

**Влияние тепловых и электрических условий в процессе  
модифицирования поверхности титана с применением  
электролитно-плазменного нагрева**

Нисс В.С.<sup>1</sup>, Королёв А.Ю.<sup>2</sup>, Иванов А.И.<sup>2</sup>, Сенченко Г.М.<sup>1</sup>, Калиниченко А.С.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

<sup>3</sup>Белорусский государственный технологический университет

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. В качестве электролита использовали 10%-й водный раствор хлорида аммония. 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.

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. На развертках выделяются следующие стадии процесса нагрева (рис. 2).

1. Стадия погружения образца в электролит, во время которой происходит рост тока с образованием парогазовой оболочки вокруг образца. Длительность этой стадии, определяется скоростью погружения образца в электролит.

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.

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

Удельная мощность электролитно-плазменного нагрева определялась по стадии поддержания температуры образца – умножением усреднённого значения стабилизированного тока на соответствующее рабочее напряжение.

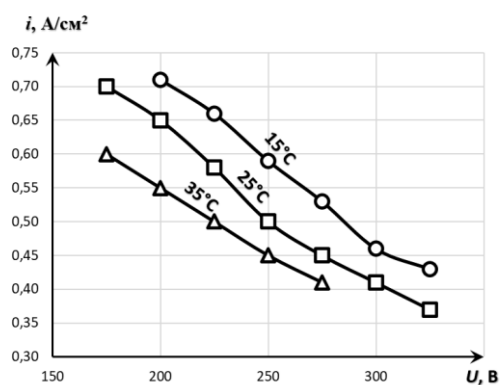


Рисунок 1 - Вольтамперные характеристики процесса анодного нагрева при различных значениях температуры электролита

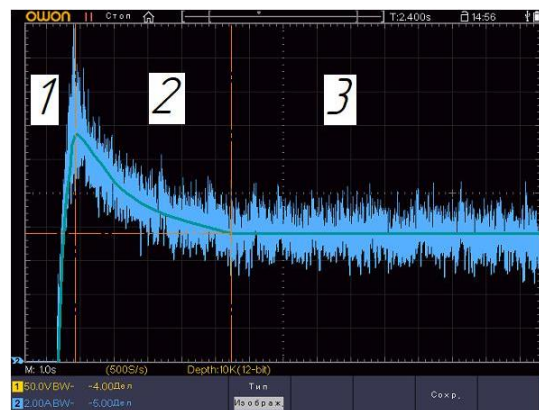
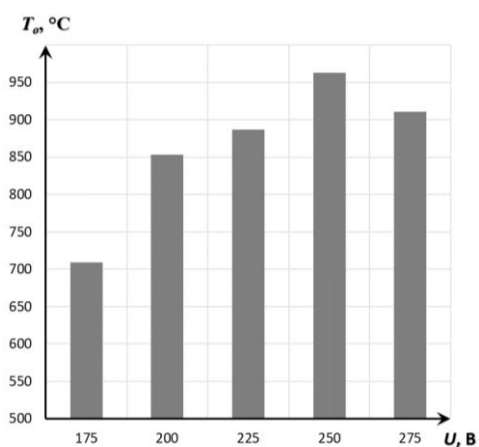
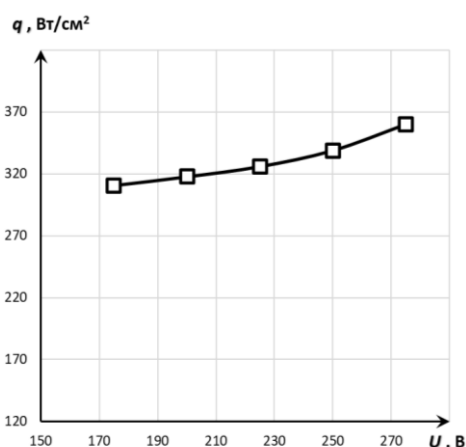


Рисунок 2 - Осциллограмма переходных процессов электролитно-плазменного нагрева при напряжении 175В

На рис. 3 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. 3, б).



а



б

Рисунок 3 - Влияние рабочего напряжения на максимальную температуру образца (а) и удельную мощность (б)

На рис. 4 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, что связано с перераспределением тепловых потоков при повышении рабочего напряжения: доля тепла, поступающая в анод уменьшается, поступающая электролит и затрачиваемая на испарение электролита увеличивается.

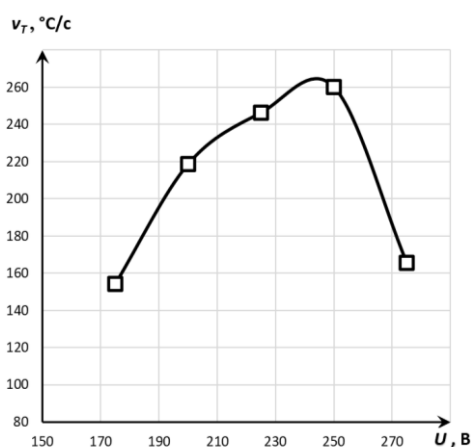


Рисунок 4 - Влияние рабочего напряжения на изменение скорости нагрева

На рис. 5 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.

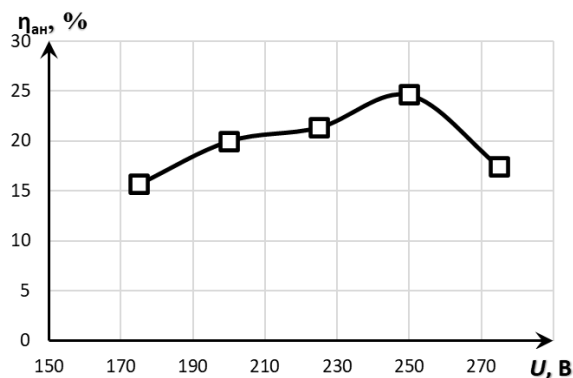


Рисунок 5 - Зависимость изменения доли тепла, затрачиваемого на нагрев анода, от напряжения

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/см<sup>2</sup> (соответствует значениям рабочего напряжения 175–250 В) приводит к существенному повышению скорости нагрева от 154 до 260 °C/c и плавному увеличению температуры нагрева в диапазоне от 700 до 950 °C. 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. – 2011. – Т. I. – VI : Мир материалов и технологий. – С. 427–463.