

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СЛОЕВ В АНОДНОМ РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОЛИТНОГО НАГРЕВА**

**Ю. Г. Алексеев<sup>1</sup>, В. С. Нисс<sup>2</sup>, А. Ю. Королев<sup>1</sup>,  
И. В. Фомихина<sup>3</sup>, А. А. Астапенко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», Минск, Беларусь,  
тел./факс: 292-25-98, e-mail: korolyov@metolit.by*

<sup>2</sup>*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,  
тел.: 296-67-22, e-mail: niss@metolit.by*

<sup>3</sup>*Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь,  
тел.: 292-85-81, e-mail: ivfom@tut.by*

В анодном режиме электролитно-плазменной обработки за счет протекания электрических разрядов между металлическим образцом (анодом) и электролитом (катодом) в некоторых диапазонах параметров наблюдается явление электролитного нагрева. При этом обеспечивается интенсивный разогрев поверхности образца со скоростью до 250 °С/с, что обеспечивает возможность создания композиционных слоев на поверхности образца в результате осаждения и диффузии легирующих элементов, содержащихся в электролите, а также за счет термической обработки с последующим охлаждением в электролите.

Авторами проведены исследования и разработаны режимы получения композиционных слоев на стали Ст3 электрохимико-термическим азотированием и цементацией толщиной до 60 мкм и микротвердостью до 6,1 ГПа (рис. 1).

Целью данной работы являются исследования влияния мощности нагрева и состава электролита на скорость анодного нагрева и толщину нагреваемого слоя образцов из стали Ст3 в электролите на основе хлорида аммония.

На основании экспериментальных данных установлены значения удельной электрической мощности, затрачиваемой на процесс электролитного нагрева при различных значениях рабочего напряжения (рис. 2).

Полученная зависимость имеет максимум при рабочем напряжении 270 В, что соответствует граничному (максимальному) значению напряжения, обеспечивающему электролитный нагрев.

Для определения зависимости скорости анодного нагрева  $\upsilon$  от удельной мощности нагрева измеряли максимальную температуру нагрева  $T_{\text{макс}}$  и время  $t$ , необходимое для нагрева анода до максимальной температуры. Установленная зависимость скорости анодного нагрева от удельной мощности нагрева представлена на рис. 3.

С увеличением рабочего напряжения скорость нагрева постепенно повышается и достигает максимума при удельной мощности 300 Вт/см<sup>2</sup>, что соответствует рабочему напряжению 240 В.

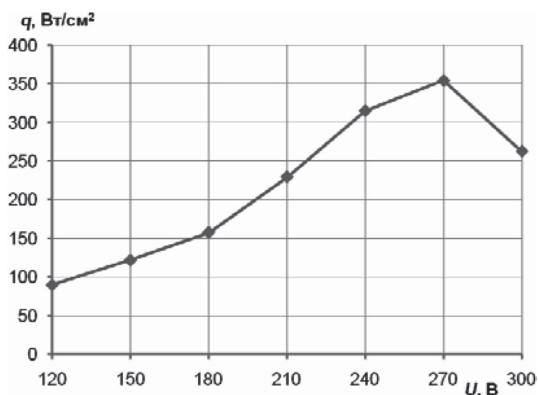


Рис. 2. Влияние рабочего напряжения на удельную мощность нагрева в 10%-ном растворе хлорида аммония в условиях естественной конвекции

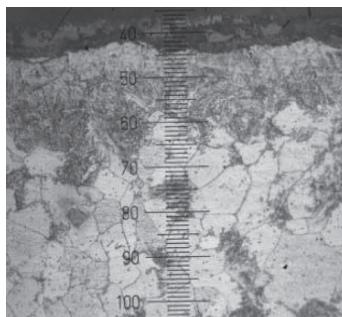


Рис. 1. Микроструктура образца после электрохимико-термического азотирования.  $\times 500$

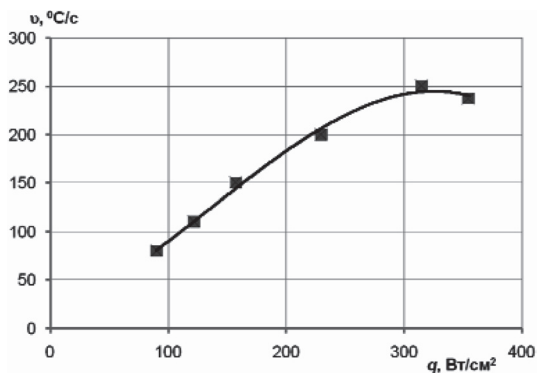


Рис. 3. Зависимость скорости анодного нагрева от удельной мощности нагрева

Дальнейший рост удельной мощности нагрева приводит к снижению максимальной температуры нагрева, что связано с перераспределением тепловых потоков при повышении рабочего напряжения: доля тепла, поступающая в анод, уменьшается, а поступающая в электролит и затрачиваемая на испарение электролита, увеличивается.

На основании экспериментальных данных построены кривые, характеризующие влияние мощности нагрева и его продолжительности на толщину нагреваемого слоя (рис. 4).

В результате экспериментальных исследований установлено, что зависимость удельной проводимости от концентрации хлорида аммония носит линейный характер. Величина удельной проводимости увеличивается от 170 до 354 мСм/см при повышении концентрации электролита от 8 до 16 %. Добавление в электролит глицерина (углеродсодержащий компонент) концентрацией 12 % приводит к снижению удельной проводимости на 20–28 % и соответственно плотности рабочего тока.

В результате снижения плотности тока при обработке в электролите с глицерином снижается удельная мощность процесса, что приводит к уменьшению максимально достижимой температуры нагрева образца. При нагреве в электролите без глицерина обеспечивался нагрев образца до температуры 1000 °С,

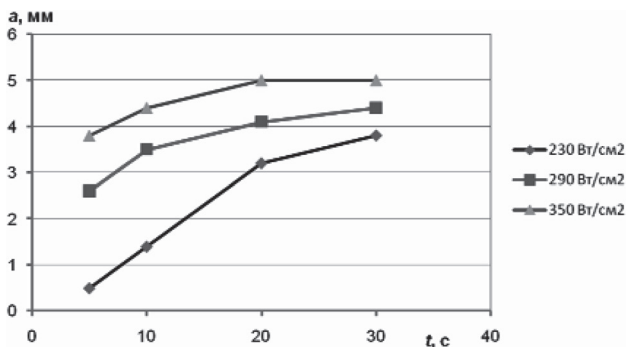


Рис. 4. Влияние продолжительности нагрева на толщину нагреваемого слоя при различных значениях удельной мощности нагрева

а при добавлении глицерина концентрацией 12 % – до температуры 900 °С. Такое снижение максимальной температуры нагрева при добавлении глицерина не является критичным, поскольку требуемая температура нагрева образца для цементации составляет 850–1000 °С.

По результатам измерения максимальной температуры образца и времени, необходимого для достижения максимальной температуры, установлены зависимости, характеризующие влияние состава электролита на скорость нагрева при рабочем напряжении 240 В (рис. 5). Полученные зависимости имеют максимум, соответствующий концентрации хлорида аммония 10 %.

Поскольку полученная зависимость имеет пик, то становится очевидным, что скорость анодного электролитного нагрева не связана с плотностью тока и удельной проводимостью, имеющих линейную зависимость от концентрации электролита. Поэтому можно предположить, что напряжение, обеспечивающее максимальную температуру нагрева, соответствует напряжению, обеспечивающему максимальную скорость нагрева.

Существование максимума скорости нагрева и температуры нагрева, соответствующего определенным сочетаниям концентрации электролита и рабочего напряжения, связано, по-видимому, с особенностями влияния этих параметров на распределение плотностей тепловых потоков, образующихся в процессе элек-

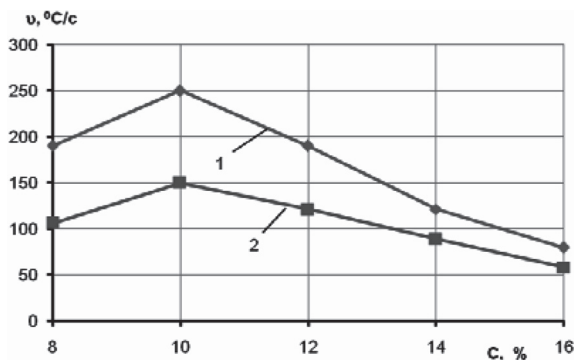


Рис. 5. Влияние состава электролита на скорость анодного электролитного нагрева при напряжении 240 В: 1 – без глицерина; 2 – с глицерином (12 %)

тролитного нагрева. При определенном значении напряжения с повышением концентрации электролита происходит увеличение доли тепла, поступающего в анод. По достижении предельного для данного напряжения значения концентрации электролита распределение тепловых потоков существенно изменяется с увеличением доли тепла, поступающего в электролит, и уменьшением доли тепла, поступающего в анод. Увеличение рабочего напряжения приводит к уменьшению предельного значения концентрации.

На основании полученных экспериментальных данных построены кривые, характеризующие влияние состава электролита на толщину нагреваемого слоя (рис. 6).

Из представленных зависимостей видно, что максимальная глубина нагреваемого слоя при напряжении 240 В аналогично максимальной температуре нагрева и максимальной скорости нагрева достигается при концентрации электролита 10 %. Очевидно, что, как и в случае с максимальной температурой нагрева и скоростью нагрева, каждому значению концентрации хлорида аммония соответствует значение рабочего напряжения, которое обеспечивает максимальную глубину нагреваемого слоя (8 % – 250 В, 10 % – 240 В, 12 % – 235 В и т. д.).

Таким образом можно сделать следующие выводы.

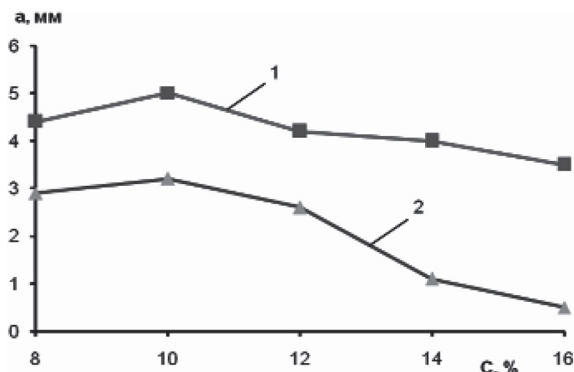


Рис. 6. Влияние состава электролита на толщину нагреваемого слоя при напряжении 240 В: 1 – без глицерина; 2 – с глицерином (12 %)

1. С увеличением рабочего напряжения скорость анодного электролитного нагрева увеличивается и достигает максимума при удельной мощности  $300 \text{ Вт/см}^2$ , что соответствует рабочему напряжению 240 В. Дальнейшее увеличение удельной мощности нагрева приводит к снижению максимальной температуры нагрева, что связано с перераспределением тепловых потоков при повышении рабочего напряжения.

2. В результате экспериментальных исследований установлено, что повышение концентрации электролита приводит к увеличению плотности тока и скорости анодного электролитного нагрева. Добавление в электролит глицерина (углеродсодержащий компонент) концентрацией 12 % приводит к снижению удельной проводимости на 20–28 % и соответственно плотности рабочего тока, что является причиной снижения удельной мощности процесса и уменьшения максимально достижимой температуры нагрева.

3. На основании экспериментальных данных установлено, что толщина нагреваемого слоя увеличивается с повышением мощности нагрева. Максимальная глубина нагреваемого слоя при напряжении 240 В аналогично максимальной температуре нагрева и максимальной скорости нагрева достигается при концентрации электролита 10 %.