

к.т.н. Мурга В.В., Антропов И.И.,  
Дж. Омеман, Гамазин Д.К.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

## ФОРМИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ В МАТЕРИАЛАХ ПРИ ОБРАБОТКЕ В НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ

При проведении термообработки поверхности стальных изделий существенно сказывается динамика процесса нагрева и охлаждения деталей. Обсуждение этого вопроса длится достаточно долгое время. Существующие теории утверждают, что нагрев должен производиться за время в 5 раз превышающее время выдержки и тем самым обеспечивается необходимая модификация поверхности.

Конструкция установки для обработки материалов в неравновесной плазме с жидким электродом представлена на рисунке 1. Образец (1), являющийся одновременно и анодом, находится над поверхностью электролита (3) в диэлектрической кювете (2), на дно которой опущен второй электрод – катод (4). Для определения распределения потенциала в толще электролита использовался дополнительный сетчатый электрод (5) со шкалой (6) и вольтметр (7).

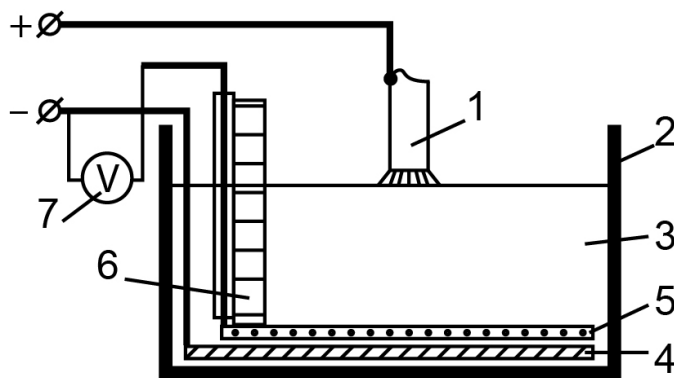


Рисунок 1 – Конструкция установки для обработки материалов в неравновесной плазме с жидким электродом

В качестве жидкого электрода использовались водный раствор  $(NH_4)_2Cr_2O_7$  с массовой долей 0,0045% и раствор  $NaCl$ , с массовой долей 0,001%. Выбор солей и концентраций осуществлен на основании предварительных опытов и обусловлен тем, что именно такие концентрации обеспечивает наиболее стабильное горение разряда и наименьшую эрозию поверхности обрабатываемого материала.

Для инициации разряда обрабатываемая поверхность соприкасается с поверхностью электролита. Возникающий разряд – многоканальный, состоит из большого числа стримеров, хаотически зажигающихся по всей обрабатываемой поверхности. Разряды занимают весь объём между деталью и электролитом. Рабочий диапазон напряжений стабильного горения плазмы – от 400 до 1400 вольт, разрядный ток определяется площадью поверхности материала и в проведенных экспериментах варьировался от 0,02 до 3А. Экспериментально определено, что напряжение, приложенное к электролиту во время горения плазмы, не превышает 10%, от общего падения напряжения на установке.

Использование метода нагрева в неравновесной плазме, которая образуется при разряде между металлическим анодом и жидким катодом позволяет получить необходимые изменения поверхности при с высокой эффективностью и высокой управляемостью.

В обрабатываемом образце изменение фазового состава образца происходит вследствие ускоренной термообработки приповерхностных слоев. В зависимости от режима возможна реализация закалки или отпуска поверхностного слоя. Для теоретического определения толщины закалённого слоя необходимо рассчитать распределение температур в образце. Это распределение можно получить из решения задачи теплопроводности. В условиях кратковременного действия интенсивного поверхностного теплового источника, что соответствует методике поверхностной обработки неравновесной плазмой, возможно использование однородного линейного уравнения теплопроводности для полуограниченного тела

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \vec{\nabla}(\lambda \vec{\nabla} T) = 0, \quad (1)$$

где  $c_p$  – теплоемкость,  $\rho$  – плотность,  $\lambda$  – теплопроводность материала.

Для решения этой задачи необходимы начальные и краевые условия, а также теплофизические свойства образца. В качестве начальных условий разумно использовать требование равенства температуры материала комнатной. Граничные условия должны учитывать стационарный тепловой поток со стороны плазменной прослойки, конвекционный и излучательный теплообмен нагретого образца с окружающим пространством.

Степень влияния конвекции и излучательности на снижение температуры поверхности можно оценить следующим образом. Энергетические потери за счет конвекции в первом приближении описываются законом Ньютона-Рихмана

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial S} q_{\text{конв}} = h\Delta T, \quad (2)$$

где  $q_{\text{конв}}$  – конвекционный тепловой поток,  $h$  – коэффициент теплообмена металла с окружающей средой, для газов  $h = (10 \div 100)$  Вт/(м<sup>2</sup>К) [1],  $\Delta T$  – разница температур элемента поверхности  $dS$  и окружающего воздуха.

Потери на тепловое излучение определяются законом Стефана-Больцмана

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial S} q_{\text{изл}} = \sigma T^4, \quad (3)$$

где  $q_{\text{изл}}$  – энергия излучения с элемента  $dS$ ,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $T$  – температура поверхности образца.

Известно [2], что в процессе плазменного нагрева поверхности температура образца достигает значений вплоть до температуры плавления материала. Частное уравнений (2) и (3) дает оценку степени влияния конвекционных и излучательных потерь на установление температуры поверхности образца

$$\frac{q_{\text{изл}}}{q_{\text{конв}}} = \frac{\sigma T^4}{h\Delta T} = 2 \div 10 \quad (4)$$

для предельных значений температуры поверхности.

Таким образом, оценка (4) показывает, что величины  $q_{\text{изл}}$  и  $q_{\text{конв}}$  сравнимы, и должны учитываться при формировании граничных условий для поверхности образца, не охваченной плазменной прослойкой. Тогда для боковой поверхности образца квадратного сечения со стороной  $a$  граничные условия при температуре окружающей среды  $T_0$  примут вид

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\pm a/2} = -h(T|_{x=\pm a/2} - T_0) - \sigma T|_{x=\pm a/2}, \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=\pm a/2} = -h(T|_{y=\pm a/2} - T_0) - \sigma T|_{y=\pm a/2}.$$

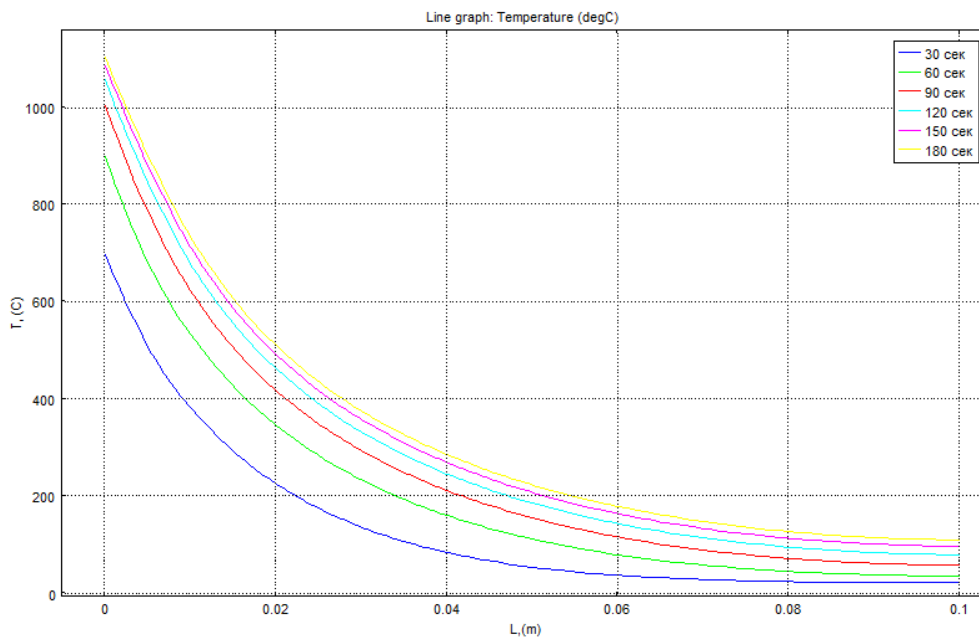


Рисунок 2 – Распределение температуры в образце для различных моментов времени

Использование данного вида обработки приводит к существенным изменениям структуры поверхности обрабатываемого материала (рис. 3) и в конечном итоге к изменению показателей твердости поверхностного слоя (рис. 4)

Как видно, твёрдость слоя, глубиной около 4 мм, увеличивается в 4-4,5 раза.

Полученные результаты исследований изменения физических свойств поверхности образца, обработанном плазмой многоканального разряда между электролитом и образцом указывают на значительные изменения в поверхностном слое. Показано увеличение твердости при значительно меньших затратах времени и энергии по сравнению с традиционной термической обработкой. Простота предложенного способа обработки позволяет рекомендовать его для промышленного применения без существенных капиталовложений.

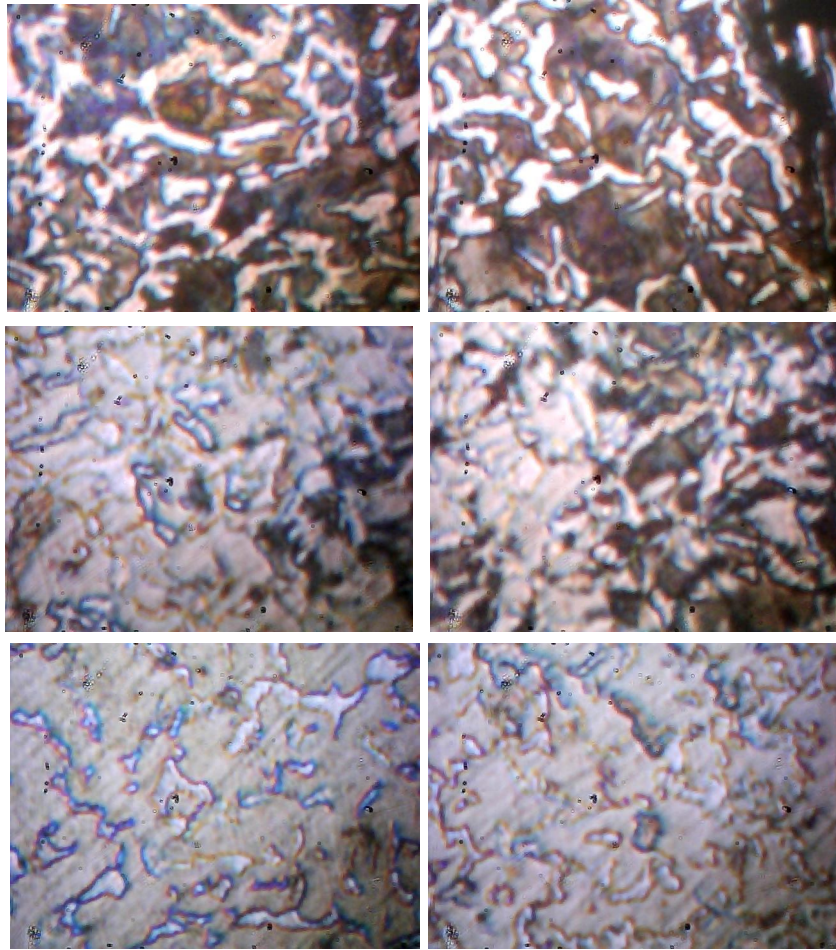


Рисунок 3 – Изменение структуры стали в процессе обработки. Вверху – необработанная поверхность, внизу – после обработки.

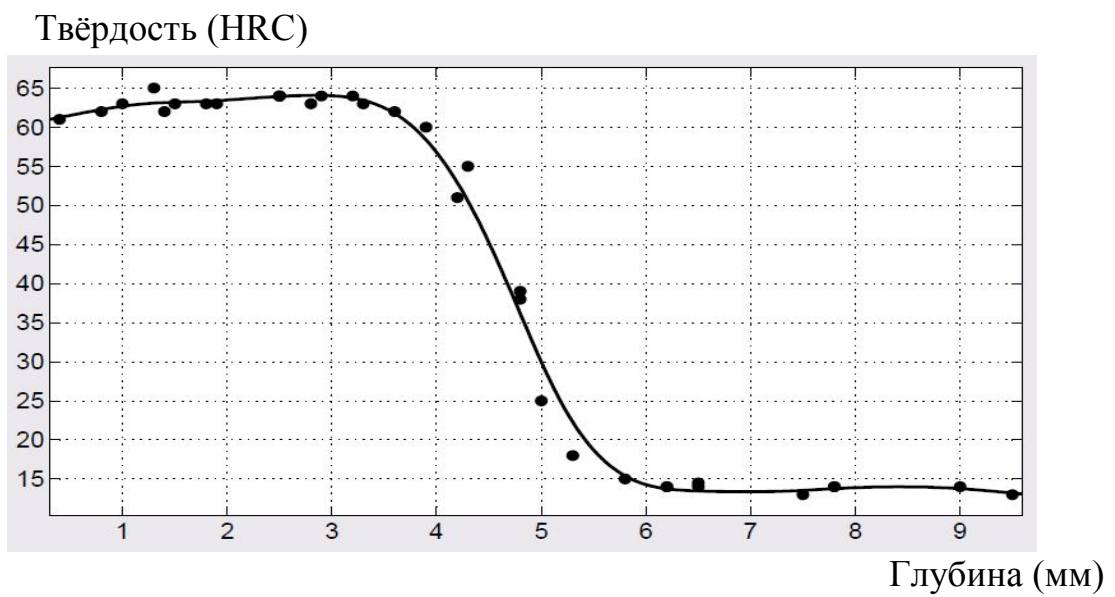


Рисунок 4– Распределение твердости вдоль образца