

## ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

А. А. Смильгин

В настоящее время основными методами удаления различных поверхностных загрязнений, в т.ч. оксидных слоев, являются газовое, ионное и плазмохимическое травление. Эти методы позволяют обрабатывать всю поверхность изделия, однако их недостатком является длительность времени обработки, составляющей десятки минут.

В данной работе предложен новый метод удаления оксидных слоев, основанный на воздействии компрессионных плазменных потоков. Длительность плазменного импульса составляет порядка 100 мкс. Высокая плотность энергии, поглощаемая поверхностью при воздействии, до  $45 \text{ Дж/см}^2$ , обеспечивает нагрев поверхностного слоя до высокой температуры, что повышает эффективность химических реакций на поверхности обрабатываемого изделия в используемой атмосфере. Эти два фактора могут обеспечить высокую производительность и низкие удельные энергозатраты процесса.

Целью работы являлось установление механизмов удаления окалины с поверхности стали при воздействии компрессионными плазменными потоками.

Исследования проводились на конструкционной углеродистой стали 3 (0,3C, 0,2Si, 0,5Mn, масс.%). Поверхность образцов подвергалась окислению в процессе изотермического отжига при  $700^\circ\text{C}$  в течение 3 ч на воздухе. Оксидированные образцы обрабатывались компрессионными плазменными потоками (КПП), генерируемыми магнитоплазменным компрессором компактной геометрии в атмосфере азота при давлении в камере 400 Па. Напряжение на накопительной батарее конденсатора составляло 3,5 кВ. Количество импульсов изменялось от 1 до 3. Расстояние между мишенью и катодом составляло 8 и 12 см (при этом плотность энергии, поглощенной поверхностью образца (Q), составляла 20 и  $10 \text{ Дж/см}^2$  за импульс соответственно).

Морфология поперечного сечения изучалась с помощью сканирующей электронной микроскопии на микроскопе LEO1455VP. Фазовый состав поверхностного слоя был исследован с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН 4-13 в  $\text{CuK}_\alpha$  излучении.

Толщина оксидного слоя исходного образца стали составляет порядка 27 мкм (рис. 1). При обработке образца стали одним импульсом и при плотности энергии, поглощенной поверхностью образца (Q), составляющей  $10 \text{ Дж/см}^2$  за импульс, оксидный слой уменьшается с 27 до 22 мкм. В данном случае возможным механизмом удаления оксидного

слоя может служить испарение. Дальнейшая обработка тремя импульсами при  $Q = 10 \text{ Дж/см}^2$  не приводит к полному удалению окалины (остаются локальные участки с оксидами  $\sim 3 \text{ мкм.}$ ), также наблюдается оплавленный слой (5 мкм.) и зона термического влияния (17 мкм.) (рис. 2).

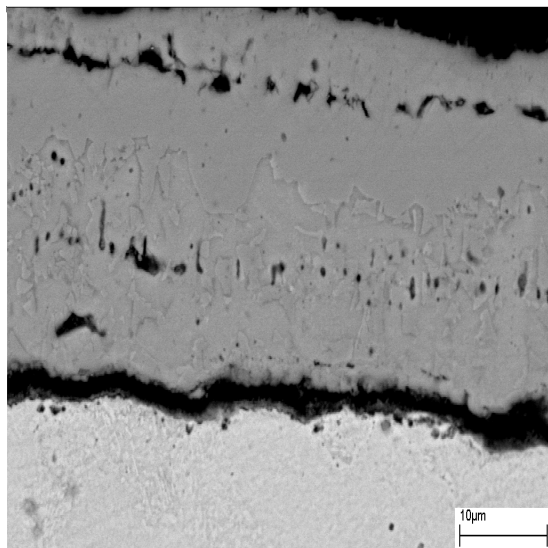


Рис. 1. Морфология поперечного сечения образца стали 3 с оксидным слоем

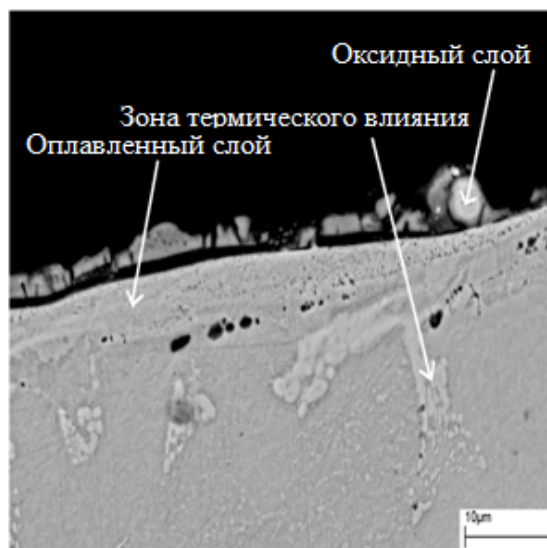


Рис. 2. Морфология поперечного сечения образца стали 3: после обработки тремя импульсами КПП при  $Q=10 \text{ Дж/см}^2$

Следует отметить тот факт, что кислород может проникать вглубь модифицированного слоя. Это может происходить за счет перемешивания оксида и поверхностного слоя стали [1].

Рентгеноструктурный анализ подтверждает ранее описанные с помощью растровой электронной микроскопии закономерности удаления оксида с поверхности стали. Кроме того, на рентгенограмме наблюдается появление дифракционной линии, соответствующей нестехиометрическому нитриду железа. Т.к. обработка образцов стали 3 при  $Q = 10 \text{ Дж/см}^2$  не приводит к полному удалению оксидных слоев, поэтому был использован режим обработки с большей плотностью энергии ( $Q = 20 \text{ Дж/см}^2$ ).

Растровая электронная микроскопия показала, что обработка одним импульсом при  $Q = 20 \text{ Дж/см}^2$  приводит к растрескиванию оксидного слоя и к его частичному удалению (с 27 до 18 мкм).

Дальнейшая обработка образца двумя импульсами КПП приводит к еще большему растрескиванию оксидного слоя и уменьшению его толщины до 12 мкм (рис. 3). Наблюдается также локальное удаление оксида. На таких участках можно выделить оплавленный слой толщиной  $\sim 8,4 \text{ мкм}$  и зону термического влияния  $\sim 17 \text{ мкм}$ .

Возможный механизм удаления оксидного слоя в данном случае – растрескивание за счет разных значений линейных коэффициентов теплового расширения оксидов.

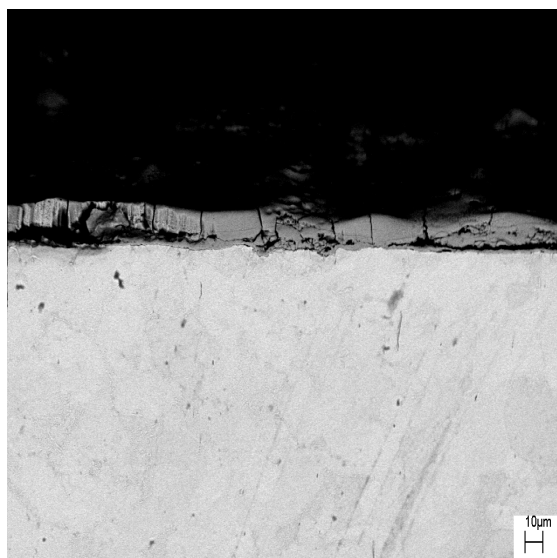


Рис. 3. Морфология поперечного сечения образца стали 3 с оксидным слоем, обработанного двумя импульсами КПП при  $Q = 20 \text{ Дж/см}^2$

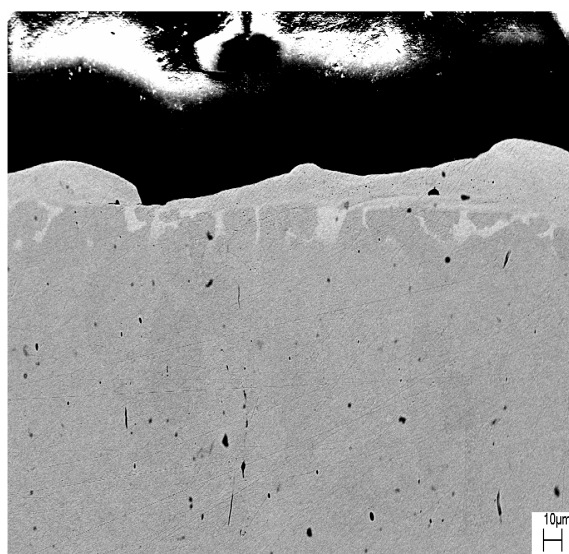


Рис. 4. Морфология поперечного сечения образца стали 3 с оксидным слоем, обработанного тремя импульсами КПП при  $Q = 20 \text{ Дж/см}^2$

Обработка тремя импульсами КПП при  $Q = 20 \text{ Дж/см}^2$  приводит к полному удалению оксидного слоя. Также выделяется оплавленный слой  $\sim 6\div 26 \text{ мкм}$  и зона термического влияния  $\sim 12 \text{ мкм}$  (рис. 4). Оплавленный слой, формируемый в условиях сверхбыстрого охлаждения, обладает субмикронной дисперсной структурой, улучшающей физико-механические свойства [2].

При фазовом анализе образцов, обработанных КПП при  $Q = 20 \text{ Дж/см}^2$ , также было обнаружено появление нестехиометрического нитрида железа.

Таким образом, КПП, генерируемые газоразрядным магнитоплазменным компрессором, могут применяться не только для эффективной очистки поверхности железа и сталей от оксидных слоев, но и дают возможность дополнительной модификации поверхностного слоя.

#### Литература

1. Углов В. В., Черенда Н. Н., Стальмошенков Е. К., Тарасюк Н. С., Кононов А. Г., Асташинский В. М., Кузьмицкий А. М., Ковязо А. В. Перемешивание системы цирконий-сталь компрессионными плазменными потоками, сформированными в квазистационарном плазменном ускорителе // Вакуумная техника и технология. 2006. т.16. №2. С. 123–131.
2. Углов В. В., Анищик В. М., Асташинский В. М., Свешиников Ю. В., Румянцев И. Н., Аскерко В. В., Кузьмицкий А. М. Модификация структуры и свойств поверхностных слоев углеродистых сталей при воздействии компрессионного плазменного потока // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 3. С. 23–28.