

2. Применение электролита, содержащего вольфрамат натрия, позволяет сформировать покрытия с меньшей высотой микронеровностей ($Ra = 0,97\text{--}1,11$ мкм) по сравнению с покрытиями, полученными в электролите, содержащем ферроцианид калия ($Ra < 4,20$ мкм).

3. Максимальная износостойкость полученных покрытий (скорость износа $0,38 \cdot 10^{-4} \dots 0,59 \cdot 10^{-4}$ мм³/м·Н) достигается при обработке в исследованных электролитах с продолжительностью 10 мин. При этом толщина покрытий составляет 21–31 мкм. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки не оказывает существенного влияния на скорость износа.

Литература

1. *Pulsed plasma electrolytic oxidation processes for aeronautical applications and their technical application* / N. Godja [et al.] // Transactions of the IMF. – 2013. – Vol. 91, № 6. – P. 321–329.

2. *Effects of pulse current mode on plasma electrolytic oxidation of 7075 Al in KMnO₄ containing solution* / R. Aliramezani [et al.] // Journal of the Electrochemical Society. – 2017. – Vol. 164. – P. C690–C698.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В УПРАВЛЯЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ

А. Ю. Королёв¹, В. С. Нисс², Ю. Г. Алексеев¹, А. Э. Паршутто¹

¹Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,
г. Минск, Беларусь, тел./факс: +375 (17) 374-25-98,
e-mail: korolyov@park.bntu.by

²Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, тел.: +375 (17) 270-18-42,
e-mail: niss@park.bntu.by

Для снижения энергоемкости и повышения эффективности процесса электролитно-плазменной обработки (ЭПО) с целью модификации и полирования поверхности изделий из металли-

ческих материалов, их размерной обработки при сохранении высокой интенсивности, качества и экологической безопасности разработан новый импульсный метод (ИЭПО), совмещающий преимущества как электрохимического, так и электролитно-плазменного процесса [1, 2]. В работе исследовано влияние соотношения амплитуд и длительностей электрохимической и электролитно-плазменной стадий на производительность ИЭПО.

На рис. 1 представлена принципиальная схема источника питания для исследования влияния длительности, частоты и коэффициента заполнения импульсов в различных стадиях ИЭПО. Основным элементом схемы является ключ на транзисторе IGBT типа M1AA-NB12MA-200N (VT1) с максимальным напряжением исток/сток 1200 В и током стока 200 А. Генератор управляющих импульсов позволяет сформировать импульсы с периодом 0,1–2,0 мс с коэффициентом заполнения 5–95 %. Верхний (по схеме) выход источника питания высокого напряжения «ВН» позволяет регулировать постоянное напряжение на нагрузке в пределах 0–300 В. Нижний (по схеме) выход источника питания

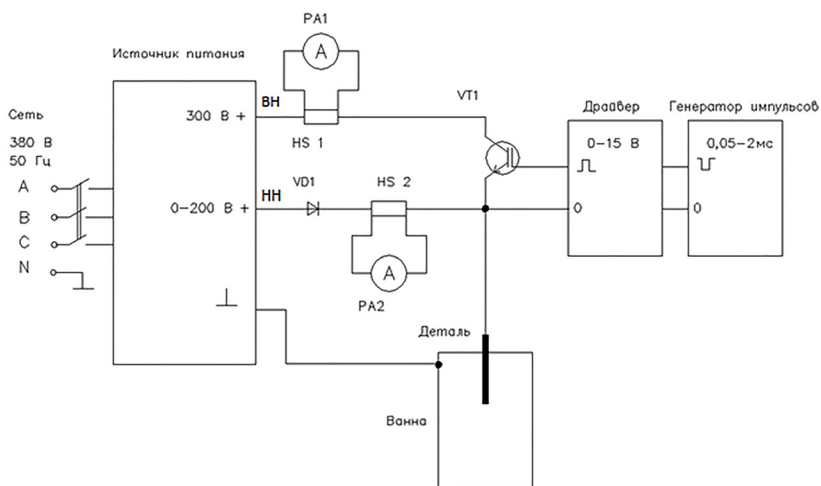


Рис. 1. Принципиальная схема источника питания для исследования режимов импульсного метода электролитно-плазменной обработки

низкого напряжения «НН» позволяет регулировать постоянное напряжение на нагрузке в пределах 0–200 В. Диод VD1 предназначен для подключения источника 0–200 В в момент запитания транзистора от генератора импульсов и отключения источника питания 0–300 В от нагрузки – обрабатываемого образца. Для согласования генератора импульсов и ключевого транзистора применен двухканальный драйвер типа DI28-17-E-1, обладающий защитой транзистора с безопасным отключением при коротком замыкании и превышении прямого тока. Для контроля токов электролитно-плазменной стадии и электрохимической стадии (ЭХС) процесса ИЭПО использован двухканальный цифровой амперметр YB4835HVA (PA1, PA2) на 100 А с бесконтактными датчиками тока (HS1, HS2) на эффекте Холла. Контроль и запись формы импульсов тока и спектрограмм осуществляли на запоминающем цифровом осциллографе Owon XDS3000. Массу измеряли на аналитических весах Ohaus PA214C.

Для исследования использовали плоские образцы с размерами (60 × 5 × 1) мм, изготовленные из стали 304. Амплитуда импульса высокого напряжения составляла 300 В, а амплитуда напряжения ЭХС принималась в диапазоне 0–100 В. Временные параметры импульсов: длительность импульса электролитно-плазменной стадии – 0,05–5,00 мс, длительность импульса ЭХС – 0,05–1,90 мс, период импульса – 2,00–5,05 мс. Обработку образцов выполняли в водном растворе сульфата аммония концентрацией 5 % при температуре 80 ± 2 °С. Продолжительность обработки образцов составляла 5 мин.

Полученные результаты измерений и зависимости изменения массы образцов после ИЭПО при различных значениях амплитуды и длительности импульса напряжения ЭХС процесса, а также тока плазменной и электрохимической стадий представлены на рис. 2–4. Анализ зависимостей на рис. 2 показывает, что увеличение напряжения при длительности импульса ЭХС 0,05 мс приводит к снижению съема с 4 % при 0 В до 1,8 % при 80 В. При длительности импульса ЭХС 0,25 мс съем уменьшается с 5 % при 0–60 В до 1,8 % при 80 В. При длительности импульса ЭХС 0,5 мс наблюдается увеличение съема с 5 % при 0 В до 6,3 %

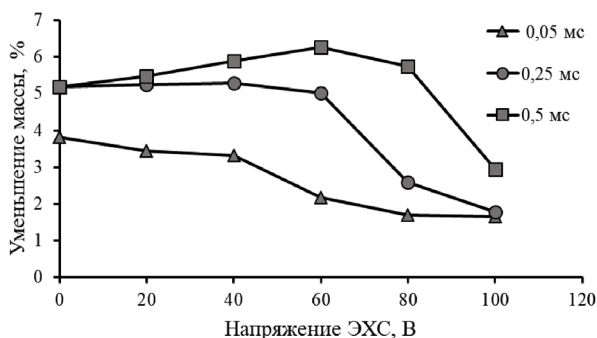
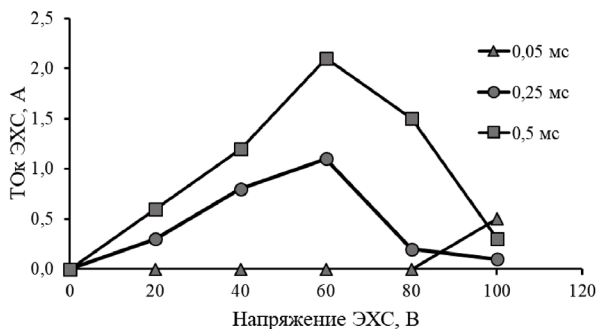


Рис. 2. Влияние амплитуды электрохимической стадии на изменение массы образца при различных значениях длительности импульса

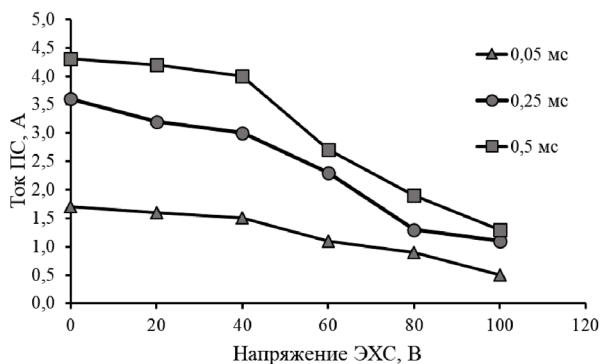
при 60 В. Увеличение напряжения ЭХС до 100 В приводит к снижению съема до 3 %. Снижение съема при напряжении более 60 В для всех длительностей импульса ЭХС объясняется тем, что при таком его значении на ток существенно начинает влиять интенсивное образование пара и газа возле поверхности образца. При таких условиях увеличивается сопротивление приэлектродной зоны и, соответственно, снижается ток.

Особенности влияния амплитуды импульса напряжения ЭХС процесса ИЭПО на изменение массы образца можно объяснить тем, что при длительности импульса 0,05 мс парогазовая оболочка не исчезает полностью и снижает протекающий ток, а следовательно, и съем металла. При длительности 0,25 мс, а тем более при 0,5 мс, схлопывание парогазовой оболочки более вероятно, ток ЭХС больше и, соответственно, больше съем. Это подтверждается графиком зависимости влияния амплитуды импульса напряжения ЭХС на изменение тока ЭХС (рис. 3, а) при длительности импульсов 0–0,5 мс.

Ток электролитно-плазменной стадии достигает максимального значения 4,5 А при длительности импульса 0,5 мс и напряжении ЭХС 0 В, а при длительности импульса 0,05 мс и напряжении 0 В ток равен 1,7 А (рис. 3, б). Снижение тока при малой длительности импульса также объясняется влиянием парогазовой оболочки.



a



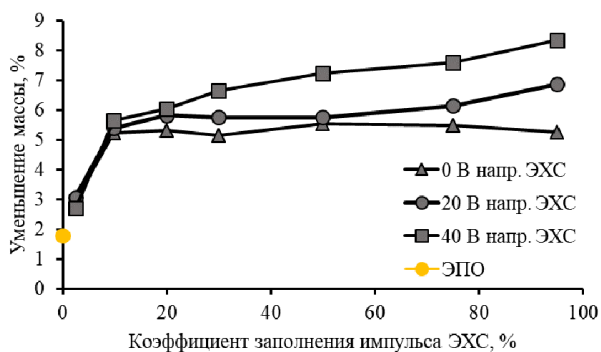
б

Рис. 3. Влияние амплитуды электрохимической стадии на изменение ее тока (*a*) и тока электролитно-плазменной стадии (*б*) при различных значениях длительности импульса

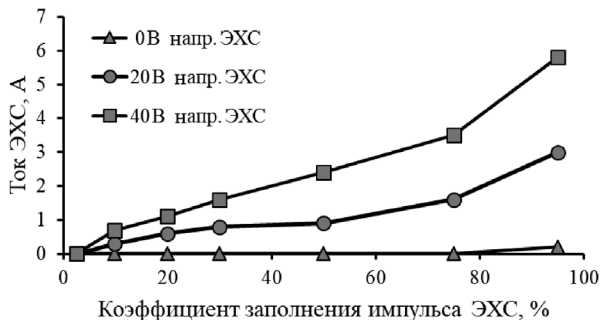
Результаты исследования влияния соотношения амплитуд и длительностей электрохимической и электролитно-плазменной стадий на изменение массы образцов после ИЭПО, тока стадий при различных значениях коэффициента заполнения стадий процесса, а также при обработке с постоянным напряжением 300 В представлены на рис. 4 и 5.

Из зависимостей на рис. 4, *a* видно, что при значении коэффициента заполнения 2,5 % (длительность ЭХС – 0,05 мс) уменьшение массы минимально и составляет 2,8–3,0 % для всех значений напряжения (0–40 В). При увеличении коэффициента заполнения

до 10 % уменьшение массы достигает 5,0–5,5 % также для всех значений напряжения (0–40 В). При дальнейшем увеличении коэффициента заполнения (увеличении длительности ЭХС) съём увеличивается до 8,5 % при напряжении 40 В и коэффициенте заполнения 95 %. Соответственно, начало роста съема наблюдается при коэффициенте заполнения ЭХС более 20 % (длительность – более 0,4 мс). Эти результаты показывают, что на рост съема также в значительной степени влияет значение напряжения ЭХС. Этот факт подтверждается зависимостями на рис. 4, б, демонстрирующими влияние коэффициента заполнения импульса стадий



а



б

Рис. 4. Влияние коэффициента заполнения импульса стадий и амплитуды импульса напряжения электрохимической стадии на изменение массы образца (а) и тока амплитуды импульса напряжения электрохимической стадии (б)

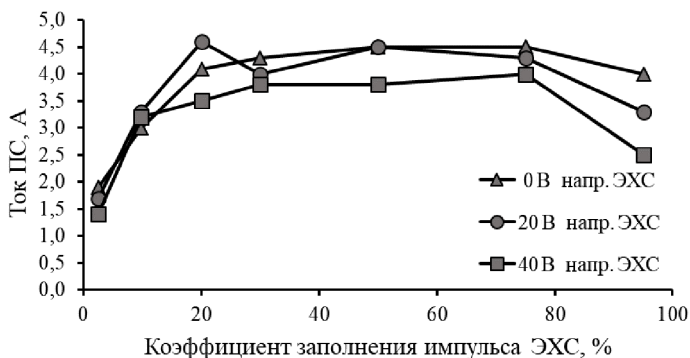


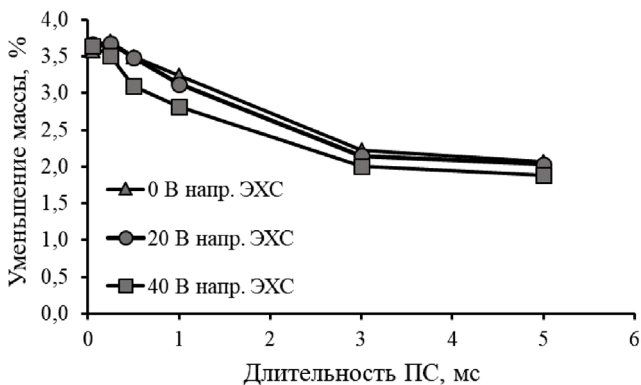
Рис. 5. Влияние коэффициента заполнения импульса стадий и амплитуды импульса напряжения электрохимической стадии на изменение тока электролитно-плазменной стадии (ПС)

ИЭПО и амплитуды импульса напряжения ЭХС на изменение ее тока. При более длительном импульсе ЭХС и большем напряжении ток существенно больше, и при коэффициенте заполнения 95 % и напряжении 40 В его значение достигает 5,8 А по сравнению с 0,0–0,2 А при коэффициенте заполнения 2,5 % и напряжении 0 В. Для сравнительной оценки дополнительно выполнена традиционная обработка на постоянном токе при напряжении 300 В. Съем составил 1,77 %, что в 1,4–4,7 раза меньше, чем при исследованных режимах ИЭПО.

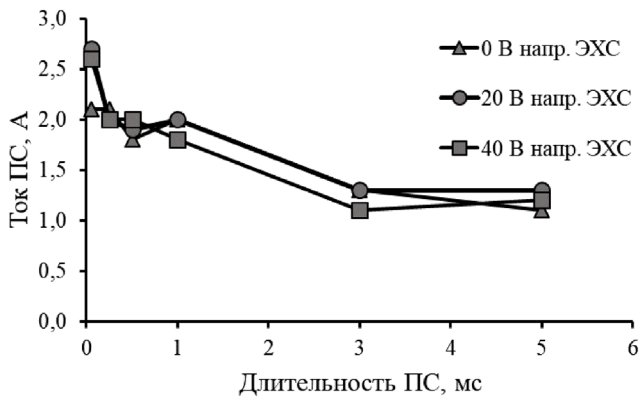
При малом значении коэффициента заполнения 2,5 % ток электролитно-плазменной стадии составляет 1,4–1,7 А при всех значениях напряжения ЭХС (см. рис. 5). В диапазоне значений коэффициента заполнения 20–75 % ток электролитно-плазменной стадии составляет 3,5–4,5 А и снижается при коэффициенте заполнения 95 % до 2,5–4,0 А.

Результаты исследования влияния длительности электролитно-плазменной стадии при длительности ЭХС 0,05 мс на изменение массы образцов после ИЭПО, а также токов стадий при различных значениях напряжения ЭХС, представлены на рис. 6.

Анализ зависимостей на рис. 6, а показывает, что относительно большой съем наблюдается при длительности электролитно-плазменной стадии, сравнимой с длительностью ЭХС –



a



б

Рис. 6. Влияние длительности электролитно-плазменной стадии (ПС) при постоянной длительности электрохимической стадии (0,05 мс) на изменение массы образцов (а) и тока электролитно-плазменной стадии (ПС) (б)

0,05–0,30 мс. При большей длительности наблюдается снижение съема до 2,0–2,2 %, а при длительности более 3 мс съем стабилизируется на 2 % и далее не меняется. Это объясняется тем, что коэффициент заполнения ЭХС при малой длительности электролитно-плазменной стадии близок к 50 % и длительность электролитно-плазменной и электрохимической стадий приблизительно одинакова. Большая длительность электролитно-плазменной стадии

приводит к относительному снижению коэффициента заполнения ЭХС и снижению сѐма. Влияние амплитуды напряжения заключается в том, что при более высоком напряжении ЭХС (40 В) и малой ее длительности создаются условия для более быстрого повторного возникновения парогазовой оболочки после короткого периода снижения напряжения с 300 до 40 В и тем самым снижения тока и сѐма. Аналогичное влияние оказывает длительность электролитно-плазменной стадии на изменение ее тока при постоянной длительности ЭХС (рис. 6, б).

Выводы

1. Соотношение амплитуд и длительностей электрохимической и электролитно-плазменной стадий оказывают существенное влияние на производительность ИЭПО. Установлено, что увеличение напряжения электрохимической стадии от 0 до 80 В (соотношение амплитуд 0–0,27) при длительности импульса электрохимической стадии 0,05 мс приводит к снижению сѐма с 4,0 до 1,8 %. При длительности импульса электрохимической стадии 0,5 мс наблюдается увеличение сѐма с 5 % при 0 В до 6,3 % при 60 В, дальнейшее увеличение напряжения электрохимической стадии до 100 В (соотношение амплитуд 0,33) приводит к снижению сѐма до 3 %.

2. Снижение сѐма при напряжении электрохимической стадии более 60 В для всех длительностей импульса электрохимической стадии объясняется тем, что при таком его значении на ток начинает существенно влиять интенсивное образование пара и газа возле поверхности образца. При таких условиях увеличивается сопротивление приэлектродной зоны и, соответственно, снижается ток.

3. При малом соотношении длительности электрохимической стадии к периоду импульсов (2,5 %) производительность ИЭПО минимальна: уменьшение массы составляет 2,8–3,0 % для всех исследованных значений напряжения электрохимической стадии (0–40 В). При увеличении соотношения до 10 % уменьшение массы достигает 5,0–5,5 % также для всех значений напряжения

(0–40 В). При дальнейшем увеличении длительности электрохимической стадии съём увеличивается и при соотношении 95 % достигает 8,5 % при напряжении 40 В. Начало существенного увеличения производительности наблюдается при соотношении длительности электрохимической стадии к периоду импульсов 20 %.

Литература и источники

1. *Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах* [Электронный ресурс] / А. Ю. Королёв [и др.] // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 4. – С. 279–286. – Режим доступа: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-279-286>. – Дата доступа: 21.01.2022.

2. *Импульсная электролитно-плазменная технология размерной и финишной обработки металлических материалов* / А. Ю. Королёв [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. 12-го Междунар. симп., Минск, 7–9 апр. 2021 г. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2021. – Ч. 2. – С. 87–93.

МЕТОД НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СОСТАВОМ ПОЛИКОМПОЗИЦИОННЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер, Д. Ю. Гульпа

*Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь,
e-mail: kushner@bsuir.by*

Из сульфатного электролита никелирования, модифицированного органическими добавками и различными фракциями алмаза [1], методом нестационарного электролиза получены электрохимические покрытия при частоте поляризующего тока $f = 1\text{--}100$ Гц и различных значениях длительности прямого и обратного импульсов $\tau_{\text{имп}} = 20\text{--}200$ мс и $\tau_{\text{паузы}} = 80\text{--}800$ мс для