

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ ОБЪЕМНЫМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ИХ ГРАНУЛ В ЖИДКОСТИ

С.Н.Захарченко, канд.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.
e-mail: snzakhar@bk.ru

Рассмотрены основные процессы преобразования энергии генераторов электрических импульсов при объемном электроэрозионном диспергировании металлических гранул в жидкости. Даны практические рекомендации по снижению потерь энергии при получении субмикронных электроэрозионных частиц данным методом. Показано, что лимитирование энергии плазменных каналов повышает вероятность ограничения их эволюции стадией стримера и способствует снижению размеров электроэрозионных частиц. Приведен сравнительный анализ особенностей электроэрозионного диспергирования слоев металлических гранул при их газодинамической, гидродинамической и вибрационной активациях. Показано, что вибрационная активация позволяет одновременно задействовать три независимых канала ограничения энергии электрического импульса: по напряжению, току и длительности. Это способствует снижению доли искровых каналов в пользу стримеров и, как следствие, уменьшению размеров эрозионных частиц до 1 мкм и менее. Библ. 13.

Ключевые слова: электроэрозионное диспергирование, разрядные импульсы, стример, искра.

Введение. Обоснование, поиск и оптимизация режимов объемного электроэрозионного диспергирования гранул металлов в жидкости, которые обеспечивают низкие удельные затраты энергии и материалов при получении ультрадисперсных частиц, повышают эффективность метода для ряда технологических применений. Снижение размеров электроэрозионных частиц металлов, способных образовывать коагулянт при контакте с водой, например, *Al* до 1 мкм позволяет на 10–18% уменьшить материалоемкость и энергоемкость процессов комплексной очистки и обеззараживания водных потоков методом электроэрозионной коагуляции [9]. Отсутствие в дисперсионной среде крупных (свыше 1 мкм) электроэрозионных частиц биоцидных (*Ag, Cu, Zn*) и биогенных (*Fe, Mo, Co, Mn*) металлов является одним из необходимых условий седиментационной устойчивости и биологической активности их золей, применяемых в растениеводстве и животноводстве [10].

Целью настоящей работы является анализ процессов преобразования энергии генератора импульсов при объемном электроэрозионном диспергировании гранул металлов в жидкости и разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности режимов получения эрозионных частиц субмикронных размеров.

Процессы преобразования энергии в системе генератор импульсов–объемная электроэрозионная нагрузка. За время протекания импульса электрического тока τ_p энергия накопителя в выходной цепи генератора через коммутатор (тиристор, транзистор или другой ключ) и соединительные кабели с активным сопротивлением R_{Π} и индуктивностью L_{Π} передается в разрядную камеру технологического аппарата объемного электроэрозионного диспергирования металлических гранул в жидкости. В случае использования емкостного накопителя C , предварительно заряженного до напряжения U_{C0} , энергия, запасенная в нем, будет равна $\mathcal{E}_C = 0,5CU_{C0}^2$, а в случае использования индуктивного накопителя L с начальным током I_{L0} энергия, запасенная в нем, составит $\mathcal{E}_L = 0,5LI_{L0}^2$.

В течение длительности импульса в коммутаторе протекает ток $i_S(t)$, вызывая на нем падение напряжения $u_S(t)$, что неизбежно приводит к потерям энергии $\mathcal{E}_S = \int_0^{\tau_p} u_S(t) \cdot i_S(t) dt$, которые можно

условно разделить на статические, наблюдаемые во время полностью открытого и закрытого состояний ключа, и динамические, наблюдаемые в течение времени его коммутации. При рассмотрении процессов передачи энергии накопителя в нагрузку статическими потерями в закрытом ключе можно пренебречь.

Уменьшить статические потери в открытом ключе можно выбором наиболее подходящего его типа в каждом конкретном случае в зависимости от величины протекающего в нем тока и коммутируемого напряжения. Например, при малых значениях коммутируемого тока (до 20 А) и напряжения

(до 300 В) целесообразно применять параллельно включенные полевые транзисторы, в частности, MOSFET, особенностью которых является близкое к постоянному значению сопротивление канала в открытом состоянии, которое для лучших современных силовых MOSFET составляет 0,14 Ом [11]. Таким образом, при малых токах можно добиться меньшего, чем на биполярных транзисторах, IGBT и тиристорах падения напряжения в открытом состоянии.

При значениях коммутируемых токов от 10 до 100 А и напряжений до 600 В наиболее эффективными являются IGBT, характеризующиеся квазипостоянным падением напряжения в режиме насыщения в открытом состоянии, составляющим приблизительно 2,4 В при изменении тока в широком диапазоне [12]. Для коммутации токов более 300 А и при напряжениях свыше 600 В наиболее эффективными являются силовые быстродействующие тиристоры. Они так же, как и IGBT, характеризуются квазипостоянным падением напряжения в открытом состоянии, не превышающем, как правило, 3 В, но в отличие от последних способны выдерживать многократно повторяющиеся импульсы тока до нескольких тысяч ампер и всплески напряжений более тысячи вольт, что крайне важно при работе на реальную технологическую нагрузку. К недостаткам тиристоров следует отнести невозможность их естественного запираания, пока ток в них не упадет ниже значения тока удержания (доли Ампер для силовых тиристоров), и значительное время включения (минимум 3,2 мкс) и выключения (минимум 12,5 мкс для приборов до 8-го класса по напряжению включительно) [13]. Такие их особенности затрудняют формирование коротких (до 5 мкс) импульсов тока с частотами повторения свыше 2 кГц.

Наиболее эффективный способ уменьшения динамических потерь в ключах – использование приборов с малым временем включения и выключения. Применение цепочек, корректирующих траекторию рабочей точки ключей, позволяет снизить коммутационные потери в самом ключе, но неизбежно вызывает их рост во всей системе [1, 3]. Наименьшей инерционностью, а, следовательно, наименьшими динамическими потерями из рассмотренных выше ключей, характеризуются MOSFET. Промежуточное положение занимают IGBT. Наибольшие коммутационные потери наблюдаются в тиристорах [11–13].

В соединительных кабелях при протекании тока $i_{II}(t)$ наблюдаются потери энергии как на нагрев, вызванные их активным сопротивлением $\mathcal{E}_{II} = R_{II} \int_0^{\tau_p} i_{II}^2(t) dt$, так и на излучение электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне. Уменьшение первой составляющей достигается сокращением длины соединительных кабелей, увеличением площади их поперечного сечения, применением материалов с низким удельным электрическим сопротивлением и использованием многожильных литцендратов для устранения сокращения полезной площади поперечного сечения проводящего слоя на высоких частотах, вызванного скин-эффектом [1]. Уменьшение второй составляющей достигается согласованием импедансов выходной цепи генератора и нагрузки в диапазоне частот, эквивалентном длительности импульсов, сокращением длины кабелей, обеспечением отсутствия их изгибов и применением витых пар [1].

В разрядной камере происходит целый ряд процессов преобразования подведенной электрической энергии [6–10]. Независимо от тока в гранулированной среде, всегда присутствуют потери энергии на электрохимические процессы в рабочей жидкости и на ее нагрев. Уменьшить их можно применением очищенных жидкостей с высоким удельным электрическим сопротивлением, сокращением площади электродов до минимально возможной, уменьшением напряженности электрического поля в жидкости за счет как снижения напряжения импульсов до минимально возможного, так и увеличения эквивалентной длины протекания тока в ней, а также повышением крутизны фронтов импульсов, а следовательно, сокращением времени протекания данных процессов до возникновения плазменных каналов.

При протекании тока в металлических гранулах часть энергии теряется на их нагрев, а часть – в контактах между гранулами, протекание тока в которых в силу ряда причин не вызывает образования эрозионных частиц. В некоторых контактах возникают плазменные каналы. В зависимости от конкретных условий возможны несколько механизмов их возникновения [2, 6–8].

Механизм первый. Если микровыступы соседних гранул находятся в непосредственной близости друг от друга, но не соприкасаются, а оксидная пленка на их поверхности очень тонкая либо отсутствует, то за счет электролиза рабочей жидкости будет наблюдаться выделение газов на их поверхности. В случае водопроводной воды на катоде будет выделяться водород, а на аноде – хлор. В случае деионизованной воды на аноде будет выделяться кислород. В реальных технологических про-

цессах время, достаточное для образования вокруг микровыступа гранулы пузырька водорода толщиной, превышающей длину свободного пробега электрона в нем в три раза, что необходимо для развития электронной лавины, может составлять менее 0,1 мкс, т.е. не превышает длительность переднего фронта самых крутых импульсов полупроводниковых генераторов. Независимо от того, как возник газовый пузырек в промежутке между микровыступами, напряженность электрического поля будет сосредоточена в нем, поскольку его проводимость на несколько порядков ниже проводимости подключенной последовательно с ним рабочей жидкости. В таких условиях в газовом пузырьке может возникнуть и развиться электронная лавина, которая, в свою очередь, может привести к образованию стримера, а при благоприятном стечении обстоятельств – искры [7].

Механизм второй. При тех же начальных условиях, но больших плотностях тока в жидкости, например, при высокой ее электропроводности в промежутке между микровыступами соседних гранул, возможно ее локальное испарение с образованием пузырька за счет теплового действия тока. Далее процессы могут развиваться аналогично описанному выше.

Механизм третий. При сравнительно малой плотности тока, например, в рабочих жидкостях с малой электропроводностью, но большой напряженностью электрического поля между микровыступами без диэлектрических пленок, которая может быть увеличена за счет уменьшения радиуса кривизны последних в десятки раз, возможна автоэлектронная эмиссия с катода в жидкость, приводящая впоследствии к ее электрическому пробое [8].

Механизм четвертый. Если соседние гранулы имеют электрический контакт между микровыступами, то при большой плотности протекающего в нем тока возможен нагрев и испарение части металла приконтактных зон (электрический взрыв), что приводит к возникновению плазменных каналов [6].

Механизм пятый. Если соседние гранулы имеют поверхностные оксидные или другие пленки с низкой электропроводностью и соприкасаются без прослойки жидкости или газа, то возможен электрический пробой поверхностных пленок, как это происходит в твердом теле. При благоприятных условиях электрический пробой может эволюционировать в тепловую [2].

Обобщив эти механизмы предискровой стадии образования плазменных каналов между металлическими гранулами, погруженными в рабочую жидкость, можно свести их к четырем группам процессов электрического пробоя:

- 1) в газе (первый и второй механизмы) [7];
- 2) в жидкости (третий механизм) [8];
- 3) электрический взрыв тонких проводников (четвертый механизм) [6];
- 4) электрический пробой тонких диэлектрических пленок (пятый механизм) [2].

Независимо от механизма образования плазменных каналов, на первичную ионизацию атомов затрачивается энергия, которая в процессе последующих преобразований превращается в энергию излучения и тепловую. Если расположить данные группы процессов в соответствии с возрастанием затрат энергии на первичную ионизацию, то, с некоторыми допущениями, ряд будет выглядеть так: электрический пробой в газе, пробой тонких диэлектрических пленок, пробой в жидкости, электрический взрыв тонких проводников. Возникновение плазменных каналов приводит к появлению высокоактивных радикалов OH , O_3 , H^+ и других, обладающих инактивирующим действием и способствующих деструкции органических загрязнений при обеззараживании и очистке водных потоков [9].

Если лимитировать объемную плотность энергии, подводимой в контакт, ограничением одного из трех параметров импульса: тока (при использовании в качестве генераторов источников тока), напряжения (при использовании генераторов с круто падающей выходной характеристикой) или длительности, то при электрическом пробое в газе можно не допустить переход стримерной стадии в искровую. Как известно, ток и энергия стримера на порядки меньше соответствующих параметров искры. Поэтому стримеры не приводят к образованию на поверхности электродов видимых невооруженным глазом эрозионных лунок. Размеры эрозионных частиц, образующихся при обработке поверхности металлических электродов стримерами, как правило, не превышают десятков нанометров, т.е. использование стримерных, а не искровых разрядов может обеспечить получение наноразмерных эрозионных частиц металлов с узким распределением по дисперсности.

В канале стримера, в отличие от искрового канала, не происходит разогрева сравнительно большого объема вещества до высоких температур. Поэтому линейчатый спектр свечения стримера, обусловленный излучением с характерными длинами волн, вызванный квантовыми переходами электронов в присутствующих атомах с более высоких уровней на более низкие, в частности, при рекомбинации с ионами, всегда имеет определенный цвет [4]. В искровом канале, напротив, происходит

разогрев вещества до 6000–8000 К, что обуславливает сплошной спектр его излучения, воспринимаемый как белый цвет свечения. При искровом разряде возникает также ультрафиолетовое излучение, которое играет важную роль, например, при обеззараживании водных потоков данным методом [9]. В процессе электроплазменной эрозии металлических гранул в жидкости могут возникать как стримерные, так и искровые каналы. Первые являются более предпочтительными с точки зрения эффективности процесса образования ультрадисперсных эрозионных частиц.

Одним из методов увеличения доли стримерных каналов является применение принудительного вибрационного «вспушивания» слоя гранул в процессе их объемного электроискрового диспергирования [5,9,10], благодаря чему, во-первых, расширяется область устойчивой работы оборудования при низких напряжениях. В [5] на примере гранул *Al* и *Cu* показано, что минимальное напряжение импульсов, необходимое для устойчивого процесса объемного электроэрозионного диспергирования, может быть уменьшено на 50% за счет принудительной механической активации слоя. Данный эффект достигается улучшением условий образования плазменных каналов при механическом разрушении поверхностных пленок гранул с низкой электропроводностью, а также периодическим увеличением площади контактов за счет микро соударений гранул. Это способствует ограничению энергии, подводимой в плазменный канал, уменьшением мощности импульса в результате снижения его напряжения.

Во-вторых, за счет взаимного перемещения гранул, вызванного их принудительной механической активацией, наблюдается высокочастотная модуляция общего тока нагрузки с эквивалентной частотой свыше 100 кГц и ускоряются процессы переключения токов между различными участками поверхности гранул [9,10], что способствует ограничению энергии, подводимой в плазменный канал, за счет снижения времени протекания тока в нем.

В-третьих, вибрационное «вспушивание» слоя приводит к увеличению среднего расстояния между поверхностями гранул, что способствует остановке эволюции плазменных каналов на стадии стримера и снижает долю искровых каналов, а также увеличивает эквивалентное сопротивление канала [5,9,10]. Иными словами, наблюдается лимитирование энергии, подводимой в плазменный канал, ограничением величины тока в нем. Итак, принудительная механическая активация слоя металлических гранул в процессе их объемного электроэрозионного диспергирования позволяет одновременно задействовать три механизма ограничения энергии, подводимой в плазменный канал: по напряжению, току и времени. Это повышает долю низкоэнергетических стримерных каналов и способствует снижению размеров эрозионных частиц до нескольких сотен нанометров.

Вероятность возникновения стримеров повышается при наличии в разрядном промежутке незашунтированных жидкостью газовых пузырьков, размер которых вдоль линий напряженности электрического поля превосходит длину свободного пробега электрона в них в несколько раз, а величина напряженности поля достаточна для сообщения электронам энергии, необходимой для ионизации атомов. При этом коэффициент размножения электронной лавины должен быть больше 1. С увеличением размеров газовых включений вдоль линий напряженности электрического поля растет их эквивалентное электрическое сопротивление, следовательно, повышается вероятность ограничения эволюции плазменных каналов стадией электронной лавины или стримерной.

Барботирование газом слоя гранул, находящихся в жидкости, безусловно, увеличивает долю газовых включений, интенсифицирует перемещение гранул и способствует увеличению средних расстояний между ними в центральной части слоя. Однако, как показали эксперименты с гранулами *Al*, *Fe*, *Ti-Zr-Ni*, *Fe-B-Si*, *Ni-Mn-Ga*, *Cr-C-Ni*, *W*, *Cu* и другими при диспергировании их в воде, этаноле и керосине, барботирование воздухом, углекислым газом, азотом и аргоном приводило к следующим эффектам:

- 1) на 30–50% повышалось минимально необходимое для образования в слое плазменных каналов напряжение на электродах;
- 2) увеличивалась интенсивность акустических излучений вследствие роста силы гидродинамических ударов;
- 3) области свечения плазменных каналов становились крупнее, а их излучение становилось ярче и в ряде случаев приобретало желтый оттенок;
- 4) размеры эрозионных частиц существенно увеличивались и в некоторых случаях достигали сотен микрометров.

К похожим эффектам приводила интенсивная прокачка рабочей жидкости через слой гранул снизу вверх. Вероятнее всего, размеры пузырьков газа, получаемых в результате барботирования, слишком велики для возникновения в них значений напряженности электрического поля, достаточ-

ных для образования электронных лавин, а затем и стримеров при тех же значениях напряжения на всем слое. Схожесть эффектов, получаемых в результате барботирования и интенсивного прокачивания рабочей жидкости через слой гранул, позволяет предположить, что оба этих действия способствовали перераспределению расстояний между гранулами вдоль длины слоя. Так расстояния между гранулами, находившимися в центральной части потоков жидкости или газа, увеличивались вследствие их перемещения вверх данными потоками. Гранулы, находящиеся возле электродов, испытывали слабое механическое действие потоков либо прижимались друг к другу силами, возникающими в слое в результате прохождения через него жидкости или газа. Таким образом, наибольшее сопротивление имели несколько промежутков между гранулами в центре слоя. Поскольку данные промежутки соединены последовательно с остальными, в них возникала наибольшая напряженность электрического поля в результате приложения напряжения ко всему слою. Причем величина напряжения на единичном плазменном канале в этом случае была в несколько раз выше, чем в случае отсутствия потоков жидкости и газа.

Степень ионизации плазмы в искровом канале значительно выше, чем в стримере [7]. Следовательно, сопротивление искрового канала существенно меньше, чем стримера. Это способствует росту тока, мощности и энергии, подводимой в него. Вот почему в случае возникновения искрового канала энергия, затрачиваемая на ионизацию атомов в нем, на порядки превосходит затраты энергии, расходуемой на генерирование свободных носителей заряда в стримере. Как следствие, энергия, расходуемая на излучение, на гидродинамический удар и на разогрев приконтактных областей гранул, в искровом канале значительно выше, чем в стримере.

Процессы преобразования энергии в искровом канале протекают следующим образом [7]. При возникновении сквозного плазменного канала проводимости протекающий в нем ток нагревает плазму, повышая степень ее ионизации и расширяя диаметр канала. При этом электрическое сопротивление канала стремительно падает, что приводит к еще большему увеличению протекающего в нем тока. Иными словами, наблюдается положительная обратная связь по току, приводящая к лавинообразному развитию канала. Если выходная характеристика генератора импульсов близка к характеристике источника тока, например, в случае индуктивного накопителя энергии, то значение тока в канале стабилизируется. В дальнейшем возможны два варианта развития событий: 1) стабилизация баланса подводимой и отводимой энергии с последующим переходом искрового канала в дуговой малой мощности и 2) стремительное расширение, а затем схлопывание искрового канала.

Электрическая дуга настолько сильно разогревает приконтактные области гранул, что становится возможной термоэлектронная эмиссия с катода. В этом случае возможно расплавление приконтактных участков гранул и даже испарение металла с них в течение сравнительно большого интервала времени. Как правило, эрозионные частицы, получаемые в результате расплавления гранул относительно стабильной электрической дугой, имеют размеры больше сотен микрометров, а частицы, получаемые в результате испарения металла, – до единиц микрометров. Переход канала в дуговую стадию может существенно повысить размер эрозионных частиц, поэтому в данном случае он нежелателен. Ограничение длительности импульсов тока на уровне единиц микросекунд позволяет не допустить возникновения электрической дуги.

Если расширение искрового канала, вызванное высокой кинетической энергией ионов и электронов плазмы, происходит настолько быстро, что скорость подвода энергии в канал не позволяет поддерживать ее степень ионизации, то через некоторое время в результате разлета ионов температура и давление в центре канала падают. Как правило, давление падает ниже атмосферного, приводя к вскипанию расплавленных приконтактных зон гранул, так называемых ванн, и выплескиванию части расплавленного металла из них. Попадая в плазменный канал, металл в газообразном состоянии конденсируется на границах канала с окружающим его парогазовым облаком, образуя ультрадисперсную (до 1 мкм) фракцию искроэрозионных частиц. Расплавленные порции металла дробятся ударной волной, возникающей при схлопывании канала с низким давлением, и быстро охлаждаются, иногда закаляясь, в парогазовом облаке, образуя более крупную (единицы – десятки микрометров) фракцию искроэрозионных частиц. При этом концентрация проводящих частиц в канале стремительно падает, ток быстро уменьшается, и искра прекращает свое существование. Ударная волна, возникающая при схлопывании искрового канала, приводит к гидродинамическому удару, действие которого на гранулы хрупких металлов и сплавов приводит к их механическому разрушению и образованию крупной (сотни микрометров и более) фракции частиц. Как видим, в общем случае при искровой эрозии распределение получаемых частиц по размерам имеет три моды: первую составляют са-

мые мелкие частицы, образующиеся в результате испарения металла гранул; вторую образуют средние частицы, получаемые в результате расплавления и последующего дробления металла гранул; третью составляют самые крупные частицы, полученные в результате механического разрушения гранул ударной волной, возникающей при схлопывании искрового канала. Для повышения эффективности получения наноразмерных эрозионных частиц необходимо уменьшить долю частиц, возникающих в результате расплавления и механического разрушения гранул. Для этого имеет смысл повышать скорость нарастания фронтов импульсов энергии и уменьшать их длительность.

Если выходная характеристика генератора импульсов близка к характеристике источника ЭДС, например, в случае использования емкостного накопителя энергии, эволюция плазменного канала до стадии электрической дуги маловероятна, и развитие процессов происходит преимущественно по второму варианту. В акматической фазе тока, когда сопротивление искрового канала минимально, его вклад в общее сопротивление цепи нагрузки генератора может оказаться не основным. В этом случае разрядный ток будет в основном ограничиваться волновым сопротивлением разрядного контура $\rho = \sqrt{L_L/C}$. При этом амплитуда разрядного тока может оказаться на несколько порядков выше, чем в случае с индуктивным накопителем энергии. Соответственно длительность развития искрового канала, а, следовательно, и энергия, поступающая в него, также окажутся больше, что повышает вероятность расплавления больших объемов приконтактных областей гранул. Это, в свою очередь, повышает вероятность образования более крупных эрозионных частиц. Поэтому важно согласовывать волновое сопротивление контура с эквивалентным электрическим сопротивлением нагрузки.

Подытожив сказанное выше, можно сделать вывод, что далеко не вся энергия накопителя генератора, передаваемая в нагрузку, используется для получения ультрадисперсных эрозионных частиц. Во-первых, при значениях напряжения на нагрузке, ниже минимально необходимого для образования плазменных каналов U_{H0} , подведенная энергия расходуется лишь на электрохимические процессы и нагрев рабочей жидкости, поэтому не может считаться полезной для получения эрозионных частиц. Во-вторых, при превышении напряжения на нагрузке некоторого значения U_{H1} , достаточного для развития искровых каналов с высокой энергией, возрастает доля сравнительно крупных эрозионных частиц, что в ряде случаев недопустимо. Поэтому для оценки полезной энергии, расходуемой на получение эрозионных частиц всего спектра размеров, целесообразно пользоваться формулой

$$\mathcal{E}_{q0} = \int_{t_{01}}^{t_{02}} u_H(t) \cdot i_H(t) dt, \quad (1)$$

где $u_H(t)$ – зависимость напряжения на нагрузке от времени; $i_H(t)$ – зависимость тока нагрузки от времени; t_{01} – время достижения передним фронтом напряжения на нагрузке значения U_{H0} с момента начала импульса, с; t_{02} – время достижения задним фронтом напряжения на нагрузке значения U_{H0} с момента начала импульса, с.

Заметим, что в (1) потери энергии на первичную ионизацию, излучение, ударную волну, нагрев гранул и рабочей жидкости, а также на электрохимические процессы в интервале времени от t_{01} до t_{02} условно учитываются как полезные, поскольку их невозможно выделить при таком подходе. Строго говоря, данные потери энергии необходимо вычитать из (1). Для оценки полезной энергии на получение ультрадисперсных частиц при тех же допущениях формула (1) примет вид

$$\mathcal{E}_{q1} = \int_{t_{01}}^{t_{11}} u_H(t) \cdot i_H(t) dt + U_{H1} \int_{t_{11}}^{t_{12}} i_H(t) dt + \int_{t_{12}}^{t_{02}} u_H(t) \cdot i_H(t) dt, \quad (2)$$

где t_{11} – время достижения передним фронтом напряжения на нагрузке значения U_{H1} с момента начала импульса, с; t_{12} – время достижения задним фронтом напряжения на нагрузке значения U_{H1} с момента начала импульса, с.

Для оценки энергоэффективности процесса получения данным методом эрозионных частиц всего спектра размеров выражение (1) следует разделить на величину начальной энергии, запасенной в накопителе \mathcal{E}_C – в случае использования конденсатора, либо \mathcal{E}_L – в случае использования дросселя. Аналогично для оценки энергоэффективности процесса получения данным методом ультрадисперсных эрозионных частиц выражение (2) следует разделить на величину начальной энергии, запасенной в накопителе. Как видно из (2), для повышения энергоэффективности получения ультрадисперсных частиц металлов данным методом целесообразно формировать короткие (доли микросекунд) прямоугольные импульсы напряжения с крутыми фронтами и амплитудой не выше U_{H1} .

Выводы. 1. Уменьшение размеров эрозионных частиц, получаемых при объемном электроэрозионном диспергировании гранул металлов в жидкости, может быть достигнуто ограничением эволюции плазменных каналов стадией стримера.

2. Использование принудительного вибрационного «вспушивания» слоя металлических гранул в жидкости в процессе их объемного электроэрозионного диспергирования позволяет одновременно ограничить подводимую энергию импульса по напряжению, току и длительности, что способствует увеличению доли стримерных каналов, повышению дисперсности эрозионных частиц и энергоэффективности процесса.

3. Барботирование газом и гидродинамическая активация слоя металлических гранул в процессе их объемного электроэрозионного диспергирования увеличивает долю искровых каналов с высокой энергией, что способствует росту размеров эрозионных частиц.

4. Для повышения энергоэффективности получения ультрадисперсных частиц металлов рассмотренным методом целесообразно формировать короткие (доли микросекунд) прямоугольные импульсы напряжения с крутыми фронтами и амплитудой не выше значения, при котором между гранулами развиваются искровые каналы с высокой энергией.

1. Векслер Г.С., Пилинский В.В. Электропитающие устройства электроакустической и кинотехнической аппаратуры. – К.: Вища школа, 1986. – 382 с.

2. Воробьев Г.А., Мухачев В.А. Пробой тонких диэлектрических пленок. – М.: Сов. радио, 1977. – 72 с.

3. Захарченко С.Н. Оптимизация системы полупроводниковый ключ – демпфирующие цепочки с рекуперацией энергии // Техн. електродинаміка. Спец. вип. №2. – 1998. – Т.2. – С. 219–224.

4. Захарченко С.Н. Повышение эффективности преобразования энергии в процессах объемной электроэрозионной обработки гранулированных токопроводящих сред // Новини енергетики. – 2012. – №11. – С. 39–48.

5. Захарченко С.Н. Расширение области устойчивой работы систем объемного электроискрового диспергирования металлических гранул применением принудительной механической активации их слоя // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2010. – Ч.1. – С. 93–96.

6. Намитокоев К.К. Электроэрозионные явления. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.

7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.

8. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. – Томск: Изд-во Томского университета, 1975. – 256 с.

9. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Кучерявая И.Н., Лопатько К.Г., Афтандилянц Е.Г. Анализ методов повышения эффективности электроэрозионной коагуляции при очистке водных сред // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2008. – Ч.2. – С. 120–125.

10. Щерба А.А., Захарченко С.М., Лопатько К.Г., Шевченко Н.И., Ломко М.О. Разрядно-импульсные системы производства нанокolloидных растворов биологически активных металлов методом объемного электроискрового диспергирования // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – № 26. – С. 152–160.

11. <http://www.vishay.com/docs/91476/sihg24n6.pdf>

12. <https://ec.irf.com/IGBTselection/tool.htm>

13. <http://www.radioelementy.ru/help/thyristor-fast/>

УДК 621.3.014.14: 621.373.54: 621.3.011.72

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОТРИМАННЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНИХ ЧАСТИНОК МЕТАЛІВ ОБ'ЄМНИМ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ДИСПЕРГУВАННЯМ ЇХНІХ ГРАНУЛ У РІДИНІ

С.М. Захарченко, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail: snzakhar@bk.ru

Розглянуто основні процеси перетворення енергії генераторів електричних імпульсів при об'ємному електроерозійному диспергуванні металевих гранул у рідині. Дано практичні рекомендації щодо зниження втрат енергії при отриманні субмікронних електроерозійних частинок даним методом. Показано, що лімітування енергії плазмових каналів підвищує імовірність обмеження їхньої еволюції стадією стримера та сприяє зниженню розмірів електроерозійних частинок. Наведено порівняльний аналіз особливостей електроерозійного диспергування шарів металевих гранул при їх газодинамічній, гідродинамічній та вібраційній активаціях. Показано, що вібраційна активація дозволяє одночасно задіяти три незалежні канали обмеження енергії електричного імпульсу: за напругою, за струмом і за тривалістю. Це сприяє зниженню частки іскрових каналів на користь стримерів і, як наслідок – зменшенню розмірів ерозійних частинок до 1 мкм і менше. Бібл. 13.

Ключові слова: електроерозійне диспергування, розрядні імпульси, стример, іскра.

INCREASE OF EFFICIENCY OF OBTAINING OF ULTRADISPERSIVE METALS PARTICLES BY VOLUME ELECTROEROSIVE DISPERSION THEIR GRANULES IN A LIQUID

S.M. Zakharchenko

**Institute of Electrodynamical National Academy of Science of Ukraine,
Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,
e-mail: snzakhar@bk.ru**

The basic processes of transformation of energy of electric pulses generators in other kinds at volume electroerosive dispersion of metal granules in a liquid have been considered. Practical recommendations about decrease of losses of energy at obtaining of submicronic electroerosive particles by the given method are given. It is shown that limitation of energy of plasma channels raises probability of restriction of their evolution by a stage of a streamer and promotes decrease in the sizes of electroerosive particles. The comparative analysis of features of electroerosive dispersion of layers of metal granules by gas-dynamic, hydrodynamic and vibrating activations them. It is shown that vibrating activation makes possible to start working simultaneously three independent channels of restriction of energy of an electric pulse: on pressure, on a current and on duration. It promotes decrease of a percentage of spark channels in favor of streamers and, as consequence - to reduction of the sizes of erosive particles to 1 micron and less. References 13.

Key words: electroerosive dispersion, discharge pulses, streamer, spark.

1. Veksler G.S., Pilinskii V.V. Power supply units of electric-acoustic and film-technical devices. – Kyiv: Vyscha Shkola, 1986. – 382 p. (Rus)
2. Vorobyev G.A., Mukhachev V.A. Breakdown of thin dielectric films. – Moskva: Sovetskoe Radio, 1977. – 72 p. (Rus)
3. Zakharchenko S.N. Optimization of a System of semiconductor switch - snubber with recuperation energy // Tekhnichna elektrodynamika. Spetsialnyi vypusk №2. – 1998. – Vol.2. – Pp. 219–224. (Rus)
4. Zakharchenko S.N. Increase of efficiency of energy transformation in processes of volume electroerosive processing of the granulated current-carrying mediums // Novyny enerhetyky. – 2012. – №11. – Pp. 39–48. (Rus)
5. Zakharchenko S.N. Expansion of area of steady work of systems of volume electrospark dispersion of metal granules by application of compulsory mechanical activation of their layer // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist”. – 2010. – Vol.1. – Pp. 93–96. (Rus)
6. Namitkov K.K. Electrical-erosive phenomenon. – Moskva: Energiia, 1978. – 456 p. (Rus)
7. Raizer Yu.P. Physics of the discharge in gas: The manual. – Moskva: Nauka, 1987. – 592 p. (Rus)
8. Ushakov V.Ja. Pulse electric breakdown of liquids. – Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo universiteta, 1975. – 256 p. (Rus)
9. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Yatsiuk S.A., Kucheriavaia I.N., Lopatko K.G., Aftandiliants E.G. Analys of methods of raise of efficiency of electroerosive coagulation for clearing of water medium // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist”. – 2008. – Vol. 2. – Pp. 120–125. (Rus)
10. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Lopatko K.G., Shevchenko N.I., Lomko N.A. Discharge-pulsing systems of manufacture nanocolloid solutions of biologically active metals by a method of volume electrospark dispersion // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy: Zbirnyk Naukovykh Prats. – Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2010. – № 26. – Pp. 152–160. (Rus)
11. <http://www.vishay.com/docs/91476/sihg24n6.pdf>
12. <http://ec.irf.com/IGBTselection/tool.htm>
13. <http://www.radioelementy.ru/help/thyristor-fast/>

Надійшла 20.11.2012
Received 20.11.2012