

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭРОЗИИ АЛЮМИНИЕВЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ГРАНУЛ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ В РЕАКТОРЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКОЙ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Введение. Исследования электрофизических и технологических аспектов электрического разряда в реакторах с гранулированной металлозагрузкой ведутся на протяжении последних десятилетий. Основная тематика работ – электроэрозионная обработка токопроводящих материалов с целью получения высокодисперсных состояний, но есть и работы, посвященные другим областям применения метода объемной электроискровой обработки (ОЭИО)) гетерогенных токопроводящих сред (ГТПС) в промышленности. К настоящему времени для конкретных условий опыта установлен ряд закономерностей, характеризующих зависимость интенсивности процесса эрозионного съема, других параметров от таких факторов, как электрические характеристики импульсов (длительность, di/dt , частота, амплитуда), геометрические параметры реактора электроэрозионного диспергирования (РЭД), фракционного состава слоя и т.п. [1–3]. Однако адекватной физической модели процессов, происходящих как в контактной зоне разряда, так и во всем разрядном промежутке в целом, пока не создано. Нет также и электродинамической модели процессов в цепи с такой существенно нелинейной нагрузкой, которая могла бы позволить создать набор критериев подобия для априорного выбора параметров разрядного контура и загрузки в каждом конкретном случае. Учитывая многофакторность явления, прогрессу в этом направлении может способствовать накопление массива данных, полученных экспериментальным путем в различных условиях проведения опытов.

Цель работы – проведение экспериментальных исследований особенностей высоковольтного объемного искрового разряда в реакторе с гранулированной алюминиевой и железной металлозагрузкой для дальнейшего использования полученных результатов при изучении характеристик конкретного технологического процесса, базирующегося на этом явлении. Задачей исследований являлось установление характера зависимости величины эрозионного съема металлов от различных параметров контура и загрузки.

Методика эксперимента. В качестве металлозагрузки использовались гранулы алюминия (сплав, марка АМц) и железа (сталь, марка ст. 0,8) цилиндрической формы. Эксперименты проводились с четырьмя наборами гранул (по два для каждого из металлов), размеры которых (высота и диаметр совпадали) составляли 4 и 8 мм. Рабочей средой в реакторе служила дистиллированная вода с начальным удельным сопротивлением $\rho_{ж} \approx 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

В состав экспериментального стенда входили электрическая система, включающая силовую и измерительные цепи, и разрядная камера (РЭД). Силовая цепь состояла из автотрансформатора, трансформатора–выпрямителя, зарядного сопротивления, емкостного накопителя энергии, коммутатора (воздушный разрядник). Измерительный комплекс включал в свой состав осциллограф универсальный запоминающий С 8-17, прибор счетный одноканальный ПС 02-08, генератор импульсов Г 5-56, киловольтметр С196. В качестве электрических датчиков применялись емкостный делитель напряжения и малоиндуктивный коаксиальный шунт. Количество импульсов (в среднем от 2000 до 10000 в каждом опыте) регистрировалось прибором счетным одноканальным ПС 02-08.

Реактор электроэрозионного диспергирования из оргстекла имел прямоугольную форму, длина камеры составляла $5,0 \cdot 10^{-1}$ м, ширина – $1,5 \cdot 10^{-2}$ м, высота – $2 \cdot 10^{-1}$ м, плоские электроды устанавливались в торцах, в более узкой части, по всей ширине реактора. Длина межэлектродного промежутка (как и высота слоя загрузки) могла варьировать в широком диапазоне. Индуктивность контура

L в разных опытах варьировала от $1,2 \cdot 10^{-6}$ до $1,5 \cdot 10^{-6}$ Гн, напряжение на конденсаторной батарее U – от $0,5 \cdot 10^3$ до $15 \cdot 10^3$ В, емкость конденсаторной батареи C – от $0,25 \cdot 10^{-6}$ до $2,7 \cdot 10^{-6}$ Ф. Диапазон изменения параметров контура и загрузки выбирался таким, чтобы по возможности выйти на оптимальные с точки зрения количества параметры эродировавшего металла и удельных энергозатрат. Критерием оптимальности выступало согласование общего сопротивления разрядной цепи с динамическим сопротивлением нагрузки. Экспериментально исследовалась зависимость массы эродировавшего металла m и удельных энергозатрат $E_{уд}$ от параметров контура (U , C , L) и характеристик металлозагрузки (d – размера частиц, h – высоты слоя, b – ширины слоя, l – длины слоя межэлектродного промежутка, сорта металла). Количество эродировавшего металла определялось взвешиванием гранул до и после опыта. Поскольку в любом непрерывном технологическом цикле с использованием метода ОЭИО ГТПС в жидкой нейтральной среде гранулы металла, как правило, уже лишены оксидных пленок, перед каждым опытом проводилась предварительная электроразрядная обработка металлозагрузки в дистиллате при напряжениях 5–7 кВ.

Результаты. С целью определения параметров контура, загрузки и РЭД, при которых масса эродировавшего металла максимальна, а удельные энергозатраты на эрозию минимальны, сделано несколько опытов для выявления основных закономерностей разряда в такой среде. При $C = 0,25 \cdot 10^{-6}$ Ф и $L = 1,2 \cdot 10^{-6}$ Гн определено минимальное начальное напряжение на конденсаторной батарее U_0 , при котором в слое гранул возник канал сквозной проводимости. Критерием его возникновения являлся резкий рост тока на осциллограмме, визуальное – появление искрений. Для алюминиевых гранул $d = 4$ мм $U_0 = 2,1$ кВ, для $d = 8$ мм и железных гранул размером 4 и 8 мм – значение менее 1 кВ. Среднее напряжение пробоя единичного контактного промежутка, определенное по методике [2], составило для Al $d = 4$ мм около 8 В.

Разряд при напряжениях, близких к U_0 , – нестабильный, возникновение канала сквозной проводимости чередуется со стеканием заряда с накопительной емкости через проводящую гетерогенную среду. При увеличении частоты следования импульсов до 1–2 Гц и более в воздушном разряднике зажигается дуга. Поэтому следующим шагом являлось определение порога стабильности разряда. Критерием служило возникновение стабильной повторяемости осциллограмм тока и напряжения при любых достижимых в опытах частотах следования импульсов (до 50 Гц). Для алюминиевой металлозагрузки размером гранул $d = 4$ мм начальное напряжение на конденсаторной батарее, при котором разряд становился стабильным (обозначим его U_1), достигало 4,1 кВ, при этом амплитуда падения напряжения на единичном контактом промежутке $U_{ед}$ (при условии, что замыкалась только одна цепочка) составляла около 30 В. Соответственно для Fe $d = 4$ мм $U_1 = 3,2$ кВ, $U_{ед} = 24$ В. Для алюминиевой и железной металлозагрузки с размером гранул $d = 8$ мм эти значения одинаковы: $U_1 = 1,2$ кВ, $U_{ед} = 17$ В. Осциллограммы напряжения, несмотря на то что разряд стабильный, содержат длительный пологий участок (стекания заряда), свидетельствующий о том, что в процессе разряда токовые цепочки разрываются. В связи с этим определены минимальные начальные напряжения на конденсаторной батарее U_2 , при которых реализуется аperiodический разряд и вся запасенная энергия выделяется в первом полупериоде. Такой режим разряда должен быть наиболее эффективным с точки зрения электроэрозионных процессов в металлозагрузке, поскольку в этом случае диссипация энергии на активном сопротивлении элементов разрядной цепи минимальна. Для алюминиевой и железной металлозагрузки размером гранул $d = 4$ мм эти значения равны 5,4 и 5,0 кВ соответственно ($U_{ед} = 32$ и 31 В по-прежнему, при условии, что замыкалась только одна цепочка, хотя это скорее всего уже не так), для $d = 8$ мм эти значения равны 2,6 и 2,4 кВ соответственно ($U_{ед} = 33$ и 32 В при том же условии). Длительность разряда для Al и Fe ($d = 4$ мм) составляла примерно 2,2 мкс при периоде собственных колебаний разрядного контура $T = 3,44$ мкс.

Исследования закономерностей эрозионного съема проводились последовательно по всем наборам параметров. Сравнение результатов, полученных на гранулах размерами 4 и 8 мм, показало, что вторые менее эффективны с точки зрения энергозатрат и массы эродировавшего металла.

Исследована зависимость удельных энергозатрат на эрозию металла $E_{уд}$ от C и L . При увеличении емкости (при $h = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $l = 5,0 \cdot 10^{-1}$ м, $d = 4 \cdot 10^{-3}$ м (Al), $U = 6,2 \cdot 10^3$ В, $L = 1,2 \cdot 10^{-6}$ Гн) удельные энергозатраты падают. С увеличением индуктивности (при $C = 1,35 \cdot 10^{-6}$ Ф и $U = 6,5 \cdot 10^3$ В) $E_{уд}$ резко возрастают. Зависимость массы эродировавшего металла m от C почти линейная при сохранении остальных параметров постоянными, с ростом C масса m растет. Зависимость m от индуктивности в целом падающая.

Зависимости $E_{уд}$ и m от длины разрядного промежутка исследовались в РЭД при параметрах $h = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $d = 4 \cdot 10^{-3}$ м (Al), $U = 6,7 \cdot 10^3$ В, $L = 1,5 \cdot 10^{-6}$ Гн. С увеличением длины удельные энергоза-

траты монотонно снижаются, выходя на минимум при $l = 350 \cdot 10^{-3}$ м, и в дальнейшем практически не изменяются. В то же время m при такой длине промежутка выходит на максимум, и дальше, в пределах исследованного диапазона, остается неизменной. Зависимости $E_{уд}$ и m от h также имеют слабо выраженный минимум и максимум при $h = 20$ мм.

Эти результаты позволили определить оптимальные для данного РЭД длину промежутка $l = 5,0 \cdot 10^{-1}$ м и высоту слоя загрузки $h = 20 \cdot 10^{-3}$ м, при которых проводились дальнейшие исследования.

При исследовании зависимости $E_{уд}$ и m от U для алюминиевой металлозагрузки при $d = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $C = 0,25 \cdot 10^{-6}$ Ф и $L = 1,5 \cdot 10^{-6}$ Гн в диапазоне U от 2 до $13 \cdot 10^3$ В (с шагом 1000 В, в области оптимума шаг уменьшался) обнаружен оптимум при $U = 6,7 \cdot 10^3$ В (максимум для m и минимум для $E_{уд}$). Минимальное значение энергии, затраченной на эрозию одного грамма металла загрузки, в этом случае оказалось равным 13,9 кДж. Для железной металлозагрузки при тех же параметрах (только диапазон U выбран иной – от 4 до $15 \cdot 10^3$ В) такой оптимум обнаружен для $U = 13,2 \cdot 10^3$ В. Здесь $E_{уд} = 13,22$ кДж/г – несколько меньше, чем для Al. Опыты также показали, что значения $E_{уд}$ и для алюминиевой, и для железной металлозагрузки очень слабо зависят от суммарной выделившейся в промежутке энергии.

При поддержании постоянной суммарной энергии, выделившейся в промежутке (за счет количества импульсов), в реакторах с алюминиевой и железной металлозагрузкой зависимости $E_{уд}$ и m от U практически идентичны, отличаясь только численно. Суммарная энергия, выделившаяся в реакторе с железной металлозагрузкой, поддерживалась в опытах примерно равной 400 КДж, для алюминиевой загрузки эта величина равна 50 КДж. Общий вид зависимости удельной энергии от напряжения при постоянстве выделившейся энергии для алюминия и железа представлен на рис. 1. Из рисунка видно, что характер зависимостей аналогичен – с ростом напряжения удельные энергозатраты падают почти линейно, причем угол наклона прямых примерно одинаков.

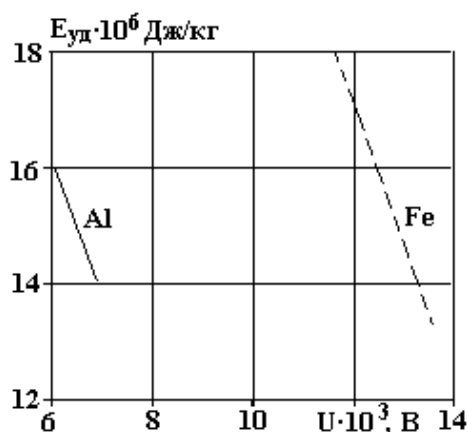


Рис. 1. Зависимость удельной энергии от напряжения при постоянной выделившейся энергии для разряда в реакторах с алюминиевой и железной металлозагрузкой

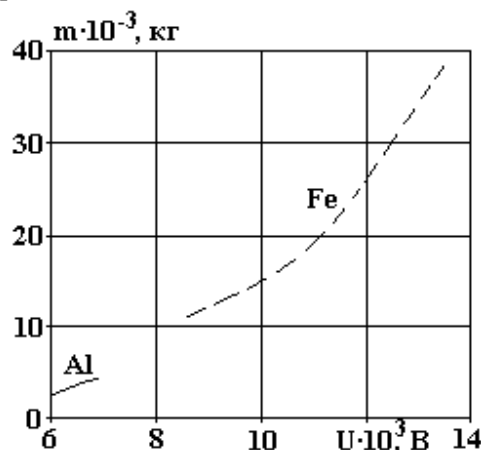


Рис. 2. Зависимость массы эродировавшего металла от напряжения при постоянной выделившейся энергии для разряда в реакторах с алюминиевой и железной металлозагрузкой

Зависимость массы эродировавшего металла от напряжения в этих же опытах представлена на рис. 2. Характер зависимостей для алюминия и железа здесь также аналогичен, причем кривая зависимости для железа как бы является продолжением кривой для алюминия. При этом зависимость массы эродировавшего металла от суммарной выделившейся энергии (при постоянных C и U) для обоих металлов практически линейная, а для отдельных наборов параметров кривые имеют совпадающие участки.

Количество металла, эродировавшего при выделении в промежутке 1000 Дж энергии, увеличивается с ростом напряжения (в указанных диапазонах) для алюминия от 6 до $7 \cdot 10^{-8}$ кг/Дж, а для железа – от 5 до $7 \cdot 10^{-8}$ кг/Дж.

Обсуждение. Характер влияния емкости разрядных конденсаторов на удельные энергозатраты и производительность искроэрозионного диспергирования гранул аналогичен полученному в [4] для низких напряжений разряда. Линейный рост эрозионного съема связан, по-видимому, с увеличением энергии единичного импульса [5]. В то же время снижение производительности диспергирования при росте индуктивности контура можно связать изменением крутизны нарастания тока (такая возможность также отмечается в [5]).

Полученные значения энергозатрат на диспергирование алюминия и железа в реакторе совпадают с приведенными в [6] (там в опытах с алюминием эти значения составляли 3–4 (кВт·ч)/кг, причем взвешивались и электроды) и значительно ниже приведенных в [7] (5–15 (кВт·ч)/кг). Опыты в [6] проводились при высоких напряжениях, в то время как в [7] – при напряжениях до 1 кВ. Вероятно, поиск оптимального сочетания геометрических размеров реакторов и режимов разряда может привести к снижению удельных энергозатрат еще в несколько раз.

Характер зависимости удельной энергии и массы эродировавшего металла от напряжения не позволяет дать однозначной трактовки процессов, происходящих при разряде в железной и алюминиевой загрузке. С одной стороны, существует мнение (см., например, [1] и ссылки), что получение порошков металлов с меньшей электропроводностью требует повышенного расхода энергии и с увеличением теплоты плавления и испарения разрушение металлов уменьшается. С другой стороны, в [5] указывается, что связь коэффициента выброса металла K с электродов в разрядный промежуток с теплофизическими свойствами материала электродов не выявляется четко, хотя обнаружены значения параметров импульсов (при энергии в импульсе $W \approx 10$ Дж и длительности разряда $t \approx 10^{-4}$ с), при которых K увеличивается с повышением температуры плавления электродов. Оптимумы для железа и алюминия в опытах достигаются при различной энергии единичного импульса, при этом удельная энергия для эрозии единицы массы металла незначительно меньше для железа.

Заключение. Исследования влияния электрофизических параметров, характеристик металлозагрузки и реакторов электроэрозионного диспергирования на эрозию металлов показали, что:

- с ростом напряжения удельные энергозатраты на эрозию единицы массы металла загрузки уменьшаются;
- с ростом напряжения масса эродировавшего металла растет;
- с увеличением емкости удельные энергозатраты падают. С увеличением индуктивности $E_{уд}$ возрастают;
- зависимость массы эродировавшего металла от C при сохранении остальных параметров постоянными почти линейная, с ростом C масса m растет. Зависимость m от индуктивности в целом падающая;
- с увеличением длины разрядного промежутка удельные энергозатраты монотонно снижаются, m при определенной длине промежутка выходит на максимум и дальше, в пределах исследованного диапазона, остается неизменной;
- зависимость $E_{уд}$ и m от высоты и ширины слоя металлозагрузки может иметь экстремум. В дальнейшем с увеличением h и b удельные энергозатраты возрастают, а съем эродировавшего металла уменьшается;
- характер зависимости удельных энергозатрат и массы эродировавшего металла для разряда в реакторе с алюминиевой и железной металлозагрузкой практически идентичен и отличается только количественно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щерба А.А., Штомпель И.В. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул // Стабилизация параметров электрической энергии: Сб. науч. тр. Киев: Изд.-во Ин-та электродинамики НАНУ, 1991. С. 65–73.
2. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Захарченко С.Н. Регулирование динамических параметров технологических систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електротехніка'2001. Київ: Вид.-во Ін-ту електродинаміки НАНУ, 2001. С. 3–16.
3. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Исследование электроэрозионных явлений при протекании импульсного тока между токопроводящими гранулами с учетом микроплазменного контактного промежутка // Технічна електродинаміка. 2002. № 4. С. 3–7.
4. Захарченко С.М. Розрядноімпульсні системи зі стабілізацією параметрів об'ємного електроіскрового диспергування струмопровідних гранул: Автореф. дис. канд. техн. наук. Київ, 2004.
5. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. М., 1978.
6. Фоминский Л.П. Некоторые аспекты электроэрозионного способа получения окиси алюминия // Электронная обработка материалов. 1980. № 1. С. 46–49.
7. Левченко В.Ф. Электроимпульсный метод комплексной переработки материалов // Проблемы машиностроения. 1992. Вып. 38. С. 78–86.

Поступила 05.01.05

Summary

The results of experimental investigations of some regularities of erosion of aluminium and iron granules at high-voltage electric discharges in the reactor with metal charging are given. The influence of circuit parameters, reactor and charging on quantitative characteristics of erosion is shown.