



## ПРИМЕНЕНИЕ СВАРОЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

А.М. ЖЕРНОСЕКОВ, В.М. КИСЛИЦЫН

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Установлена возможность расширения области применения импульсных сварочных источников питания дуги для процессов газопламенной обработки металлов. При этом постоянно дорожающий природный газ заменяется водородно-кислородными смесями или водородом. Использование в качестве электродов никеля вместо низкоуглеродистой стали при электролизе воды позволило снизить напряжение процесса до 2,1 В. Установлена закономерность возрастания процентного содержания более мелких фракций порошка (1...50 мкм и 1 мкм и менее) при увеличении частоты тока анодного растворения. Полученные результаты указывают на перспективность проведения исследований в данном направлении для повышения эффективности электрохимических процессов получения водорода, а также микро- и нанопорошков для изготовления сварочных и припойных порошковых материалов. Библ. 10, рис. 3.

*Ключевые слова:* источники питания, частота импульсов, генераторы водородно-кислородных смесей и водорода, микропорошки металлов, эффективность процессов

Импульсные источники питания дуги для сварки плавящимся электродом в защитных газах широко используются в таких отраслях промышленности как судостроение, химическое машиностроение, ракетостроение, автомобильная промышленность, строительство трубопроводов и многих других [1, 2]. Среди различных параметров регулирования процесса импульсно-дуговой сварки важным является частота переноса капель электродного металла, которая обычно находится в диапазоне 30...300(500) Гц. Плавное регулирование частоты импульсов сварочного тока позволяет осуществлять процесс переноса металла электрода по принципу «1 импульс-1 капля». В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины давно занимаются вопросами создания оборудования и технологии импульсно-дуговых процессов. Созданы различные виды электросварочного оборудования, в том числе и источники питания для импульсно-дуговой сварки, которые хорошо зарекомендовали себя при сварке конструкций ответственного назначения [3, 4]. Главными особенностями таких источников является возможность плавной регулировки частоты импульсов тока от 30 до 300 Гц, длительности импульсов 0,5...5 мс и амплитуды до 850 А.

Источники питания дуги применяются и в смежных технологиях, например, при получении водородно-кислородных смесей для процессов сварки, пайки, сварко-пайки и других операций газопламенной обработки металлов. Газогенераторы в указанных процессах состоят из источника постоянного сварочного тока и электролизера. К преимуществам использования водорода и водородно-кислородных смесей в процессах газопла-

менной обработки относится возможность резкого сокращения потребления стабильно дорожающего природного газа и сокращения загрязнения окружающей среды.

Кроме того, одним из вариантов существенного снижения затрат на приобретение сварочных и припойных материалов является возможность изготовления *in-situ*, например, припойных паст требуемого состава с гарантированным качеством, способами электрохимического диспергирования черных, цветных и благородных металлов. Поэтому целесообразно проведение экспериментальных исследований по повышению эффективности электрохимических процессов за счет регулирования (увеличения) частоты тока.

Для проведения экспериментальных исследований влияния частоты тока на некоторые электрохимические процессы были выбраны процессы, наиболее воспроизводимые по конечному результату. Это, во-первых, процессы, востребованные в области энергетики будущего, например, получения водорода электролизом воды. Во-вторых — процессы изготовления микропорошков, включая нанопорошки, перспективность применения которых доказана как в области металлургии, так и во многих других отраслях техники и медицины.

Несмотря на кажущуюся разноплановость рассматриваемых процессов, их объединяют аналогичные условия реализации электрохимических реакций, протекающих в водной среде на поверхности электродов, подключаемых к источникам постоянного тока.

К существенным отличиям этих процессов относятся параметры их проведения, например,

состав водных сред, материалы электродов, параметры источников питания (напряжение, ток и частота), и конечные продукты, получаемые в ходе этих процессов.

В настоящее время около 95 % водорода во всех странах мира получают с помощью каталитической конверсии водяного пара или риформингом метана. Однако водород, получаемый этими способами, не пригоден для питания топливных ячеек, преобразующих химическую энергию в электрическую, например, для привода электродвигателей транспортных средств. Для топливных ячеек требуется водород повышенной чистоты, например, получаемый из воды электролизом.

Электролитический водород намного дороже каталитического из-за высоких затрат на обеспечение взрыво- и электробезопасности при его получении, а также существенных удельных затрат электроэнергии.

Одно из основных препятствий к широкому применению водорода было устранено разработкой новых типов электролизеров, обеспечивающих высокую степень взрыво- и электробезопасности при производстве не только водорода, но и водородно-кислородной смеси [5, 6]. Остается нерешенной задача снижения энергозатрат, необходимых для получения электролитического водорода.

К наиболее распространенным способам получения микро- и нанопорошков металлов или их оксидов относятся электроискровое и электровзрывное диспергирование [7], распыление жидкого металла струей воды, газа или конденсация паров металла при его нагреве электронным лучом, высокочастотной плазмой [8], лазером.

Эти процессы характеризуются высокими энергетическими затратами, вызванными необходимостью нагрева металла намного выше температуры его плавления. В связи с этим обстоятельством ис-

пользование микро- и нанопорошков, получаемых этими способами, экономически оправдано лишь в особых случаях, например, в исследовательских проектах и в медицине, где потребность в микро- и нанопорошках измеряется граммами, но не в широко используемых технологических процессах, например, в процессах сварки, пайки, с потребностью сотен килограммов. К тому же, использование вышеуказанных процессов получения микро- и нанопорошков оправдано только при условии эффективного решения проблемы получения их в монодисперсном виде, что позволяет исключить трудоемкую операцию рассеивания получаемого продукта по фракциям.

Целью данной работы является изучение влияния частоты тока электролиза на эффективность выше указанных электрохимических процессов.

Существующая аппаратура для реализации электролитического способа получения водорода характеризуется коэффициентом преобразования энергии электрического тока в химическую на уровне 70 %. В настоящее время появилась возможность улучшить этот показатель до 80 % и выше не только за счет повышения давления и применения малоизнашиваемых анодов с покрытиями из металлов платиновой группы, но и в результате использования современных источников питания для процессов электролиза, что позволяет снизить себестоимость электролитического водорода.

Для проведения экспериментальной проверки идеи электролиза на повышенных частотах были использованы разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона источники питания для импульсно-дуговой сварки.

В состав стенда для проведения исследований, помимо измерительной и контролирующей аппаратуры, входили: импульсный источник питания, обеспечивающий ток электролиза до 300 А, и электролизер, состоящий из 10...12 последовательно включенных электролитических ячеек.

Проведенные в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины около десяти лет назад эксперименты по выявлению влияния частоты импульсов тока на процесс электролиза воды показали возможность повышения КПД за счет снижения напряжения электролиза от 2,4 до 2,16 В [9]. Эти результаты были получены на электролитической ячейке с электродами из низкоуглеродистой стали. Проведение электролиза воды на повышенной частоте с использованием в качестве электродов более дорогих металлов, например, никеля, позволило снизить напряжение электролиза до 2,1 В (рис. 1).

Судя по графику, приведенному на рис. 1, незначительное, на первый взгляд, снижение напряжения электролиза может способствовать до-

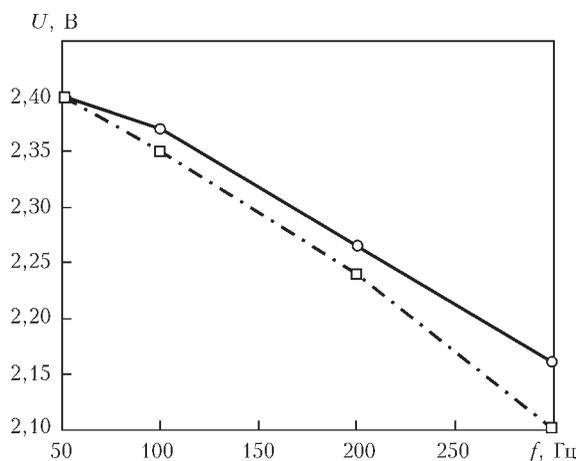


Рис. 1. Зависимость напряжения на электролитической ячейке от частоты следования импульсов тока (сплошная кривая — электроды из низкоуглеродистой стали; пунктирная — электроды из никеля)

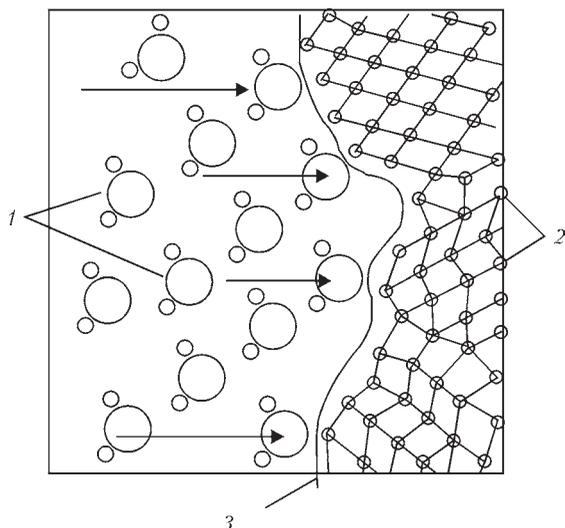


Рис. 2. Схема процессов, протекающих на поверхности электрода при электролизе воды: 1 — молекулы воды; 2 — атомы металлического электрода; 3 — граница двойного электрического слоя

стижению ощутимой экономии электроэнергии в процессах получения электролитического водорода, в связи с объемами его производства, измеряемого миллионами тонн в год.

В случае использования постоянного тока с наличием пульсации, характерной для источников питания с обычными схемами выпрямления (по схеме Ларионова или мостовой схеме), помимо выделения продуктов электролиза на поверхности электродов происходит процесс анодного растворения наиболее выступающих участков электрода, то есть своего рода электрохимическая полировка рабочей поверхности электродов. При этом происходит ее пассивация за счет образования на ней пленок оксидов, растворенных газов и химических соединений, повышающих электрическое сопротивление поверхности электродов. Для компенсации постепенного возрастания напряжения на электролитической ячейке электролизеры приходится периодически отключать и проводить деполяризацию электродов путем изменения полярности напряжения на ячейке.

Анализируя процессы, протекающие в нашем случае на поверхности электрода при электролизе воды, можно заметить, что, помимо протекания окислительно-восстановительных реакций вблизи поверхности электрода в зоне двойного электрического слоя (ДЭС), неизбежно возникают стримеры электрического тока (линии наиболее вероятного пробоя диэлектрической среды, к которой относится вода и водные растворы солей).

Весьма вероятно, что экспериментально выявленные нами преимущества использования тока повышенной частоты в процессах электролиза и анодного растворения металлов можно объяснить на основании предлагаемой модели процесса электролиза (рис. 2).

Стрелками на данном рисунке показаны линии предпочтительного протекания электрического тока, направленные к выступам шероховатой поверхности электрода. Аналогичные процессы протекают и на выступах поверхности катода, где происходит растворение водорода в металле и увеличение толщины слоя адсорбированного водорода, для пробоя которого уже не всегда достаточен уровень приложенного напряжения электрического поля. В этом случае возрастает толщина ДЭС, в котором происходит основное падение напряжения на электролитической ячейке. Последующее экранирование углубленных мест поверхности электродов слоем адсорбированных газов вызывает необходимость дополнительного повышения напряжения электрического поля.

Резкий подъем температуры в микрizonaх электрода, на которых возрастает плотность тока, сопровождается локальным нагревом поверхности, что приводит к возникновению ударных механических волн в электролите и интенсивному отрыву как молекул водорода от катода и обнажению его рабочей поверхности, так и пленки оксидов металла, образующихся на поверхности анода.

В случае проведения электролиза импульсами тока повышенной частоты наличие паузы между импульсами приводит к тому, что, несмотря на повышенное напряжение каждого отдельного импульса, средняя величина напряжения на электролитической ячейке оказывается ниже при использовании повышенной частоты (50...100 Гц).

Исследованиям процессов выделения кислорода на поверхности анода всегда уделяли больше внимания, чем процессам выделения водорода, в связи с преимущественным электрохимическим растворением анодов. При этом не принимался во внимание известный факт более интенсивного тепловыделения на катоде, чем на аноде, что указывает на необходимость более детального рассмотрения процессов, происходящих именно на катоде.

Из литературных данных [10, 11] следует, что при электролизе водных растворов величина перенапряжения выделения водорода в основном зависит от материала катода и плотности тока электролиза. Увеличение плотности тока приводит к тому, что в процессе электролиза катод практически за несколько десятков секунд покрывается слоем адсорбированного водорода, что сопровождается увеличением напряжения электролиза из-за роста переходного электрического сопротивления на границе металл-электролит. На аноде протекают параллельные процессы увеличения толщины оксидных пленок.

Эксперименты показали, что при использовании пульсирующего тока с импульсами обратной поляр-

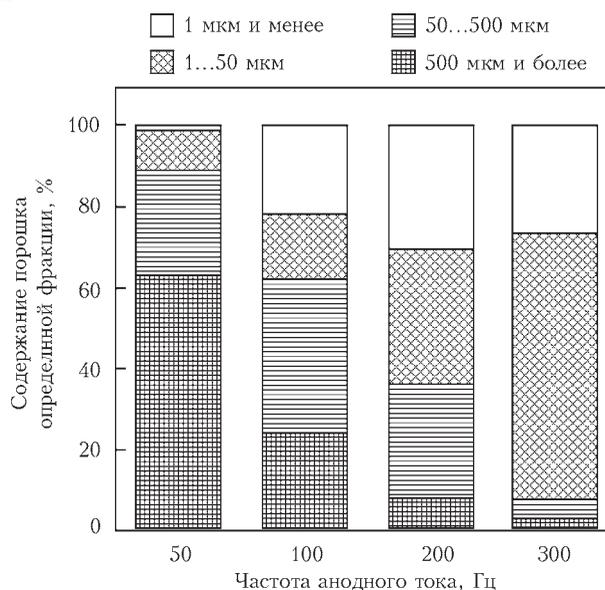


Рис. 3. Влияние частоты тока при растворении никелевого анода на размеры микропорошка

ности, в моменты перехода через нулевое значение возникает скачкообразное изменение потенциала катода. Вероятно, именно это обстоятельство приводит к образованию новых центров адсорбции и к перераспределению адсорбированных пузырьков газа. При этом от поверхности катода отрываются наиболее крупные пузырьки водорода, которые удаляются из объема электролита. При следующем импульсе тока электролиза выделение водорода наиболее интенсивно будет происходить преимущественно в новых зонах на поверхности катода, возникших в процессе деполяризации, причем при меньшем значении напряжения источника питания.

Первостепенное значение в данном случае имеет не снижение напряжения, вызванное пульсацией, характерной для обычных выпрямителей с питанием от сети переменного тока, а полное прекращение тока электролиза, достигаемое при падении напряжения до нуля. Очевидно, наличие незначительного пика отрицательного напряжения будет также способствовать удалению газового подслоя на поверхности катода, что способствует снижению величины перенапряжения.

Проведение технологических экспериментов по высокотемпературной пайке образцов меди и латуни [12] выявило перспективность использования паяльных паст на основе микропорошков для получения соединений металлов толщиной в пределах 40...1000 мкм.

Результаты дальнейших экспериментальных работ свидетельствуют о том, что паяльные пасты на основе микропорошков, в сравнении с пастами на основе порошков с частицами размером 40 мкм и выше, выпускаемых общепринятыми способами изготовления, обладают набором следующих преимуществ: возможность снижения температуры нагрева при пайке на 50...70 градусов

и сокращения времени пайки, что представляет ценность для соединения материалов, критичных к температуре нагрева; сокращение расхода припоя и флюса не менее, чем на 20 %; расширение диапазона толщин соединяемых металлов до 40 мкм и менее.

Преимущества использования тока повышенной частоты были выявлены также и в процессах электролитического растворения металла анода в водной среде и в спиртовом растворе. К ним относится, во-первых, возможность повышения степени монодисперсности порошков, во-вторых – возможность снижения энергоемкости процессов диспергирования в сравнении со способами, характеризующимися нагревом металла выше точки его плавления.

При диспергировании использовали медь М1, никель НП2 и серебро чистотой 99,9 (банковский металл). Кроме того, каждый из вариантов диспергирования проводили в диапазоне частот 50...300 Гц, а также на частоте 10 кГц (при диспергировании серебра).

В ходе проведения экспериментов было установлено, что в результате электролитического (анодного) растворения металлов происходит образование микрочастиц различного размера, которые условно разделены нами на следующие группы: а) 500 мкм и крупнее; б) 500...50 мкм; в) 1...50 мкм; г) 1 мкм и менее.

Масса порошков с размерами зерен до 50 мкм была определена методом отбора порошка соответствующей зернистости на установке для просеивания с набором контрольных сит. Для порошков более мелкой фракции была использована методика, основанная на подсчете числа зерен при визуальном измерении их размеров соответственно делениям окулярной сетки микроскопа при увеличении до 1800 (в иммерсионной жидкости). Данная методика используется для определения зернистости алмазных порошков.

По результатам проведенных экспериментов построена гистограмма различных фракций микропорошков в зависимости от частоты тока при анодном растворении металла (рис. 3).

Из гистограммы, приведенной на рис. 3 просматривается закономерность возрастания процентного содержания более мелких фракций порошка при увеличении частоты тока анодного растворения.

Эксперименты, проведенные по анодному растворению серебра показали возможность получения суспензии микропорошка его оксидов с дисперсностью менее 1 мкм. Однако одним из существенных недостатков процесса диспергирования серебра в водной среде является склонность получаемого микропорошка к коагуляции с после-



дующим ростом отдельных кристаллитов длиной до 2 мкм и шириной около 2...5 мкм.

Для исключения указанного недостатка срок хранения микропорошков от момента получения до приготовления паяльной пасты и использования ее в процессах пайки не должен превышать одного-двух десятков часов.

### Выводы

1. Использование повышенной частоты тока способствует повышению КПД процесса электролитического получения водородно-кислородных смесей и водорода, а также повышению выхода порошков металлов более мелкой фракции для приготовления паяльных паст.

2. Изготовление микропорошков непосредственно перед процессом пайки позволяет использовать их в активном состоянии как в виде монокомпонента, так и смесей различных металлов.

3. Комплект оборудования, состоящий из источника питания повышенной частоты сварочного тока и генератора водородно-кислородной смеси позволяет расширить его диапазон использования как для операций газопламенной обработки металлов, так и для процессов электролитического диспергирования металлов.

1. *Жерносеков А.М., Андреев В.В.* Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (Обзор) // Автомат. сварка. – 2007. – № 10. – С. 48–52.

2. *Жерносеков А.М.* Тенденции развития управления процессами переноса металла в защитных газах (Обзор) // Там же. – 2012. – № 1. – С. 33–38.

3. *Источник питания для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом с автоматической стабилизацией сварочных параметров / П.П. Шейко, В.М. Павшук, А.М. Жерносеков, Ю.О. Шимановский // Сварщик. – 2003. – № 4. – С. 4.*

4. *Сварка конструкций летательных аппаратов из алюминиевых сплавов больших толщин / О.Н. Кудряшов, О.М. Новиков, И.В. Алексеев и др. // Свароч. пр-во. – 2001. – № 12. – С. 31–33.*

5. *А.с. СССР 507668. Электролизер для получения гремучего газа из воды и водных растворов / В.К. Лебедев, А.А. Россошинский, В.М. Кислицын и др. – Опубл. 27.04.76, Б.И.– 1976. – № 11.*

6. *Письменный А.С. Перспективы развития газопламенной обработки материалов водородно-кислородными смесями / А.С. Письменный, В.М. Кислицын // Автомат. сварка. – 1995. – № 2. – С. 39–42.*

7. *Spark-eroded particles: size analysis, cooling rate, microstructure / A.A. Scherba, A.D. Podoltsev, L.N. Kucheryavaya, A.E. Perekos // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 5. – С. 3–8.*

8. *Technology using microwave heating may impact electronics manufacture. (<http://www.technology.org/2014/06/11/technology-using-microwave-heating-may-impact-electronics-manufacture/>)*

9. *Жерносеков А.М., Кислицын В.М.* Повышение эффективности газогенераторов водородно-кислородной смеси // Автомат. сварка. – 2007. – № 4. – С. 57–58.

10. *Лебедев В.В.* Физико-химические основы получения водорода из воды. – М.: Наука, 1969. – 134 с.

11. *Фиошин М.Я., Павлов В.В.* Электролиз в неорганической химии. – М.: Наука, 1976. – 105 с.

12. *On issue of brazing metals using powder braze alloys of different dispersity / A.S. Pismenny, V.I. Shwets, V.S. Kushuk-Yatsenko et al. // The Paton Welding J. – 2008. – № 12. – P. 34–36.*

Поступила в редакцию 12.03.2015

## ■ НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ОПЛАВЛЕНИЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КРЕСТОВИН

В ИЭС разработана технология контактной стыковой сварки пульсирующим оплавлением высокомарганцевистой стали с рельсовой сталью через вставку из аустенитной стали.

Опытные образцы железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями были изготовлены и прошли полигонные испытания на экспериментальном кольце во ВНИИЖТ (РФ). После прохождения по сварным крестовинам установленного нормативами тоннажа подвижного состава усталостных повреждений в сварных стыках не обнаружено. Образцы сварного биметаллического инструмента

### Технические характеристики специализированной контактной стыковой машины К924М:

Мощность, при ПВ=50%. кВт	180
Максимальное усилие осадки, кН	1500
Максимальное усилие зажатия, кН	4000
Максимальное свариваемое сечение, мм <sup>2</sup>	15000
Масса машины сварочной, кг	42000

Разработанная технология сварки и специализированная машина К924М позволяют получать соединения, соответствующие требованиям ТУ У ДП 32-4520.13.500-007-2002, без применения дополнительной термической обработки.

Технология и оборудование предназначены для сварки железнодорожных крестовин из высокомарганцевистой стали с рельсовыми окончаниями через вставку из аустенитной стали рельсов, применяется при строительстве и ремонте рельсовых путей.

Технология и оборудование освоены и применяются на ОАО «Днепропетровский стрелочный завод».

