

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ПРОЦЕССЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА

**В. С. Нисс¹, А. Ю. Королёв², А. И. Иванов²,
Г. М. Сенченко¹, А. С. Калиниченко³**

*¹Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, тел.: +375 (17) 270-18-42,
e-mail: niss@park.bntu.by*

*²Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,
г. Минск, Беларусь, тел./факс: +375 (17) 374-25-98,
e-mail: korolyov@park.bntu.by*

*³Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь, тел.: +375 (17) 343-94-32,
e-mail: ask0708@mail.ru*

В качестве альтернативы существующим методам упрочнения поверхности титана и титановых сплавов предложен метод электрохимико-термической обработки – электролитно-плазменный нагрев в азот- или углеродсодержащем электролите с последующей закалкой путем отключения рабочего напряжения. При подаче напряжения в диапазоне 100–300 В на электрохимическую ячейку вокруг заготовки происходит локальное вскипание жидкости за счет выделения джоулева тепла [1]. В этих условиях электролит вблизи поверхности заготовки разогревается до температуры кипения и обрабатываемая заготовка, оказываясь отделенной от основной массы электролита, разогревается до температур 400–1100 °С [2]. Высокие температуры заготовки позволяют проводить насыщение поверхности атомами легких элементов, содержащихся в веществах-донорах, растворенных в электролите. В работе исследовано влияние тепловых и электрических условий (температура электролита, напряжение, плотность тока, удельная мощность) в процессе модифицирования поверхности титана с применением электролитно-плазменного нагрева на скорость нагрева, максимальную температуру нагрева и долю тепла, затрачиваемую непосредственно на нагрев.

Для исследований использовали образцы из титанового сплава ВТ6 диаметром 8 мм и длиной 30 мм. Площадь погружаемой части составила 4,28 см². В качестве электролита использовали 10%-й водный раствор хлорида аммония. Исследуемый диапазон температуры электролита – от 15 до 35 °С с шагом в 10 °С. Стабилизацию установленной температуры электролита осуществляли с помощью системы охлаждения, включающей теплообменник, чиллер и барботер.

На рис. 1 представлены вольтамперные характеристики электролитно-плазменного нагрева при различных значениях температуры электролита. Установлено, что при температуре электролита 25 °С достигается наибольшая стабильность процесса электролитно-плазменного нагрева и максимально широкий диапазон значений рабочего напряжения, в котором обеспечивается процесс нагрева. Поэтому дальнейшие исследования выполняли при температуре электролита 25 °С. Снижение плотности тока при повышении напряжения связано с увеличением толщины парогазовой оболочки, формируемой вокруг нагреваемого образца.

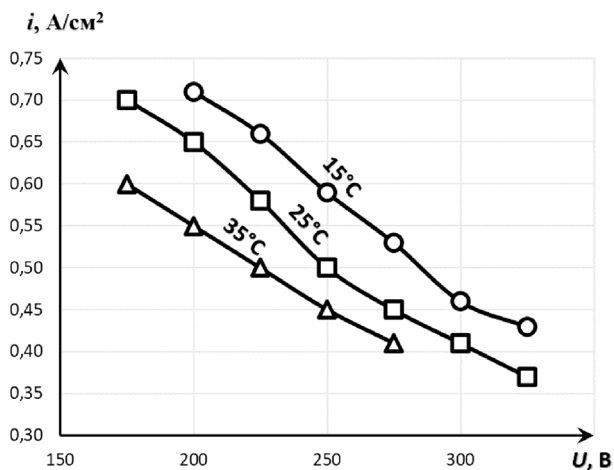


Рис. 1. Вольтамперные характеристики процесса анодного нагрева при различных значениях температуры электролита

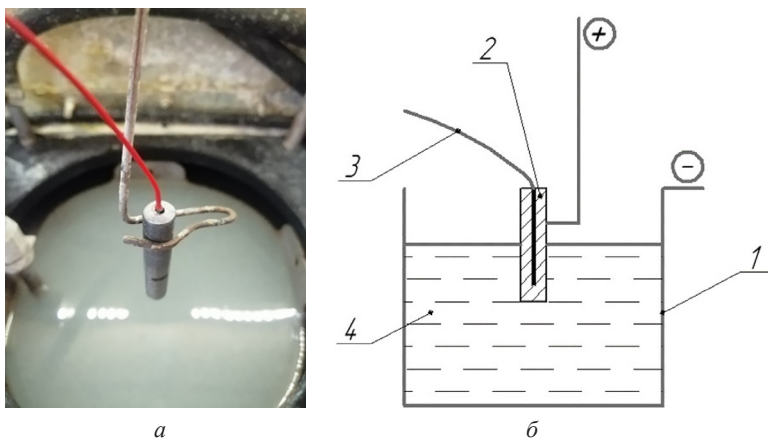


Рис. 2. Изображение образца с размещенной внутри термопарой (а) и схема измерения температуры нагрева (б: 1 – рабочая ванна со встроенным катодом; 2 – рабочий образец, подключенный к положительному потенциалу; 3 – термопара; 4 – электролит)

Для измерения температуры нагрева выполняли обработку образца с глухим осевым отверстием, в которое помещали хромель-алюмелевую термопару К-типа с точностью измерений 2 % в диапазоне от -32 до 1250 °С (рис. 2, а). На рис. 2, б представлена схема измерения температуры нагрева.

Для расчета скорости и удельной мощности нагрева использовали данные, полученные при анализе начальных временных разверток тока (рис. 3).

На развертках выделяются следующие стадии процесса нагрева.

1. Стадия погружения образца в электролит, во время которой происходит рост тока с образованием парогазовой оболочки вокруг образца.

2. Стадия нагрева, во время которой в результате роста температуры образца увеличивается толщина парогазовой оболочки с постепенным снижением силы тока до постоянного значения. Длительность этой стадии соответствует времени нагрева образца.

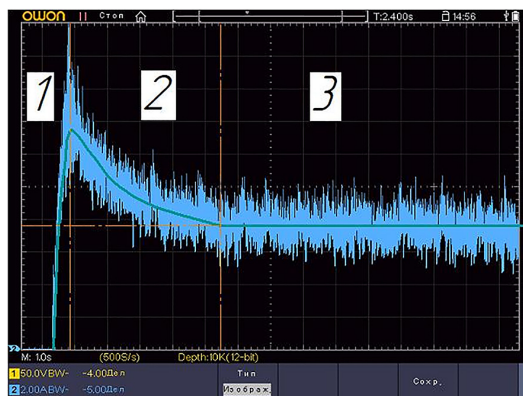


Рис. 3. Осциллограммы начальных переходных процессов электролитно-плазменного нагрева (1–3) для напряжения 175 В

3. Стадия поддержания температуры образца, во время которой значение силы тока остается постоянным.

Удельную мощность электролитно-плазменного нагрева определяли по стадии поддержания температуры образца – умножением усредненного значения стабилизированного тока на соответствующее рабочее напряжение.

Удельную мощность нагрева, характеризующую мощность нагрева на единицу площади поверхности, рассчитывали по формуле

$$q = iU, \text{ Вт / см}^2. \quad (1)$$

На рис. 4 представлены зависимости, характеризующие влияние рабочего напряжения на максимальную температуру нагрева образца и удельную мощность в процессе электролитно-плазменного нагрева. Зависимость распределения максимальной температуры нагрева от рабочего напряжения имеет параболический характер. В диапазоне 175–250 В наблюдается рост максимальной температуры нагрева, а далее происходит ее снижение. На всем исследуемом диапазоне значений напряжения 175–275 В происходит плавный рост удельной мощности нагрева (см. рис. 4, б).

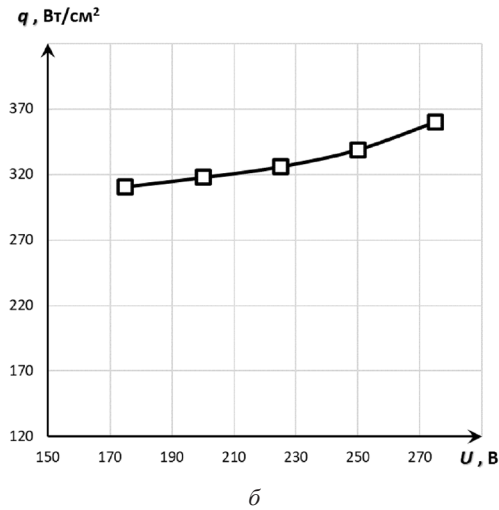
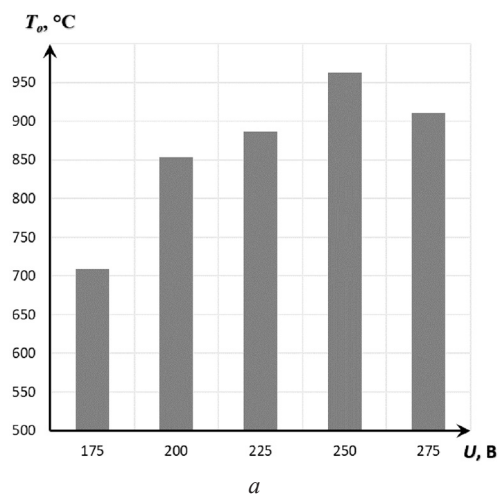


Рис. 4. Влияние рабочего напряжения на максимальную температуру образца (а) и удельную мощность (б)

На рис. 5 представлены зависимости изменения скорости нагрева от плотности тока и рабочего напряжения. В диапазоне от 175 до 250 В происходит увеличение скорости нагрева. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к снижению скорости нагрева,

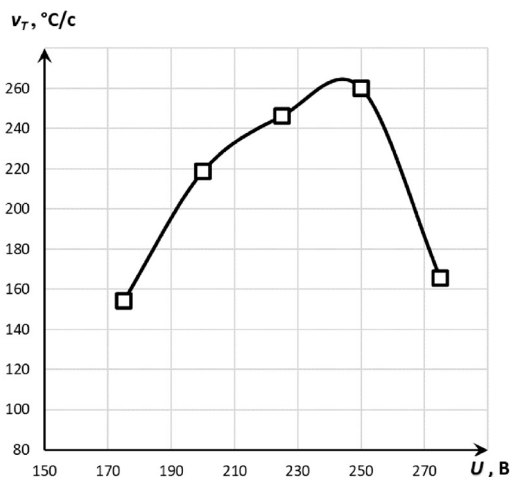


Рис. 5. Влияние рабочего напряжения на изменение скорости нагрева

что связано с перераспределением тепловых потоков при повышении рабочего напряжения: доля тепла, поступающая в анод уменьшается, а поступающая электролит и затрачиваемая на испарение электролита, увеличивается.

На основании полученных экспериментальных данных определим влияние рабочего напряжения на изменение доли тепла, поступающего в анод при анодном электролитно-плазменном нагреве. Общее количество тепла, которое выделяется при нагреве, можно определить по закону Джоуля – Ленца, согласно которому количество теплоты, выделяемое в единицу времени в рассматриваемом участке электрической цепи, пропорционально произведению квадрата силы тока на этом участке и сопротивлению участка:

$$Q_{\text{общ}} = I^2 R t, \quad (2)$$

где I – сила тока на исследуемом участке, А; R – сопротивление, Ом; t – продолжительность нагрева, с.

С учетом закона Ома формулу (2) можно преобразовать:

$$Q_{\text{общ}} = I U t. \quad (3)$$

Произведение силы тока I на время нагрева t устанавливали из площади фигуры, образованной участком осциллограммы, соответствующей стадии нагрева и снижения тока (рис. 6), горизонтальной осью и вертикальными прямыми, определяющими временной промежуток нагрева (отсекаются стадия погружения образца и основная стадия поддержания температуры образца).

Количество теплоты, необходимое для нагрева анода с температуры T_0 (23–25 °С) до температуры T_1 (максимальной температуры нагрева), определяется по формуле

$$Q_{\text{ан}} = cm(T_1 - T_0), \quad (4)$$

где c – удельная теплоемкость материала анода, Дж/кг·К (для титана – 523 Дж/кг·К); m – масса анода, кг.

Доля тепла, поступающего в анод $\eta_{\text{ан}}$, определяется по формуле

$$\eta_{\text{ан}} = \frac{Q_{\text{ан}}}{Q_{\text{общ}}} \cdot 100 \%. \quad (5)$$

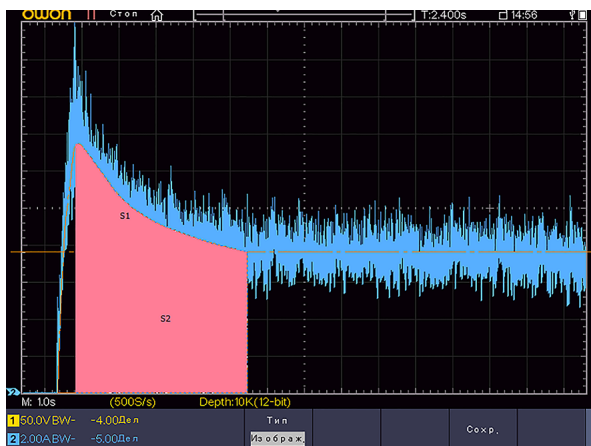


Рис. 6. Измерение произведения силы тока на время на примере осциллограммы для напряжения 175 В

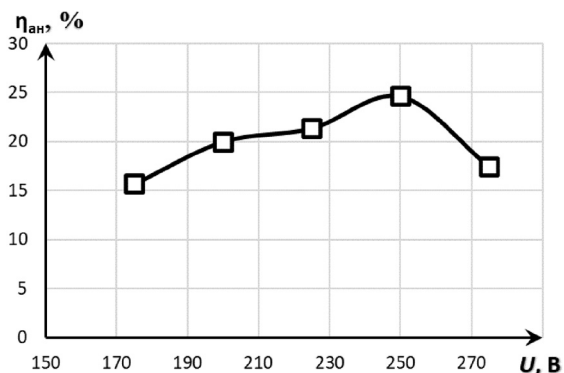


Рис. 7. Зависимость изменения доли тепла, затрачиваемого на нагрев анода, от напряжения

На рис. 7 представлена зависимость изменения доли тепла $\eta_{ан}$ от рабочего напряжения. Максимальная доля тепла, поступающего в анод ($\eta_{ан} = 24,6\%$), обеспечивается при напряжении 250 В. С дальнейшим увеличением рабочего напряжения величина $\eta_{ан}$ снижается.

Заключение. По результатам исследования влияния тепловых и электрических условий в процессе модифицирования поверхности титана с применением электролитно-плазменного нагрева установлено, что увеличение удельной мощности с 311 до 339 Вт/см² (соответствует значениям рабочего напряжения 175–250 В) приводит к существенному повышению скорости нагрева от 154 до 260 °С/с и плавному увеличению температуры нагрева в диапазоне от 700 до 950 °С. Максимальная доля тепла, затрачиваемая на нагрев анода (24,6 %), соответствует рабочему напряжению 250 В.

Литература

1. Особенности электролитно-плазменного нагрева при электрохимико-термической обработке стали / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. – 2013. – № 6. – С. 20–24.

2. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов : в 2 т. / И. Суминов [и др.] ; ред. И. Суминов. – М. : Техносфера, 2011. – Т. I. – VI : Мир материалов и технологий. – С. 427–463.