

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ АНОДНОЙ ОБРАБОТКИ В
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Показано, что при плавном повышении напряжения в диапазоне от 0 до 550 В, приложенного к активному аноду, анодный процесс последовательно проходит через пять стадий (режимов). Приведены характеристики режимов и области применения в промышленных масштабах электролитной анодной обработки в водных растворах электролита при различных рабочих напряжениях.

Анодный и катодный процессы в водных растворах электролита имеют ряд существенных различий в природе физико-химических явлений, протекающих вблизи и на поверхности активного электрода, под которым понимают электрод с меньшей площадью поверхности. Анодный процесс сопровождается растворением, а катодный при определенных напряженностях электрического поля – эрозией металла. При плавном повышении напряжения в диапазоне от 0 до 550 В, приложенного к активному аноду, анодный процесс последовательно проходит через пять стадий (режимов): электролиз, коммутационный режим, режим электролитно-плазменного нагрева, электрогидродинамический и электролитно-разрядный режимы [1]. На рис. 1 представлена схематичная обобщенная вольтамперная характеристика анодного процесса.

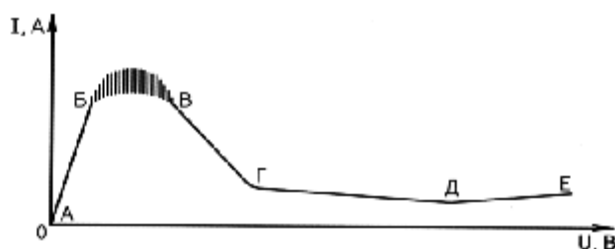


Рис. 1. – Схематичная обобщенная вольтамперная характеристика анодного процесса

Режим электролиза реализуется при относительно низких рабочих напряжениях (область АБ на рис. . При этом температура анода близка к температуре электролита. Прохождение электрического тока в системе «металлический катод–электролит–металлический анод» подчиняется закону Ома, а количество металла, растворившегося на поверхности анода, связано законами Фарадея с количеством электричества, прошедшего через электролит. В режиме электролиза проводится электрохимическая обработка, в том числе электрохимическое полирование.

Повышение рабочего напряжения до 60–70 В и плотности тока до 6 А/см² приводит к установлению коммутационного режима обработки (область БВ на рис. , который характеризуется стохастическим образованием с частотой порядка 10,0 кГц светящейся парогазовой оболочки около поверхности анода, представляющей собой первую фазу электрического разряда в электролите [2, 3]. Вольтамперная характеристика процесса становится неустойчивой. Наблюдаются значительные по амплитуде колебания силы электрического тока. Температура анода повышается до 100 °С [4]. Цвет свечения парогазовой оболочки зависит от химического состава электролита. Например, «холодный» голубой цвет характерен для водного раствора серной кислоты, а «теплый» желтый цвет – для водного раствора серной кислоты с сульфатом натрия. Процесс сопровождается едва заметным шумом.

При увеличении плотности тока от 6 до 16 А/см² парогазовая оболочка начинает расширяться, а равномерное свечение дополняется появлением в оболочке отдельных искр, возникающих на различных участках анода и быстро перемещающихся по его поверхности. Процесс сопровождается «сухим» треском, характерным для искрового разряда. Авторы монографии [3] связывают свечение и искровые разряды в парогазовой оболочке с образованием на поверхности вольфрамового анода полупроводниковой пленки и ее искровым пробоем, а также с электролюминесцентным эффектом. Автор работы [2] полагал, что прохождение электрического тока через парогазовую оболочку и ее свечение обусловлено ионизацией газа внутри оболочки.

Исследования, проведенные А.А. Факторовичем [5], были направлены на практическое применение эффекта коммутации электрического тока в электролите при электроискровой размерной обработке и легировании поверхности металлов твердыми сплавами. Электролитический прерыватель тока применялся в сильноточных импульсных генераторах, а также в хемотронике, где электролитический прерыватель тока выполнял функции датчиков давления газа, температуры и расхода электролита, линейных и угловых перемещений. Большое число работ посвящено решению проблемы очистки поверхности проволоки, проката и слитков от минеральных смазок и окалины.

Дальнейшее повышение напряжения на аноде свыше 80–90 В приводит к стабилизации парогазовой оболочки, снижению анодной плотности тока до 0,5–1 А/см² и установлению третьего режима анодного процесса – режима электролитно-плазменного нагрева (область ВГ на рис. , который впервые был исследован Келлогом [2]). Исследования показали, что режим характеризуется устойчивым свечением парогазовой оболочки, наличием в ней искр и нагревом анода до 165–620 °С. Автор связывал стабильность оболочки и нагрев анода с эффектом пленочного кипения электролита вблизи поверхности анода. Так же, как и в коммутационном режиме, в режиме электролитно-плазменного нагрева Келлог объяснял механизм прохождения электрического тока через парогазовую оболочку газовыми разрядами, вызывающими ионизацию газа внутри оболочки.

Иную точку зрения на механизм прохождения тока высказал В.С. Мурас [6], который считал парогазовую оболочку диэлектрической и термоизоляционной средой, отделяющей поверхность анода от электролита. Им было установлено, что скачок потенциала в области парогазовой оболочки составляет 93–97% от общего падения напряжения на ванне. В.С. Мурас полагал, что сильное электростатическое поле в оболочке вызывает прорыв (замыкание) оболочки микроскопическими электролитными мостиками, которые и обеспечивают прохождение через нее электрического тока. Другая гипотеза о механизме прохождения тока через оболочку предложена в [4]. Образование парогазовой оболочки авторы монографии связывают с тепловым воздействием электрического тока на электролит в прианодной области и в значительно меньшей степени с электролизными процессами. Согласно этой гипотезы, электрическая проводимость оболочки обеспечивается за счет тлеющего и искровых разрядов.

Большой вклад в разработку теории и промышленных технологий высокотемпературного нагрева заготовок в анодном режиме обработки внесли академик АН МССР Б.Р. Лазаренко с учениками и ряд других исследователей. Разработанные технологии обеспечивают высокоскоростной нагрев заготовок до 1000 °С для последующейковки, штамповки, при изготовлении проката, термической и химико-термической обработки и получении заданных структур у специальных сплавов. Следует отметить, что, несмотря на большой объем проведенных исследований, до настоящего времени нет единой общепризнанной теории, объясняющей эффект нагрева при анодной обработке в электролите, что связано со сложностью физико-химических процессов, протекающих на поверхности анода при повышенных напряжениях. Так, например, существующие гипотезы не в состоянии объяснить установление электрогидродинамического режима анодного процесса (область ГД на рис. при незначительном повышении рабочего напряжения после установления стабильного режима нагрева или изменении химического состава и концентрации раствора электролита. Электрогидродинамический режим характеризуется наличием самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите, прогнозируемым растворением металла на поверхности анода, снижением анодной плотности тока до 0,15–0,4 А/см² и температуры анода до 90–100 °С [4]. Переход от режима высокотемпературного нагрева к

электрогидродинамическому режиму исследователи связывают с увеличением толщины парогазовой оболочки, ее неустойчивостью и срывом на отдельных участках поверхности анода, с химическим составом, концентрацией, коэффициентом поверхностного натяжения и кинематической вязкостью электролита, возникновением в электролите мелких заряженных пузырьков и коронных электрических разрядов в парогазовой оболочке [4, 5].

Исследованию эрозии поверхности анода при повышенных рабочих напряжениях посвящено большое число работ. В работах [3, 7] отмечается, что в коммутационном режиме обработки наблюдается интенсивное растворение поверхности анода, а в режиме электролитно-плазменного нагрева оно отсутствует или имеет очень малую величину. Авторы работ [8, 9] установили, что поверхность образцов из стали Ст3 после обработки в режиме электролитно-плазменного нагрева в водном электролите, содержащем 3 масс.% соляной кислоты и 10 масс.% ацетона, покрыта черной оксидной пленкой FeO, образовавшейся, по их мнению, в результате высокотемпературного окисления железа. Выход металла по току в расчете на Fe²⁺ составлял от 5 до 40%. При переходе в электрогидродинамический режим обработки эрозия анода резко возрастала. При этом черная оксидная пленка на поверхности анода отсутствовала, а выход металла по току в расчете на Fe²⁺ составил 150–160%. Авторы предположили, что это обусловлено процессом растворения металла при высоких анодных плотностях тока, механизм которого они не детализировали.

Авторы работы [10] исследовали эрозию поверхности анода из стали 10 и хрома при электролитно-плазменном нагреве и в электрогидродинамическом режиме при обработке в водных растворах серной кислоты, хлорида аммония, гидроксида и хлорида натрия. Было установлено, что наибольшая скорость эрозии наблюдалась в электрогидродинамическом режиме в области рабочих напряжений от 220 до 280 В при обработке в 20%-ом водном растворе хлорида аммония. При этом максимальный выход металла по току составил 220% для стали 10 в расчете на Fe²⁺ и 400% для хрома в расчете на Cr³⁺. В режиме электролиза выход по току для стали 10 был близок к 100%. При обработке в электрогидродинамическом режиме в 2%-ом водном растворе гидроксида натрия максимальный выход по току для стали 10 составил 31% и 130% для хрома. В этом же электролите в режиме электролиза выход по току для стали 10 не превышал 0,5%. Аналогичные характеры зависимости растворения хрома и стали 10 от рабочего напряжения авторы получили для 20%-го водного раствора хлорида натрия и 30%-го водного раствора серной кислоты. При этом максимальное значение выхода металла по току при обработке в 30%-ом растворе серной кислоты достигало 500% для хрома и 300% для стали 10. Авторы работы объясняют повышенный съем металла при обработке в электрогидродинамическом режиме комбинацией интенсивного электрохимического растворения и электрической эрозии поверхности анода под действием искровых разрядов.

Впервые на возможность полирования поверхности металлов в электрогидродинамическом режиме обработки обратил внимание В.С. Мурас [11]. По его мнению, поверхность анода под воздействием электролитных мостиков подвергается эрозионной полировке. Однако маловероятно получить зеркальную поверхность в условиях ее электрической эрозии. Авторам патента [12] удалось обеспечить полирование заготовок из одно- и многофазных сплавов, в частности из латуни, с приданием поверхности зеркального вида в режиме электролитно-плазменного нагрева. Однако, начиная с момента выдачи первого авторского свидетельства [13], большинство ученых, занимающихся исследованием процесса полирования металлов и сплавов в водных растворах электролита при высоких рабочих напряжениях, обоснованно считают, что высокого качества поверхности можно достичь только в электрогидродинамическом режиме. Метод обработки, разработанный в Белорусском политехническом институте, получил название «электроимпульсное полирование металлов и сплавов» [14]. Следует отметить, что недостаточная изученность физико-химических закономерностей электрогидродинамического режима обработки и необоснованное предположение исследователей о механизме электрической проводимости парогазовой оболочки, базирующееся на электрических разрядах типа тлеющего или коронного [3], послужили основанием для использования термина «электролитная плазма», вследствие чего впоследствии метод электроимпульсного полирования был назван плазменно-электролитной полировкой, электролитно-плазменной и электролитно-разрядной обработкой (полировкой). По этим причинам англоязычное название метода до настоящего времени также не общепринято:

Plasma-electrolytic polishing (США, Словакия), Plasma polishing (EPP process) (Германия, Нидерланды), Electro plasma polishing (Китай) и Electro-discharge polishing (Болгария).

В настоящее время электроимпульсное полирование широко применяется в промышленных масштабах для финишной обработки преимущественно наружных поверхностей деталей различного назначения, изготовленных из сплавов на основе железа, хрома, никеля и цветных металлов, с одновременным удалением заусенцев и округлением острых кромок, подготовки поверхности под нанесение вакуумно-плазменных покрытий, удаления дефектных вакуумно-плазменных покрытий, оксидных пленок и окалины небольшой толщины и очистки поверхности деталей от минеральных и органических загрязнений, а также для восстановления внешнего вида изделий, утративших свои первоначальные декоративные свойства в результате эксплуатации или воздействия неблагоприятных внешних факторов.

Монография [15] является одной из первых систематизированных работ, посвященных исследованию электролитно-разрядного режима анодной обработки. Изучая разрядные явления на алюминиевом аноде при рабочем напряжении свыше 340 В, авторы обнаружили «вытеснение искр» с поверхности анода в отчетливо наблюдаемые газовые пузырьки. В отличие от падающей вольтамперной характеристики электрогидродинамического режима повышение напряжения обработки свыше 400 В приводит к увеличению тока разряда (область ДЕ на рис. и толщины парогазовой оболочки. На основании анализа литературных источников авторы монографии [16] полагают, что разряд в парогазовой оболочке при рабочем напряжении свыше 350 В является тлеющим.

Электролитно-разрядный режим анодной обработки пока не получил широкого применения в промышленных масштабах. В основном он используется для оксидирования поверхности вентильных металлов – алюминия, титана, тантала, ниобия, циркония и сплавов на их основе, плазменно-электролитической поликонденсации на поверхности анода неорганических полимерных соединений и для синтеза на поверхности металлов и сплавов алюмосиликатов из суспензий. В последнее время интенсивно ведутся работы по применению электролитно-разрядного режима обработки для одностадийного получения оксидного порошка и наноразмерных порошков металлов, локальной обработки поверхности металлов и сплавов с целью ее очистки, модификации, полирования и упрочнения, для очистки воды от органических и неорганических примесей и определения концентрации металлов в сточных водах, для модификации поверхности полимерных материалов и отбеливания тканей и стерилизации растворов, материалов и предметов медицинского назначения.

Таким образом, электролитная анодная обработка при различных рабочих напряжениях имеет многочисленные области практического применения. Однако недостаточная изученность физико-химических закономерностей процессов обработки при повышенных рабочих напряжениях сдерживает разработку новых высокоэффективных промышленных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Здор Г.Н. Собственные радиоизлучение и ток электрического разряда как инструмент контроля и управления процессом электроимпульсного полирования / Г.Н. Здор [и др.] // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2009. – № 2. – С. 111–119.
2. Kellog, H.H. Anod effect in aqueous electrolyte / H.H. Kellog // J. of the Electrochemical Soc. – 1950. – N 4. – P. 133–142.
3. Лазаренко, Б.Р. Коммутация тока на границе металл–электролит / Б.Р. Лазаренко [и др.]. – Кишинев: АН МССР, 1971. – 74 с.
3. Дураджи, В.Н. Нагрев металлов в электролитной плазме / В.Н. Дураджи, А.С. Парсаданян; под общ. ред. А.С. Парсаданяна. – Кишинев: Штиинца, 1988. – 216 с.
4. Факторович, А.А. Исследование и применения коммутации тока в электролитах: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Факторович. – Кишинев, 1969. – 183 с.
5. Мурас, В.С. Исследование возможности использования электролитного нагрева при волочении проволоки: дис. ... канд. техн. наук / В.С. Мурас. – Минск, 1951. – 165 с.
6. Лазаренко, Б.Р. Об особенностях электролитного нагрева при анодном процессе / Б.Р. Лазаренко [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1974. – № 3. – С. 37–40.
7. Реснер, Э. Износ электрода при обработке малоуглеродистой стали в электролитной плазме при анодном процессе / Э. Реснер [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 3. – С. 59–61.

8. Зайцев, В.А. Высокотемпературная коррозия малоуглеродистой стали в условиях электроплазменной обработки / В.А. Зайцев [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 5. – С. 56–58.

9. Дураджи, В.Н. Исследование эрозии анода при воздействии на него электролитной плазмы / В.Н. Дураджи, И.В. Брянцев, А.К. Товарков // Электронная обработка материалов. – 1978. – № 5. – С. 13–17.

10. Мурас, В.С. Некоторые элементы процесса электролитического нагрева / В.С. Мурас // Сборник трудов ФТИ АН БССР. – Минск, 1956. – Вып. 3. – С. 53–58.

11. Verfahren zum Hochglänzen stromleitender Werkstücke im anodischen Elektrolytplasma: patentschrift 238074 DDR, С 25 F 3/16 / Н. Hoyer, E. Rößner, K. Rabending, E. Kirsche, J. Pampel; VEB Forschungszentrum. – № 2771201; 07.06.85; 06.08.86. 14. Способ электрохимической обработки: а. с. 1314729 СССР, МКИ4 С 25 F 3/16 / В.К. Станишевский, А.Э. Паршутто, А.А. Кособуцкий; Белорус. политехн. ин-т. – № 3905831; заявл. 27.05.85. – ДСП.

12. Чачин, В.Н. Метод электроимпульсного полирования сталей и цветных металлов / В.Н. Чачин [и др.]. – Минск: БелНИИНТИ Госплана БССР, 1987. – 4 с. – (Информац. листок БелНИИНТИ Госплана БССР о науч.-техн. достиж. № 87–150).

13. Гюнтершульце, А. Электролитические конденсаторы / А. Гюнтершульце, Г. Бетц. – М.: Оборонгиз, 1938. – 200 с.

14. Баковец, В.В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В.В. Баковец, О.В. Поляков, И.П. Долговесова. – Новосибирск: Наука. Сибирское отд., 1991. – 168 с.

УДК 621.923.7

Синькевич Ю.А.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Приведен краткий анализ факторов, влияющих на стабильность процесса электроимпульсного полирования, производительность, точность и качество обработки. Дана оценка влияния электроимпульсного полирования на эксплуатационные характеристики поверхности деталей. Показано, что для того, чтобы в полной мере реализовать все преимущества электроимпульсного полирования требуется провести комплексные исследования основных физико-химических и технологических закономерностей процесса и создать на этой основе промышленное оборудование, соответствующее мировому уровню развития машиностроения.

Введение. Электроимпульсное полирование (ЭИП), обладая преимуществами, характерными для химического и электрохимического полирования, выгодно отличается от них высокой производительностью и стабильностью качества обработки, экологической безопасностью, низкой себестоимостью обработки единицы поверхности и возможностью полной автоматизации управления и контроля параметров процесса обработки. В последнее время вопросам, связанным с исследованием процесса ЭИП и его внедрением в производство, уделяется большое внимание в Беларуси, Болгарии, Германии, Китае, Нидерландах, России, Словакии, США, Украине и других странах. Однако, несмотря на значительный объем исследований физико-химических и технологических аспектов процесса, проведенных учеными разных школ, и большое количество научных публикаций и патентов, широкое внедрение ЭИП в промышленных масштабах сдерживается отсутствием высокоэффективных технологий и серийного технологического оборудования, для разработки которых необходимы систематизированные теоретические и экспериментальные данные о физико-химических процессах, протекающих на обрабатываемой поверхности и в парогазовой оболочке (ПГО), механизмах и основных закономерностях электрической проводимости ПГО, анодного растворения металлов и компонентов сплавов, сглаживания неровностей профиля поверхности