. Korean Powder Metall. Inst.* 2020. V. 27, Iss. 6. P. 464–467. DOI: 10.4150/KPMI.2020.27.6.464.
10. Максимов А. Д., Бекетов И. В., Медведев А. И., Мурзакаев А. М., Фаренбрух С. А. Получение нанопорошка оксида олова методом искрового разряда с управляемым средним размером частиц // *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, 2022. С. 485–488. DOI: 10.56761/EFRE2022.S4-P-050101.
11. Буткевич Г. В., Белкин Г. С., Ведешенков Н. А., Жаворонков М. А. *Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов*. М.: Энергия, 1978. 256 с.
12. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
13. Любимов Г. А., Раховский В. И. Катодное пятно вакуумной дуги // *Успехи физ. наук*. 1978. Т. 125, № 4. С. 665–706.
14. Раховский В. И. *Физические основы коммутации электрического тока в вакууме*. М.: Наука, 1970. 536 с.
15. Балановский А. Е. Структура катодного пятна сварочной дуги с неплавящимся электродом // *Теплофизика высоких температур*. 2018. Т. 56, № 1. С. 3–13. DOI: 10.7868/S0040364418010015.
16. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. *Импульсный электрический разряд в вакууме*. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
17. Месяц Г. А. *Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга*. М.: Наука, 2000. 424 с.
18. Voxman R. L., Sanders D. M., Martin P. J. (eds.) *Handbook of vacuum arc: Science and technology*. Park Ridge: Noyes Publications, 1995. P. 742.
19. Daalder J. E. *Cathode erosion of metal vapour arcs in vacuum*. Eindhoven: Tech. Univ., 1978. DOI: 10.6100/IR22411.
20. ZYGO. URL: <https://www.zygo.com>
21. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 01.01.1975. М.: Стандартинформ, 2005. 6 с.
22. Tektronix. URL: <https://www.tektronix.com>
23. Бекетов И. В., Багазеев А. В., Азаркевич Е. И., Колеух Д. С. Исследование электродных пятен от искрового разряда с помощью интерференционного микроскопа // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2018. Т. 61, № 9/2. С. 161–165.
24. Максимов А. Д., Азаркевич Е. И., Бекетов И. В., Колеух Д. С. Разработка методики коррекции снимков электродных пятен, полученных анализатором структуры поверхности NewView 5010 // *Физика. Технологии. Инновации: тезисы докладов X Международной молодежной научной конференции, посвященной 120-летию со дня рождения академиков И. В. Курчатова и А. П. Александрова (Екатеринбург, 15–19 мая 2023 г.)*. Екатеринбург: АМБ, 2023. С. 398–399.
25. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. *Анализ данных на компьютере*. Изд. 3-е. М.: ИНФРА-М, 2002. 528 с.
26. Кобзарь А. И. *Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.