

## ВЫВОДЫ

1. Проведение процессов карбидизации и карбонитрации как в кипящем слое, так и при традиционном печном нагреве позволяет повысить износостойкость сложнолегированных сталей в условиях трения-скольжения со смазкой.

2. При проведении процесса карбонитрации более высокая износостойкость получена на сталях X12M, X12MФ и 4X5MФС.

3. При проведении процесса карбидизации более высокую износостойкость показали стали с содержанием хрома 12–13 %.

4. Использование нагрева в кипящем слое при проведении термодиффузионных процессов карбидизации и карбонитрации сложноле-

гированных сталей позволяет увеличить их износостойкость от 2 до 30 % по сравнению с использованием традиционного печного нагрева.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Исследование** износостойкости боридных покрытий, полученных из композиционных порошковых сред / Н. А. Галынская [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 10–16.

2. **Борирование** углеродистых и легированных сталей в кипящем слое / Н. Г. Кухарева [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 5. – С. 8–12.

3. **Химико-термическая** обработка металлов и сплавов: справ. / Г. В. Борисенко [и др.]; под общ. ред. Л. С. Ляховича. – М.: Metallurgia, 1981. – 424 с.

Поступила 17.05.2013

УДК 621.9.047.7

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ

*Канд. техн. наук АЛЕКСЕЕВ Ю. Г., канд. техн. наук, доц. НИСС В. С.,  
канд. техн. наук КОРОЛЁВ А. Ю., инж. ПАРШУТО А. Э.*

*Белорусский национальный технический университет*

Для повышения качества поверхности металлических изделий известен метод электролитно-плазменной обработки, который заключается в удалении микронеровностей с поверхности при погружении изделия в электролит под высоким напряжением (300 В). Исследования процесса электролитно-плазменной обработки в режиме анодного нагрева, а также в режиме обратной полярности (катодный) позволили установить, что при некоторых параметрах процесса обеспечивается интенсивный разогрев металла со скоростью до 250 °С/с в зависимости от мощности нагрева [1]. Разогрев заготовки возможен вплоть до температуры плавления. При повышении температуры образца с помощью электролитно-плазменного нагрева становятся возможными создание ком-

позиционных слоев за счет диффузии легирующих элементов, содержащихся в электролите, а также закалка, которая обеспечивается при охлаждении нагретого образца в электролите путем отключения рабочего напряжения [1].

При подаче напряжения в диапазоне 100–300 В на электрохимическую ячейку вокруг заготовки происходит локальное вскипание жидкости за счет выделения джоулевой теплоты. Образующаяся парогазовая оболочка предотвращает контакт металла обрабатываемой заготовки с электролитом и, обладая максимальным удельным электрическим сопротивлением в системе, становится нагревательным элементом. В этих условиях электролит вблизи поверхности заготовки разогревается до температуры кипения и обрабатываемая заготов-

ка, оказываясь отделенной от основной массы электролита, разогревается до температур 400–1100 °С [2].

Высокие температуры заготовки позволяют проводить насыщение ее поверхности атомами легких элементов, содержащихся в веществах-донорах, растворенных в электролите. Наличие в электролите углерод- и азотсодержащих компонентов обуславливает определенный углеродный или азотный потенциал парогазовой оболочки, в результате чего становится возможной химико-термическая обработка [2].

В результате проведенных авторами исследований процесса электролитно-плазменного нагрева установлено, что наиболее существенным параметром, определяющим эффективность нагрева, является рабочее напряжение. Оно оказывает влияние на максимальную температуру и скорость нагрева, на глубину насыщения. Для определения теплофизических особенностей и установления наиболее приемлемых режимов электролитно-плазменного нагрева исследовали влияние рабочего напряжения на плотность тока, температуру и скорость нагрева, мощность нагрева и долю теплоты, поступающей в анод. Исследования особенностей формирования упрочненных слоев электролитно-плазменной химико-термической обработкой выполняли на примере цементации.

Для исследований использовали цилиндрические образцы диаметром 4 мм и длиной 25 мм из стали Ст3. Образцы предварительно подвергали рекристаллизационному отжигу при температуре 600 °С.

Исследования теплофизических особенностей процесса электролитно-плазменного нагрева проводили в электролите на основе 10%-го раствора хлорида аммония. Температура электролита составляла  $(23 \pm 3)$  °С. Рабочее напряжение изменяли в диапазоне от 120 до 300 В. В качестве источника питания использовали диодный выпрямитель ДЕЗ 100/230. Регулировку рабочего напряжения осуществляли с помощью трехфазного ЛАТРа. Температуру образцов определяли по цветам каления.

Для установления зависимости скорости анодного нагрева от удельной мощности нагрева измеряли максимальную температуру нагрева и время, необходимое для нагрева образца до максимальной температуры. Для исследова-

ния закономерностей формирования упрочненных слоев в процессе электролитно-плазменной цементации в качестве углеродсодержащего компонента в электролит добавляли глицерин концентрацией 12 % [1]. Охлаждение образцов проводили непосредственно в электролите путем отключения рабочего напряжения.

Исследование распределения микротвердости по сечению цементированных образцов выполняли методом косого шлифа. Измерение микротвердости проводили на микротвердомере Affri DM-8 при нагрузке 200 г. Вольт-амперная характеристика процесса анодного нагрева представлена на рис. 1.

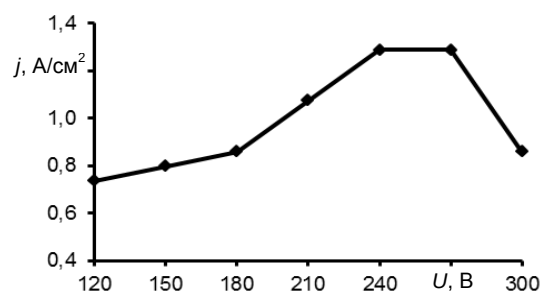


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика процесса анодного нагрева в 10%-м растворе хлорида аммония в условиях естественной конвекции

Полученная вольт-амперная характеристика имеет максимум плотности тока, соответствующий напряжению около 240–270 В. Однако подобные исследования, проведенные на других электролитах, в частности растворах сульфата аммония и хлорида натрия, показали, что характер зависимости плотности тока от рабочего напряжения имеет «классический» вид, при котором с увеличением напряжения наблюдается постепенное снижение плотности тока. Вероятно, появление максимума плотности в электролите на основе 10%-го раствора хлорида аммония связано с его повышенной проводимостью, а также возникающими в связи с этим особенностями формирования парогазовой оболочки и процессами, происходящими в ней.

Снижение плотности тока при рабочем напряжении более 270 В связано с прекращением процесса нагрева. При рабочем напряжении 280–300 В электролитно-плазменный нагрев образца не происходит. При этом в парогазовой оболочке протекают процессы, приводящие к

съему металла с поверхности анода (режим полирования). Температура анода при этом сопоставима с температурой электролита.

На основании полученных экспериментальных данных рассчитаны значения удельной электрической мощности, затрачиваемой на процесс электролитно-плазменного нагрева при различных значениях рабочего напряжения. Зависимость, характеризующая влияние рабочего напряжения на удельную мощность нагрева, представлена на рис. 2. Полученная зависимость также имеет максимум при значениях рабочего напряжения около 270 В, что соответствует граничному (максимальному) значению напряжения, обеспечивающему электролитно-плазменный нагрев.

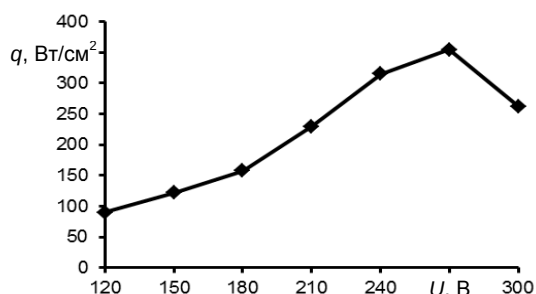


Рис. 2. Влияние рабочего напряжения на удельную мощность нагрева в 10%-м растворе хлорида аммония в условиях естественной конвекции

Диаграмма, характеризующая максимальную температуру нагрева анода от рабочего напряжения, представлена на рис. 3. Максимальный нагрев анода (950–1000 °С) наблюдается при напряжении 240–270 В, что соответствует максимальным значениям удельной мощности нагрева.

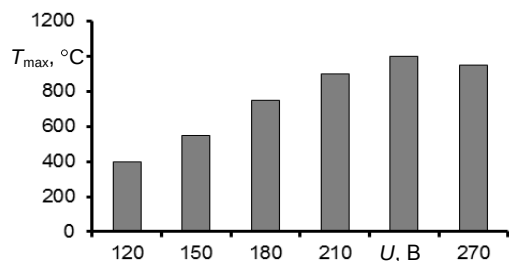


Рис. 3. Влияние рабочего напряжения на максимальную температуру нагрева анода

Зависимость скорости анодного нагрева от удельной мощности нагрева представлена на рис. 4.

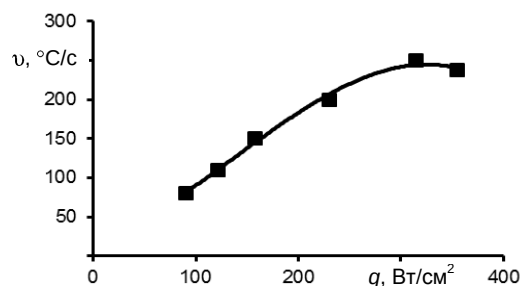


Рис. 4. Зависимость скорости анодного нагрева от удельной мощности нагрева

С увеличением рабочего напряжения скорость нагрева постепенно повышается и достигает максимума при удельной мощности около 300 Вт/см<sup>2</sup>, 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: доля теплоты, поступающей в анод, уменьшается, а доля теплоты, поступающей в электролит и затрачиваемой на испарение электролита, увеличивается.

Зависимость, характеризующая изменение доли теплоты, поступающей в анод при различных значениях рабочего напряжения, которая определяется как отношение количества теплоты, необходимого для нагрева анода от начальной до конечной температуры, к общему количеству теплоты, которое выделяется при нагреве (по закону Джоуля – Ленца), представлена на рис. 5.

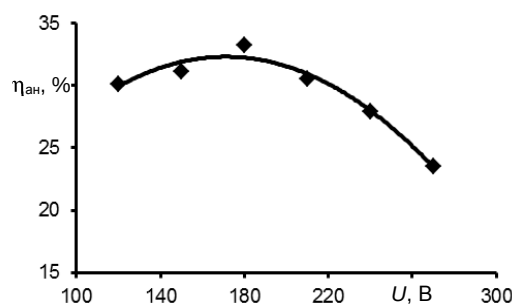


Рис. 5. Влияние рабочего напряжения на изменение доли теплоты, поступающей в анод

Из представленной зависимости видно, что максимальная доля теплоты, поступающей в анод ( $\eta_{ан} = 33\%$ ), обеспечивается при напряжении 180 В. С дальнейшим увеличением рабочего напряжения величина  $\eta_{ан}$  постепенно снижается и достигает значения 23 % при напряжении 270 В.

Уменьшение величины  $\eta_{\text{ан}}$  связано с тем, что в указанном диапазоне с увеличением рабочего напряжения наблюдается рост интенсивности физических и химических процессов в парогазовой оболочке, приводящих к повышению скорости съема металла с поверхности анода. Кроме того, увеличение рабочего напряжения неизбежно приводит к повышению доли теплоты, затрачиваемой на испарение электролита, что также приводит к уменьшению величины  $\eta_{\text{ан}}$ .

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее приемлемым, с точки зрения эффективности, является электролитно-плазменный нагрев в диапазоне напряжений 240–270 В, обеспечивающий достижение требуемой температуры анода (950–1050 °С), а также максимальную скорость и мощность нагрева.

Зависимости, характеризующие изменение микротвердости по сечению образцов, упрочненных электролитно-плазменной цементацией продолжительностью 2; 5 и 10 мин при рабочем напряжении 240 В, представлены на рис. 6. Микротвердость образцов до цементации составляла 210–240 HV<sub>0,2</sub>.

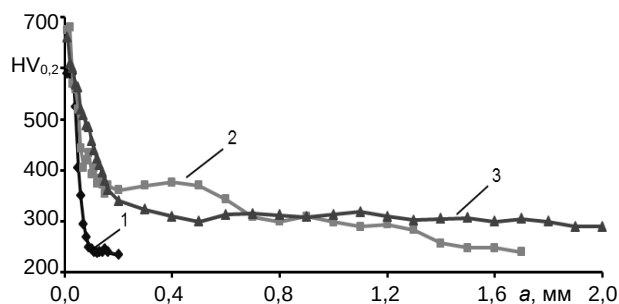


Рис. 6. Распределение микротвердости по сечению образцов после электролитно-плазменной цементации при напряжении 240 В: 1 – время 2 мин; 2 – 5; 3 – 10 мин

Из представленных зависимостей видно, что электролитно-плазменная цементация с относительно малой продолжительностью по сравнению с газовой цементацией (1–1,5 ч) или цементацией в твердом карбюризаторе (1,5–2 ч) обеспечивает глубину упрочнения до 200 мкм. Даже при незначительной продолжительности процесса (2 мин) на поверхности образца формируется слой толщиной около 70 мкм с максимальной микротвердостью 600 HV<sub>0,2</sub>. При этом сердцевина сохраняет исходную мик-

ротвердость. Обработка продолжительностью 5 мин и более обеспечивает повышение поверхностной микротвердости до 700 HV<sub>0,2</sub> при толщине цементированного слоя около 160 мкм. В данном случае микротвердость сердцевины уже превышает исходную микротвердость за счет увеличения глубины диффузии углерода. Так, глубина слоя, имеющего повышенную микротвердость по сравнению с исходной, после цементации продолжительностью 5 мин составляет 1,7 мм. Обработка продолжительностью 10 мин обеспечивает повышение микротвердости всей сердцевины (т. е. на глубину более 2 мм) до значений 290–320 HV<sub>0,2</sub>.

## ВЫВОДЫ

1. С повышением рабочего напряжения скорость электролитно-плазменного нагрева увеличивается и достигает максимума при удельной мощности 300 Вт/см<sup>2</sup>, что соответствует рабочему напряжению 240 В. Дальнейший рост удельной мощности нагрева приводит к снижению максимальной температуры нагрева, что связано с перераспределением тепловых потоков при повышении рабочего напряжения.

2. Наиболее приемлемым, с точки зрения эффективности, является электролитно-плазменный нагрев в диапазоне напряжений 240–270 В, обеспечивающий достижение требуемой температуры анода (950–1050 °С), а также максимальную скорость и мощность нагрева.

3. В условиях электролитно-плазменного нагрева интенсифицируются диффузионные процессы, что позволяет проводить цементацию в течение нескольких минут, по сравнению с несколькими часами при традиционных способах газовой цементации или цементации в твердом карбюризаторе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / И. В. Суминов [и др.]; под общ. ред. И. В. Суминова. – М.: Техносфера, 2011. – Т. 1. – 464 с.
2. Химико-термическая обработка сталей и порошковых сплавов / П. Н. Белкин [и др.]. – Кострома: Изд-во КГТУ, 1998. – 114 с.

Поступила 02.07.2013