

DOI:10.18577/2307-6046-2017-0-8-12-12.

3. Козлов И.А., Кулюшина Н.В., Кутырев А.Е. Влияние формы поляризующего тока на защитные свойства плазменного электролитического покрытия на сплаве МЛ5 // Материаловедение. 2015. № 9. С. 25-31.

4. Kozlov I.A., Kulyushina N.V., Kutyrev A.E. Influence of polarizing current form on protective properties of plasma-sprayed electrolytic coating on alloy ML5 //Inorganic Materials: Applied Research. 2016. Т. 7. № 1. С. 119-125.

5. Козлов И.А., Виноградов С.С., Кулюшина Н.В., Кутырев А.Е., Пастухов А.С. Влияние соотношения амплитуд поляризующего тока на защитные свойства ПЭО-покрытия, формируемого на сплаве МЛ5// Коррозия: материалы, защита. 2016. № 11. С. 40-48.

6. Козлов И.А., Виноградов С.С., Наприенко С.А Структура и свойства ПЭО-покрытия, формируемого на сплаве МЛ5 в силикатно-фосфатном электролите // Коррозия: материалы, защита. 2017. № 8. С. 35-41.

7. Козлов И.А., Виноградов С.С., Уридия З.П., Дуюнова В.А., Манченко В.А. // Эффект предварительного травления сплава МЛ5 перед плазменным электролитическим оксидированием Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. № 9. С. 32-42. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2018).

УДК 621.785.5

А.В. Жиров, доц. канд. техн. наук  
С.Ю. Шадрин, доц. канд. техн. наук  
(Костромской государственной университет, г. Кострома)

## **ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ АНОДНОМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОМ ПОЛИРОВАНИИ СТАЛЕЙ**

Анодный электролитно-плазменный нагрев относится к скоростным видам химико-термической обработки и позволяет осуществлять закалку и диффузионное насыщение металлов легкими элементами, а при повышенном напряжении полирование их поверхности [1]. Технология электролитно-плазменного полирования позволяет обрабатывать в водных растворах солей изделия из нержавеющей и углеродистых сталей, медных и алюминиевых сплавов, латуни, цинка, титана, кремния [2]. Изучение физических механизмов процесса анодного электролитно-плазменного полирования позволит улучшить технологию полирования и

расширить класс обрабатываемых деталей. Целью данной работы является измерение тепловых потоков, действующих в трехфазной системе анод–парагазовая оболочка–электролит при анодном электролитно-плазменном полировании стальных образцов для последующего построения теплофизической картины явления.

Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой представлена на рисунке. В качестве рабочей камеры использовался диэлектрический стакан диаметром 250 мм и высотой 255 мм, внутри которого располагались электрохимическая ячейка и теплообменник. Электрохимическая ячейка представляет собой

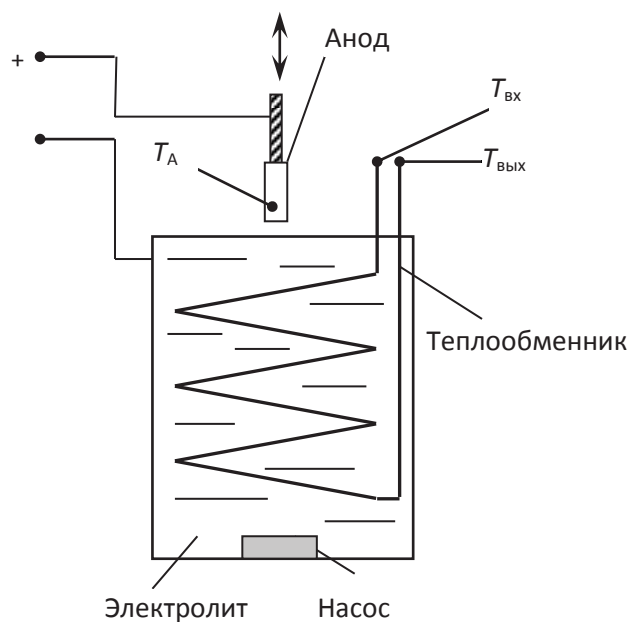


Рис. Схема установки

цилиндрический сосуд из нержавеющей стали диаметром 115 мм и высотой 225 мм. На дне ячейки располагался погружной насос обеспечивающий циркуляцию электролита. Теплообменник представлял собой змеевик из нержавеющей гофрированной трубы длиной 4 м (5 витков диаметром 200 мм). Охлаждение электролита в рабочей камере осуществлялось водопроводной водой, скорость которой регулировалась поплавковым ротаметром РМФ–0,4 ЖУЗ (точность  $\pm 2,5\%$ ). Температура водопроводной воды на входе и выходе из змеевика системы охлаждения измерялась цифровым термометром MS–6501 с термопарой (точность 1,5 %). Напряжение на ячейке выставлялось по вольтметру ЛМ–1 (точность 0,5%). Так как напряжение и ток в цепи при анодном нагреве пульсируют, то производилась регистрация тока в цепи и напряжения с помощью цифрового осциллографа АКПП- 4109/2.

Нагревались цилиндрические образцы из стали 20 диаметром 20 мм и длиной 80 мм. Рабочий торец образцов был закругленным, радиус закругления составлял 10 мм. По оси образцов имелось глухое отверстие диаметром 5 мм, в котором размещались 5 термопар с шагом 10 мм для измерения распределения температуры. Самая первая термопара находилась на расстоянии 10 мм от нижней грани детали. Температура образцов измерялась цифровым мультиметром АРРА 109N (средняя точность  $\pm 0,5\%$ ). Для измерения убыли массы электролита использовались весы Vibra LN15001CE с разрешением 0,1 г. Источником питания служил автотрансформатор мощностью 15 кВт, после которого располагался удвоитель напряжения, что позволило получать постоянное напряжение до 600 В.

В качестве электролитов использовались водные растворы с добавлениями хлорида аммония, глицерина, аммиака и ПАВ. Концентрация активного компонента в растворе составляла 2 моль/л и контролировалась измерением его плотности с помощью денсиметра (точность  $\pm 0,001 \text{ г/см}^3$ ).

В процессе эксперимента определялись следующие тепловые потоки: плотность теплового потока из парогазовой оболочки в нагреваемый анод, плотность теплового потока из парогазовой оболочки в электролит, плотность теплового потока из парогазовой оболочки в атмосферу.

Методика определения теплового потока в выступающую часть анода и теплового потока в электролит подробно описана в [3]. Тепловой поток из парогазовой оболочки в атмосферу вычислялся по убыли раствора электролита с последующим пересчетом согласно выражению:

$$Q = (r + c''\varphi(T_A - T_S)) \frac{\Delta m}{\Delta t},$$

где  $c''$  – теплоемкость пара,  $r$  – удельная теплота парообразования для воды,  $T_A$  – температура анода,  $T_S$  – температура насыщения для воды,  $\Delta m$  – убыль массы раствора электролита,  $\Delta t$  – продолжительность эксперимента,  $\varphi$  – относительный перегрев пара:

$$\varphi = \frac{\bar{T} - T_S}{T_A - T_S}, \quad \bar{T} = \frac{\int_0^\delta T v dy}{\int_0^\delta v dy}.$$

В простейшем случае параболического профиля скоростей внутри парогазовой оболочки и параболического распределения температуры  $\varphi = 0,6$ .

В ходе эксперимента были сняты вольт-амперные и вольт-температурные характеристики в области напряжений 200–480 В. Вольт-температурная характеристика имеет четко выраженный максимум в области 280 В. При дальнейшем увеличении напряжения температура образца сначала незначительно убывает, но после 330 В резко уменьшается до 97 °С, что связано с наличием контакта образца и электролита, т.е. парогазовая оболочка перестает быть сплошной. Ввиду нарастания неустойчивости межфазной границы электролит–парогазовая оболочка возникновение контакта анода с электролитом значительно отличается от классического прерывания пленочного кипения жидкости. Вольт-амперная характеристика, построенная по средним значениям силы тока, после 300 В изменяет свое поведение, демонстрируя незначительный рост силы тока, который прекращается при 350–380 В, достигая значений, соответствующих напряжениям 180–200 В. Разброс мгновенных значений силы тока при этом возрастает в разы. Если при напряжении 200 В диапазон изменения мгновенных значений силы тока составляет 1 А, то при напряжении 440–480 В данный диапазон превышает 5 А.

Изменение вольт-амперной характеристики влечет за собой перераспределение энергии в парогазовой оболочке в области напряжений 300–480 В. При постоянной силе тока увеличение напряжения приводит к линейному росту вводимой мощности. Большая часть выделяющейся энергии по-прежнему идет на разогрев электролита, но ее доля заметно снижается с 90 % при 200 В до 60 % при 480 В. Небольшая часть вводимой мощности обеспечивает постоянство температуры образца, оставшаяся часть эвакуируется в атмосферу. Снижение температуры анода приводит к значительному уменьшению теплового потока в образец. Тепловой поток в электролит при высоких напряжениях замедляет свой рост, достигая максимального значения в 2,7 кВт.

Следует отметить, что при высоких (более 300 В) напряжениях тепловой баланс, рассчитываемый по предложенной выше схеме, не выполняется: сумма тепловых потоков, действующих в парогазовой оболочке, превышает вводимую мощность. Данное расхождение можно объяснить, если предположить, что в данном случае убыль массы электролита в большей степени обусловлено не испарением электролита, а его разбрызгиванием, что приводит к завышенным

расчетным значениям теплового потока, связанного с эвакуацией пара в атмосферу.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10094) Костромскому государственному университету.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P.N. Belkin, A. Yerokhin, S.A. Kusmanov. Plasma electrolytic saturation of steels with nitrogen and carbon // Surf. Coat. Technol. – 2016. – Vol. 307. – pp. 1194–1218.

2. Куликов И.С. Электролитно-плазменная обработка металлов / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 232 с.

3. Жиров А. В., Шадрин С. Ю. Экспериментальное определение теплового баланса при анодном электролитном нагреве // Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей: материалы III Международной науч.-техн. конф., Кострома: КГУ им. Н. А. Некрасова, 2010. – С. 240–242.

А.В. Скляренко

Генеральный директор ООО «Сонис», Москва

### **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ГАЛЬВАНО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Всё больше специалистов-гальванотехников приходит к пониманию того, что только на основе внедрения современных технологий возможно существенное повышение эффективности и, соответственно, конкурентоспособности химико-гальванических производств.

В своей деятельности ООО «СОНИС» постоянно отслеживает состояние и развитие технологий в области гальванотехники и обработки поверхности металлов во всех промышленно-развитых странах мира. Импортируя различные фирменные химические добавки и составы от лучших мировых производителей, ООО «СОНИС», тем самым, создаёт необходимые условия для технологической модернизации гальванических производств. Благодаря этому, в настоящее время предприятия фактически получили возможность применять в своей производственной практике