

С.В. Петриченко

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ОБЪЕМА РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ КОНТАКТНОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ПРОЦЕССЕ В ЖИДКОСТИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@iipt.com.ua*

Введение

В последние годы интенсивно развиваются импульсные технологии получения новых субмикронных и наноструктурных материалов, основанные на использовании электроискрового разряда в неоднородных конденсированных средах. Наиболее широкую реализацию эти технологии нашли в современных электротехнических системах с реактором, содержащим слой токопроводящих гранул в жидкости (объемное электроискровое диспергирование). При проектировании таких систем приоритетными являются задачи уменьшения нестабильности режимов их работы и увеличения производительности. Это объясняется уникальной структурой и свойствами искроэрозионных микро- и наночастиц, что выводит на второй план удельные энергозатраты и эксплуатационные расходы. В направлении решения указанных задач существует комплекс эффективных мер по параметрической стабилизации напряжения или тока, регулированию частоты импульсов, средней за время импульса электрической мощности и т.д. Дальнейшее развитие метода объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) требует изучения взаимосвязи между технологическими и электрическими параметрами соответствующих установок в динамике и связано с необходимостью разработки специализированных физических моделей для анализа электроискровых процессов в слое гранул [1].

Одна из наиболее существенных динамических характеристик контактного электроискрового процесса – объем разрядной плазмы (при определенности структуры и формы разрядного канала), поскольку известно, что увеличение объема расплавленного металла приводит к росту производительности ОЭИД. Для уменьшения среднего размера получаемых искроэрозионных частиц следует определять условия, при которых будет максимальным объем парообразного металла [2]. Таким образом, как производительность ОЭИД, так и дисперсность продуктов обработки на уровне элементарного искрения характеризуются средним эффективным объемом плазменного образования $q_{ЭФ}$. Под $q_{ЭФ}$ в данном случае подразумевается объем, занимаемый разрядной плазмой к моменту достижения максимума импульсной мощности. Вместе с тем $q_{ЭФ}$ определяет площадь поверхности искро-разрядной плазмы и характеризует потери на излучение. Величину $q_{ЭФ}$ детерминирует динамический параметр – скорость расширения плазменного канала. Анализ и разработка способов регулирования эффективного объема разрядной плазмы локального искроэрозионного канала невозможны без использования средств скоростной фоторегистрации единичного разряда совместно с синхронным осциллографированием разрядного тока и напряжения на межэлектродном промежутке. Реализация таких измерений и создание адекватных физических моделей элементарного искрения в слое – сложная научно-прикладная задача. Определение формы, структуры, закона расширения плазменного канала во взаимосвязи с импульсной мощностью процесса, зависимости $q_{ЭФ}$ от электротехнических параметров разрядного контура обеспечит разработку новых методов и средств регулирования режимов электроимпульсной обработки гранулированных токопроводящих сред. Отдельной задачей является разработка способов регулирования $q_{ЭФ}$, основанных на воздействиях неэлектрической природы. На сегодняшний день открытым остается вопрос о влиянии пузырьков газа на формирование искрового канала в контактном промежутке, и в первую очередь на искроэрозионный процесс в активной стадии. Имеющиеся сведения о таких влияниях противоречивы и по большей части относятся к пузырьковой модели пробоя жидкостей [3].

Ранее нами была разработана и апробирована физическая модель элементарного искрения для процессов ОЭИД слоя алюминиевых гранул в воде. Принципы построения, исполнение и параметры модели, а также обоснования для выбора условий эксперимента подробно описаны в работе [4]. К основным преимуществам модели, основанной на трехэлектродной системе, относятся возможность точно воспроизводить контактные условия между гранулами, а фиксированную степень нагрузки на контактные узлы, обеспечение самопроизвольного перемещения гранул, возможность съёмки искрений на фоне подсветки и в режиме самосвечения, а также введения газовых пузырьков и др.

Стабилизированный, согласованный искровой разряд для такой модели применительно к решению поставленных задач и является объектом настоящих исследований.

Условия эксперимента

Эксперименты проводились при величинах зарядных напряжений U_0 от 50 до 350 В, что соответствует в пересчете для реального технологического узла при обработке слоя с малым количеством гранул (по методике [5]) напряжению, приложенному к электродным пластинам, приблизительно от 300 В до 2,8 кВ. Радиусы модельных электродов-гранул равнялись 3 мм. Емкость накопителя варьировалась от 10 до 100 мкФ. Индуктивность разрядной цепи $L_{\text{Ц}}$ составляла около 2 мкГн. Разряд осуществлялся при прочих равных условиях в дегазированной жидкости и с введением в околосконтактную зону пузырьков газа.

Система диагностики эксперимента обеспечивала: 1) фотосъемку отдельными кадрами с частотой съемки до $2 \cdot 10^6$ кадр/с (камера СФР); 2) регистрацию импульсов тока и напряжения с помощью коаксиального шунта, омического делителя и двухлучевого запоминающего осциллографа.

Известны различные способы введения газового пузыря в межэлектродный промежуток: через иглу, через отверстие в электроде, путем сброса давления. Для контроля и воспроизводимости условий эксперимента в отношении параметров пузырьков – их местоположения, размера, формы и количества – был применен предложенный в [3] способ создания пузырьков с помощью капилляра, который с этой целью временно вводился в околосконтактную зону, а также при помощи медицинского шприца. Отсутствие других пузырьков контролировалось визуально.

Стабилизация и согласование разряда

Возможность существования нестабильных искровых разрядов между гранулами была показана в работе [4]. Нестабильность проявлялась в разбросе значений амплитуды и длительности, в резком спаде разрядного тока, в повторном пробое промежутка в ходе единичной коммутации (рис. 1,а). В настоящее время проведена более полная классификация режимов разряда и установлены диапазоны условий их осуществления (рис. 1,б). Так, зависимость U_0/C определяет границу между областями существования стабильных (рис. 1,б; поз.2, 3, 4) и нестабильных разрядов (рис. 1,б, поз.1). Для условий эксперимента область существования стабильных разрядов численно выражается соотношением

$$\frac{U_0 - 44}{0,56C} \geq 1. \quad (1)$$

При этом электромагнитные процессы в разрядной цепи протекают таким образом, что к моменту времени, соответствующему длительности полупериода разрядного тока для стабильных режимов, возможны такие ситуации:

а) на МЭП присутствует остаточное напряжение, ток обрывается на нулевом уровне (рис. 1,б, поз.2);

б) напряжение на МЭП выходит на нулевой уровень, ток обрывается также на нулевом уровне (рис. 1,б, поз.3);

в) режим приобретает выраженный колебательный характер (рис.1,б, поз.4), ток обрывается на отрицательном уровне (до 1/6 от амплитуды положительной полуволны), что происходит за счет конечной длительности запирающего тиристорного коммутатора.

Зависимость отношения W/W_0 (выделившейся энергии к запасенной) от зарядного напряжения имеет максимум при условии равенства интегрального эквивалентного сопротивления разрядного канала $R_{\text{ЭКВ}}$ [5] и волнового сопротивления разрядного контура ρ_e . Как видно из рис. 1,з, для меньших емкостей диапазона максимум W/W_0 сдвинут в сторону более низких значений U_0 , а при $C = 10$ мкФ явно уже не выражен. Поскольку $R_{\text{ЭКВ}}$ с ростом зарядного напряжения монотонно убывает (рис. 1,з), то этот максимум является оптимальным режимом при данных $L_{\text{Ц}}$ и C . Дальнейшее увеличение зарядного напряжения приводит к перераспределению энергии между нагрузкой и подводимой линией в худшую сторону. Таким образом, экстремальная ситуация (рис. 1,з) для стабильных режимов разряда определяется волновым сопротивлением разрядного контура, а аналитические зави-

симости $R_{ЭКВ}$ для слоя гранул, полученные в работе [5], могут быть использованы для согласования ГИТ с нагрузкой, что обеспечит максимальную энергоэффективность в разрядных цепях.

Дальнейшее рассмотрение динамики разрядной плазмы осуществлялось для стабилизированных и согласованных режимов контактных искровых разрядов.

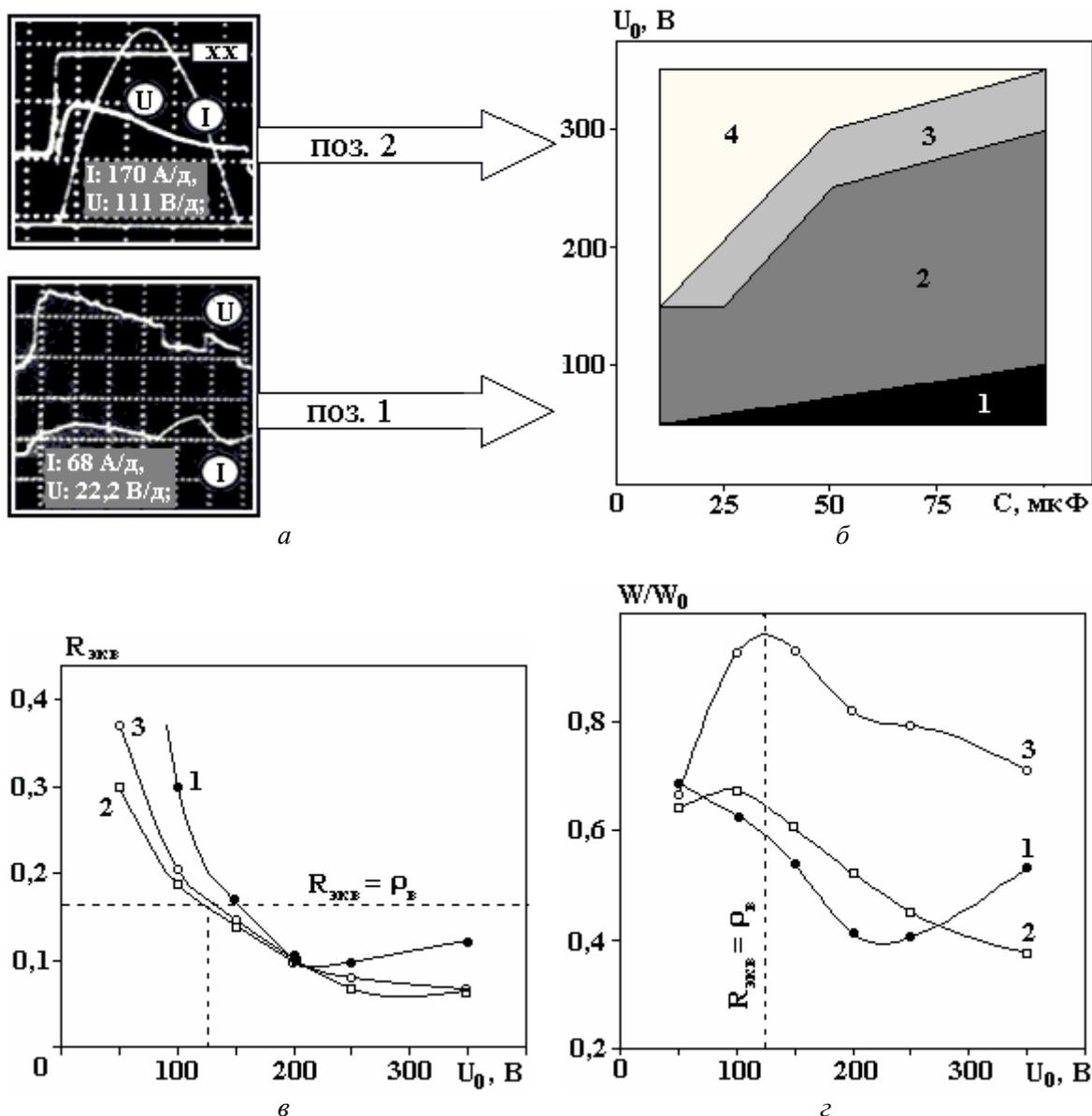


Рис. 1. Характерные режимы электроискровых разрядов (а), условия стабилизации (б) и согласования (в, г). 1 – 10; 2 – 25; 3 – 100 мкФ

Форма, степень однородности и динамика канала

Как было показано ранее [6], чем длительнее разряд и больше введенная энергия при заданной длине межэлектродного промежутка, тем ближе конечная форма канала к сфере, даже если первоначальная форма канала была близка к цилиндрической. Тем более если первоначальная форма канала имела сферическую симметрию, то конечная форма сохранит эту симметрию.

Как показали наши опыты, канал искрящего контакта может быть составным, проявляя пространственную дискретность. Начиная с определенного момента времени t_1 уже в первые микросекунды после формирования, вследствие интенсивного расширения канал разряда в дегазированной жидкости приобретает форму эллипса (рис. 2). Для условий эксперимента зафиксированное значение t_1 не превышало 8 мкс при общей длительности токовой стадии стабильного разряда $\tau = \pi \sqrt{L_{ц} C}$ (около 50 мкс). Длительность токовой стадии особо выделена в связи с тем, что в некоторых случаях наблюдались экзотермические реакции активированного алюминия со средой.

Судя по свечению разряда, плазма заполняет канал в процессе расширения однородно (до пика мощности). Подобная интерпретация фотограмм разряда в режиме съемки "лупа времени" предложена в такой авторитетной работе, как [6], где использовались аналогичные средства фоторегистрации. Вместе с тем авторы [6] на основании результатов щелевой фоторазвертки показали, что отслоение плазмы от стенок канала происходит лишь в конце разряда, что подтверждает такую интерпретацию.

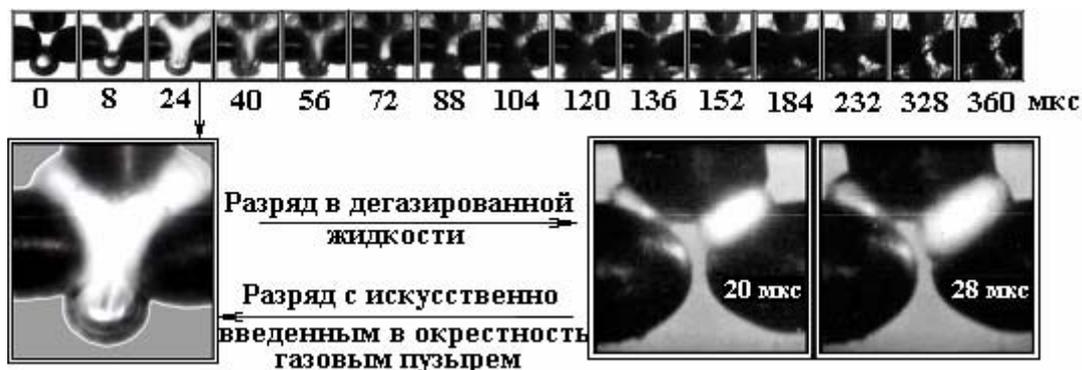


Рис. 2. Динамика разрядной плазмы и влияние на нее газового пузыря

До момента достижения максимума мощности канал расширяется равномерно (рис. 3,а), и средняя скорость его расширения на этом интервале $v = 2(r_{ЭФ} - r_0)/\tau$. Тогда закон расширения может быть представлен простой линейной зависимостью

$$r = r_0 + vt, \quad (2)$$

где r_0 – радиус канала в начальный момент времени, м; v составляет от 50 до 70 м/с – для согласованных режимов разряда.

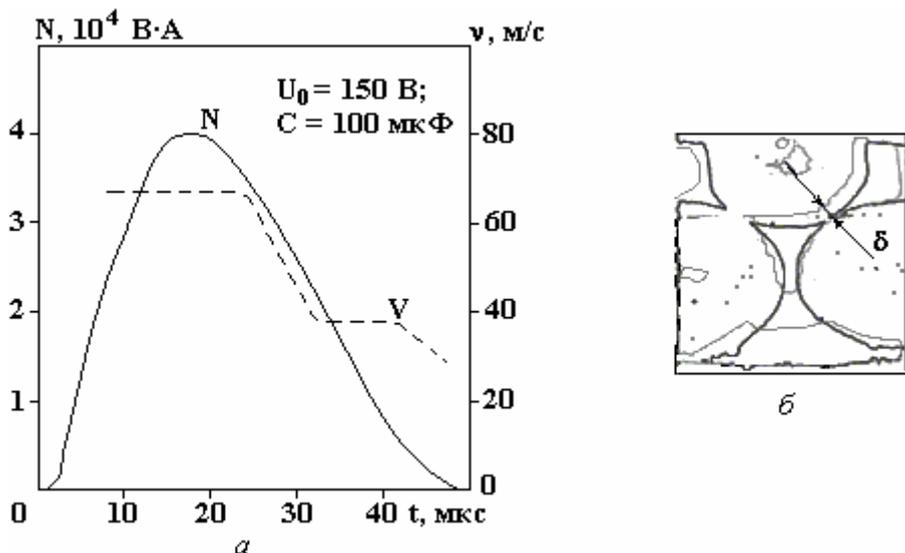


Рис.3. Взаимосвязь электрических и кинематических характеристик разряда (а), перемещение электродов-гранул в ходе процесса (б)

На участке спада мощности $N - v$ резко падает, в два раза за первые 8 мкс от момента максимума. На фронте расширения – у поверхности соприкосновения плазмы с жидкостью – вещество начинает остывать, так как N уже недостаточно для поддержания однородности плазмы на периферии, что приводит к потемнению границы плазменной области. Подобное объяснение применимо и к интерпретации фотограмм сквозных каналов протекания тока.

Важным динамическим параметром, применимым для введения нового канала управления, является эффективный объем $q_{ЭФ}$ плазменного образования. Он вычисляется в момент времени, соответствующий амплитуде скорости ввода энергии. Тогда для оценки эффективного объема может быть использовано следующее приближенное выражение:

$$q_{эф} \approx \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(r_0 + v \cdot \frac{1}{2} \cdot \pi \sqrt{L_{ц} \cdot C} \right)^3 - V_{ГР}, \quad (3)$$

где $V_{ГР}$ – некоторый поправочный коэффициент, имеющий размерность объема и учитывающий наличие внутри плазменного облака перемещающихся поверхностей гранул (рис. 3,б). На величину $V_{ГР}$ в первую очередь влияют высота слоя, то есть степень нагрузки на контакт, а также размер гранулы.

По мере уменьшения степени нагрузки на контакт, по всей вероятности, увеличивается перемещение гранул δ , а форма разрядного канала от эллиптической стремится к сферической. Перемещение подвижного электрода-гранулы (δ на рис. 3,б) за интервал времени, равный 100 мкс от начала процесса, составляло от 0,7 до 0,9 мм при его весе 7,5 г. Вес подвижного электрода отражал нагрузку реального слоя гранул. На основании данного результата определяется динамическое усилие, создаваемое микроплазменным каналом в точках его привязки к поверхности электродов-гранул.

Важные результаты получены в опытах, когда под промежуточный электрод на расстоянии 5 мм от него вводили газовый пузырь диаметром 5 мм (рис. 2). Через 16 мкс после образования плазменных каналов их границы достигали пузыря, еще через 8 мкс пузырь был заполнен разрядной плазмой (рис. 2). Суммарный объем плазменного образования увеличивался на 30%. В течение следующих 8 мкс свечение плазмы прекращалось, при этом в обычных условиях (без пузыря) оно продолжалось от 8–16 мкс. Искусственное увеличение объема плазмы приводит к ее более быстрому остыванию. Введение газовой фазы в реактор как фактора управления процессом преобразования энергии весьма актуально, поскольку изменяет характер электротепловых, газо- и гидродинамических процессов в разрядной зоне и слабо влияет на формирование искровых каналов в слое, как будет показано далее.

Влияние газовых включений на формирование искрового канала

Начальная напряженность электрического поля в микропромежутке между соприкасающимися гранулами при известном зарядном напряжении накопителя определяется в основном состоянием их поверхностей – наличием микровыступов, кратеров, дефектов оксидной пленки и другими факторами. Ее оценка расчетными и экспериментальными методами, а тем более контроль практически невозможны. При выборе диаметра пузырьков воздуха d_n , вводимых в окрестность контактного промежутка для определения их влияния на формирование разрядных каналов, исходили из соответствия диаметру видимых пузырьков, которые самопроизвольно образуются в среде вследствие серии разрядов. Вместе с тем исключали вероятность полного перекрытия искусственным пузырьком контактного промежутка. Таким требованиям удовлетворяли значения d_n от 0,5 до 1,5 мм. Использовались воздушные пузырьки.

Эксперимент показал, что введение газового пузырька диаметром 0,5 мм на расстоянии 0,5 мм от оси контакта (рис. 4) так, чтобы он соприкасался с поверхностями соседних гранул, не оказывает заметного влияния на процесс формирования плазменного канала.

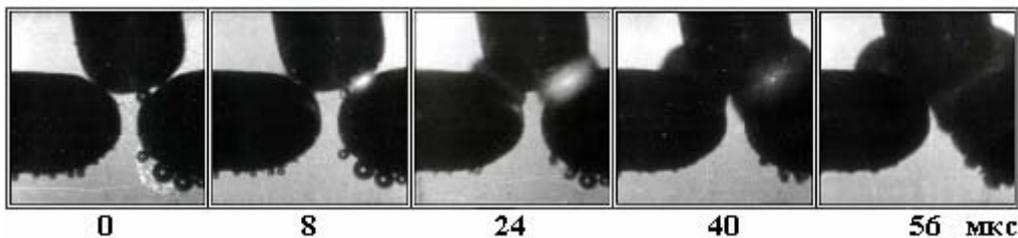


Рис. 4. Влияние газового пузыря на процесс формирования искрового канала

Введение таких же пузырьков на расстоянии 5 и 6,5 мм (последовательно на одной линии) от зоны, где формируется искровой канал (рис. 5), позволило по моменту времени, в который происходит деформация первого и второго пузырьков (схлопывание), оценить среднюю скорость распространения фронта волны сжатия $\dot{r}_{ВСЖ}$ на промежутках до этих точек. Она составила приблизительно 310 и 270 м/с соответственно. Если учесть погрешность, связанную с конечной длительностью экспозиции и временным интервалом между кадрами, большего доверия заслуживает второе значение. Расстояние, которое пройдет волна сжатия в радиальном к оси контакта направлении до момента времени, соответствующего амплитуде тока, можно оценить из следующего выражения:

$$r_{\text{ВСЖ}} = r_0 + \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \dot{r}_{\text{ВСЖ}} \cdot \sqrt{L_{\text{Ц}} \cdot C} . \quad (4)$$

Значения получены для $U_0 = 125$ В, $C = 100$ мкФ – оптимального по энергетическому критерию W/W_0 режима.

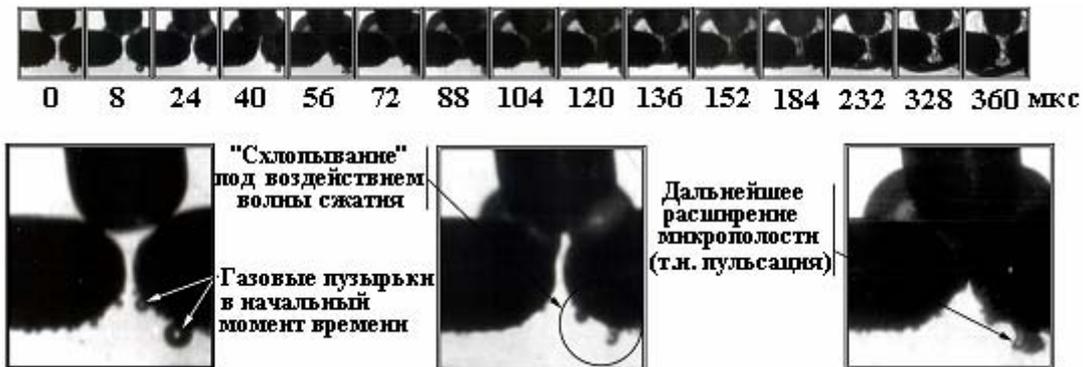


Рис. 5. Газо- и гидродинамические процессы в околоразрядной зоне при наличии в ней газовых включений

Заключение

Таким образом, для стабильных (рис. 2,б, поз.2–4) согласованных (рис. 2,в, $R_{\text{Э}} = \rho_{\text{В}}$) режимов контактного искрового разряда объем $q_{\text{ЭФ}}$ определяется набором параметров U_0 , C , $L_{\text{Ц}}$, r_0 , v и коэффициентом $V_{\text{ГР}}$. Регулирование величины $q_{\text{ЭФ}}$, а следовательно, создание новых каналов управления технологическими процессами должно производиться в соответствии с эмпирическим выражением (3) и может осуществляться:

- комбинированием электротехнических параметров разрядного контура U_0 , C , $L_{\text{Ц}}$ в диапазоне изменения динамического параметра v от 50 до 70 м/с для согласованных режимов искрового разряда;

- путем изменения коэффициента $V_{\text{ГР}}$ за счет варьирования диаметра гранул d_0 и степени нагрузки на контакт, которая влияет на перемещение гранул. Функциональная зависимость

$$V_{\text{ГР}} = f \left[d_0, \frac{2\delta}{\pi \sqrt{L_{\text{Ц}} C}} \right] \text{ определяется простыми геометрическими соотношениями;}$$

- введением газовых пузырьков диаметром, сопоставимым с d_0 (для снижения вероятности полного перекрытия пузырьком контактного промежутка), что позволяет регулировать $q_{\text{ЭФ}}$ и является новым независимым каналом управления технологическим процессом. Газовые включения, если они не перекрывают весь контактный промежуток, слабо влияют на процесс формирования искрений, однако их введение в МЭП позволяет на 30% увеличить $q_{\text{ЭФ}}$ и скорость охлаждения вещества;

- путем изменения эффективного расстояния $r_{\text{ВСЖ}}$, пройденного волной сжатия в радиальном к оси контакта направлении. Регулирование $r_{\text{ВСЖ}}$ осуществляется способами, описанными в п.1–2, при этом в выражение (4) следует ввести поправочный коэффициент $V_{\text{ГР}}$. Соотношение $r_{\text{ВСЖ}}/d_0$ характеризует степень взаимодействия соседних контактных узлов. Такое взаимодействие можно рассматривать как благоприятный фактор, способствующий миграции искрений и удалению вещества из разрядных зон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шидловський А.К. Розвиток досліджень по перетворенню та стабілізації параметрів електромагнітної енергії в Інституті електродинаміки НАН України / А.К. Шидловський, К.О. Липківський // Технічна електродинаміка. 2007. № 3. С. 11–26.
2. Shcherba A.A. Spark erosion of conducting granules in a liquid: analysis of electromagnetic, thermal and hydrodynamic processes / A.A. Shcherba, A.D. Podoltsev, I.N. Kucherjavaja // Технічна електродинаміка. 2004. № 6. С. 4–18.

3. *Скорых В.В.* Влияние пузырьков газа на зажигание разряда в воде // Журнал технической физики. 1986. Т. 56. В.8. С. 1569–1572.
4. *Щерба А.А.* Физическое моделирование и анализ динамики искроплазменных процессов при электроэрозионном диспергировании токопроводящих гранул в жидкости / А.А. Щерба, С.В. Петриченко // Техническая электродинамика. 2004. № 3. С. 27–32.
5. *Щерба А.А.* Регулирование динамических параметров технологических систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред / А.А.Щерба, А.Д. Подольцев, С.Н.Захарченко // Праці ІЕД НАНУ. Електротехніка. 2001. Київ, 2001. С. 3–17.
6. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М., 1971.

Поступила 27.11.07

Summary

The new experimental results that allow to execute stabilized critical discharges between metallic granules in a liquid by combination of electrotechnical parameters of discharge contour are obtained. The form of channel and law of its extension, taking to consideration the momentary electrical power, were determined. This has allowed to offer dependences for regulation of an affective volume of discharged plasma. Different diameter gas inclusions influence on the processes of formation and development of discharge were estimated.
