

С.А. Кусманов, доц., д-р техн. наук,  
С.А. Силкин, канд. техн. наук,  
П.Н. Белкин, проф., д-р техн. наук  
Костромской государственной университет, Кострома

## **ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СТАЛИ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ И ПОЛИРОВАНИЯ**

В статье рассматриваются результаты электролитно-плазменного полирования (ЭПП) стальных образцов после их анодного диффузионного насыщения элементами, образующими растворы внедрения. Обработке подвергались цилиндрические образцы из стали 20 и стали 45 высотой 15 мм и диаметром 8–10 мм. Электролитно-плазменное насыщение (ЭПН) осуществлялось в различных по составу электролитах, что позволяло проводить нитроцементацию (состав 1: карбамид (15 %) – хлорид аммония (10 %), состав 2: нитрат аммония (5 %) – глицерин (8 %) – хлорид аммония (15 %)) и бороцементацию (борная кислота (3 %) – глицерин (8 %) – хлорид аммония (15 %)) образцов из стали 20 при температуре насыщения 850 °С, а также азотирование стали 45 при температуре 750 °С (аммиак (5 %) – хлорид аммония (10 %)) и борирование стали 45 при температуре 850 °С (борная кислота (3 %) – хлорид аммония (10 %)). Диффузионное насыщение осуществлялось в течение 5 мин, после чего образцы охлаждались в электролите (закаливались) от температуры насыщения отключением напряжения, промывались водой и сушились. Температура электролита при ЭПН поддерживалась равной  $(25\pm 2)$  °С. После насыщения стальные образцы подвергались ЭПП в течение 1 мин при напряжении 300 В в водных электролитах хлорида аммония (3 %) и сульфата аммония (5 %). Образцы при ЭПП, как и при ЭПН, подключались к положительному выходу источника постоянного тока. Температура электролита при полировании составляла  $(80\pm 2)$  °С.

В результате анодного ЭПН в водных электролитах происходит окисление поверхности стали и диффузия атомов легких элементов в структуру поверхностного слоя с образованием оксидных и диффузионных слоев. Оксидный слой содержит оксиды различного состава и структуры FeO,  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\zeta$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в зависимости от состава электролита и температуры обработки [1]. Диффузионные слои представляют собой твердые растворы атомов

диффузантов в железе с дисперсными нитридами, карбидами или боридами в зависимости от вида диффузионного насыщения.

Коррозионное поведение обработанной поверхности определяется, в первую очередь, составом, структурой и толщиной оксидного слоя. Изучение морфологии поверхности показало различие оксидных покрытий в зависимости от вида ЭПН, что связано с различной интенсивностью процессов окисления и анодного растворения металлической поверхности. Наибольшие поры наблюдаются после бороцементации, наименьшие – после нитроцементации в карбамидном электролите или борирования. Полирование в сульфатном электролите характеризуется относительно слабым травлением поверхности почти без изменения ее морфологии, что связано с пассивирующим действием сульфат-ионов. Очевидно, что удалению подвергалась лишь часть оксидного слоя. Значительно интенсивнее травление после полирования в хлоридном электролите. Некоторое осветление поверхности указывает на частичное удаление сплошного оксидного слоя и обнажение диффузионного слоя, обогащенного оксидами железа.

Пассивирующее действие сульфат-ионов подтверждается и, как правило, меньшей убылью массы образцов при полировании в растворе сульфата аммония по сравнению с полированием в хлоридном электролите. Исключение составляют образцы после нитроцементации в электролите, содержащем нитрат аммония, который является не только источником азота, но и активным окислителем стальной поверхности. Отметим также, что влияние анионного состава электролита на убыль массы является аргументом в пользу электрохимического механизма ЭПП. Удаление микровыступов на поверхности детали под действием электрического разряда в ПГО нельзя исключать, но такой механизм объясняется умозрительными конструкциями без экспериментального подтверждения [2].

Результаты коррозионных испытаний показали (табл. 1), что после удаления практически всего оксидного слоя ЭПП в хлоридном электролите плотность тока коррозии увеличивается во всех случаях, кроме азотированных образцов. В этом случае защитную роль вместо оксидов выполняют нитриды железа. После ЭПН другими способами нитриды в поверхностном слое отсутствуют или их количество незначительное. Полирование в растворе сульфата аммония показало дополнительное снижение плотности тока коррозии практически во всех случаях в 1,2–1,8 раза, кроме ЭПП образцов из стали 20, подвергшихся нитроцементации в карбамидном электролите. Такие

результаты позволяют предположить, что улучшение коррозионной стойкости наблюдается только в тех случаях, когда образуемый при ЭПН оксидный слой имеет рыхлую пористую структуру и его удаление снижает плотность тока коррозии. Практически полное удаление оксидного слоя, как это было показано на примере полирования в хлоридном электролите, приводит к снижению коррозионной стойкости по данному показателю.

**Таблица 1 – Результаты коррозионных испытаний образцов после ЭПН и ЭПП в различных электролитах. Значение плотности тока коррозии до ЭПН составляло 40,8 мкА/см<sup>2</sup>**

Способ ЭПН	Плотность тока коррозии, мкА/см <sup>2</sup>		
	После ЭПН	После ЭПП в сульфате аммония	После ЭПП в хлориде аммония
Нитроцементация-1	20,8	27,0	27,5
Нитроцементация-2	30,8	25,4	36,5
Бороцементация	19,7	14,9	30,8
Азотирование	20,0	13,1	10,7
Борирование	39,3	21,6	41,9

Если рассматривать коррозионное поведение относительно значений потенциала коррозии, то практически полное удаление оксидного слоя полированием в растворе хлорида аммония приводит к увеличению его значения во всех случаях, кроме ЭПП образцов из стали 45, подвергшихся борированию. В этом случае более эффективным является полирование борированных образцов в растворе сульфата аммония. Такие различия в изменении потенциала коррозии можно связать с неоднородностью состава поверхностного слоя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10094).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кусманов, С.А., Дьяков, И.Г., Белкин, П.Н. Теоретические основы электролитно-плазменного нагрева и его применение для диффузионного насыщения металлов и сплавов. – Кострома: Изд-во Костром. гос. ун-та, 2017. 420 с.
2. Веселовский, А.П., Кюбарсэп, С.В., Ушомирская, Л.А. Особенности электролитно-плазменной обработки металлов в нетоксичных электролитах // Металлообработка, 2002, № 6, С. 29.