

ФОРМИРОВАНИЕ УПРОЧНЁННОГО СЛОЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ

В.В. Мурга¹, Д.К. Гамазин¹, И.И. Антропов², Дж. Омеман¹

¹*Донбасский государственный технический университет, Алчевск, Украина
E-mail: murga@ukr.net; тел. 06442-23522, факс. 06442-26887;*

²*Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия
E-mail: i.antropov@yahoo.com; тел. +7982-364-3228*

Представлены результаты экспериментальных исследований изменения механических и структурных характеристик поверхности стали при обработке в неравновесной плазме. В качестве источника неравновесной плазмы рассматривается плазмотрон с жидким электродом. Проведен анализ состояния поверхности после локального теплового воздействия, сопровождающегося фазовыми превращениями. Представленные данные показывают, что твердость поверхности после обработки в неравновесной плазме может превышать значения твердости, полученные при любом другом способе обработки. Показана высокая энергетическая эффективность описанного способа обработки материалов.

ВВЕДЕНИЕ

Методы поверхностного упрочнения стальных изделий позволяют не только значительно повысить качество продукции и добиться заданных параметров поверхности, не затрагивая глубокие слои изделия, но и экономить энергетические ресурсы. К таким методам можно отнести и применение плазмотрона с жидким катодом.

Такое технологическое решение позволяет не только повысить твердость и износостойкость поверхности стального изделия при сравнительно низких затратах энергии, но и организовать весь процесс обработки без применения сложных технических решений, используя уже существующее оборудование с минимальными изменениями [1, 2].

Однако невозможно говорить о реальном применении того или иного метода обработки без возможности точно подобрать режим под каждый конкретный случай. Идеальным решением в таком случае было бы создание теоретической модели, точно описывающей разряд в системе металлический анод–электролитический катод. Однако такая модель для многоканального разряда между поверхностью электролита и металлическим анодом при атмосферном давлении в настоящий момент не разработана [3].

В этой ситуации решение данной проблемы возможно экспериментальными методами. В частности, немаловажно изучить закономерность формирования упрочнённого слоя со временем. Изучение этого вопроса и является задачей этой статьи.

Актуальность темы состоит в разработке энергоэффективного метода поверхностной обработки стальных изделий; научная новизна работы состоит в том, что впервые изучены закономерности формирования упрочнённого слоя в подобной системе.

Целью данной работы является термодинамический анализ процессов, протекающих в газоразрядном промежутке

генераторов неравновесной электронной плазмы описанного типа, и исследование возможностей модификации поверхностных слоев стальных изделий описанным методом.

В обрабатываемом образце изменение его фазового состава происходит вследствие экстремального нагрева и охлаждения приповерхностных слоев. В зависимости от режима возможна реализация закалки или отпуска поверхностного слоя. Распределение температур в образце позволяет сделать оценку толщины закалённого слоя. Распределение температур можно получить на основе решения задачи теплопроводности. В условиях кратковременного действия интенсивного поверхностного теплового источника, что соответствует методике поверхностной обработки неравновесной плазмой [3], возможно использование однородного линейного уравнения теплопроводности для полуограниченного тела:

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

где c_p – теплоемкость; ρ – плотность; λ – теплопроводность материала.

Для решения этой задачи необходимы начальные и краевые условия, а также теплофизические свойства образца. В качестве начальных условий разумно использовать требование равенства комнатной температуры материала. 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 $h = 10 \dots 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$); ΔT – 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 ; σ – постоянная Стефана-Больцмана; T – температура поверхности образца.

Известно, что в процессе плазменного нагрева поверхности температура образца достигает значений вплоть до температуры плавления материала. Частные уравнения (2) и (3) дают 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 примут вид:

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

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

где T_0 – температура окружающей среды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения эксперимента использовалась установка, представленная в работе [3]. Однако в роли анода использовался образец из стали 45 сечением 15 мм. Катодом выступал раствор поваренной соли с концентрацией 0,1%. Обработка производилась по торцевой поверхности. Ток в установке во время обработки – 2,25 А, напряжение на разрядном промежутке – 940...1000 В.

После обработки боковая поверхность образца шлифовалась, затем подвергалась травлению. Уже на этом этапе проявлялась визуально различимая граница между закалённым и незакалённым слоями. Проявление границы происходит благодаря тому, что закалённый и незакалённый слои в разной степени подвергаются травлению. Затем визуально измеряли толщину закалённого слоя. Кроме того, производились измерения твёрдости в закалённой и незакалённой областях для подтверждения связи между реальной картиной распределения твёрдости и визуально наблюдаемой разницей в травлении слоёв.

Обработке подверглась группа образцов, времена обработки которых варьировалось от 30 до 240 с. После проведения измерений было установлено, что при временах обработки менее 1 мин закалённый слой не образуется. В интервале от 60 до 140 с происходит равномерное увеличение толщины закалённого слоя. Свыше этого времени – толщина упрочнённого слоя практически не изменяется. На рис. 1 приведены результаты исследований зависимости толщины закалённого слоя от времени обработки.

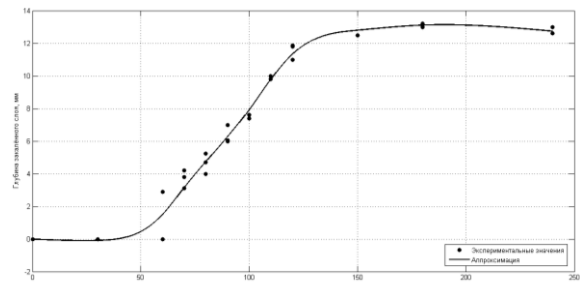


Рис. 1. График зависимости толщины закалённого слоя от времени обработки

Тот факт, что упрочнённый слой образуется не сразу, очевидно, связан с тем, что прогрев образца до температуры выше критической занимает некоторое время. Насыщение, наблюдаемое свыше 150 с обработки, обусловлено установлением стационарного режима распределения тепла, когда потери через боковые поверхности образца полностью компенсируют тепловой поток, поступающий в образец. Для проверки этой гипотезы была использована модель, аналогичная представленной в [4]. Полученные результаты приведены на рис. 2.

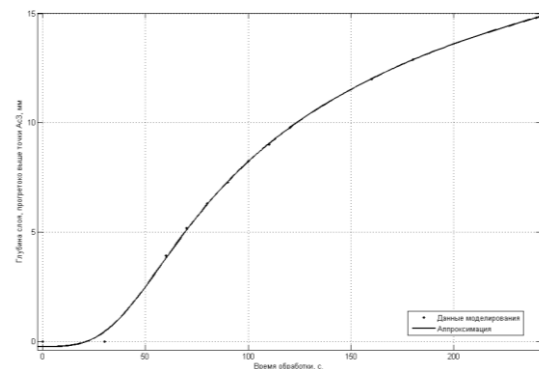
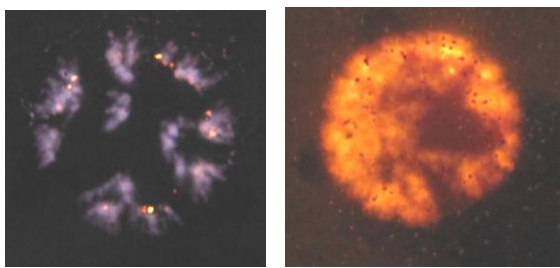


Рис. 2. Зависимость глубины слоя, прогретого до точки Ас3 от времени обработки

Наблюдается качественное согласование экспериментальных данных и данных моделирования. В частности, также наблюдается насыщение, обусловленное возрастанием тепловых потерь с ростом температуры. Следует отметить, что наилучшее согласование данных эксперимента с результатами моделирования происходит при значениях КПД, равных 30...35%, что также согласуется с более ранними результатами, полученными нами.



а б

Рис. 3. Распределение разрядных каналов между металлом и жидким катодом при малом токах (а) и большом токе (б)

Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод, что особенности формирования закалённого слоя в стальном изделии, обработанном плазматроном с жидким катодом, связаны с

нестационарными процессами электрического разряда в промежутке металл–жидкость.

После обработки в неравновесной плазме проводилось исследование микроструктуры материала. Результаты представлены на рис. 4, 5.

Одной из особенностей структуры стали после обработки в неравновесной плазме является отсутствие четкой границы между закаленной и незакаленной областями, как это наблюдается при лазерной закалке. Отсутствие четкой границы в нашем случае можно связать с тем, что нагрев по поверхности не является равномерным и отражает нестационарный характер разряда, который хорошо иллюстрирован снимками (рис. 3). Данный характер разряда имеет и негативное свойство. Это отсутствие возможности получить микронные размеры упрочненных участков, что отражено на рис. 1 и 2.

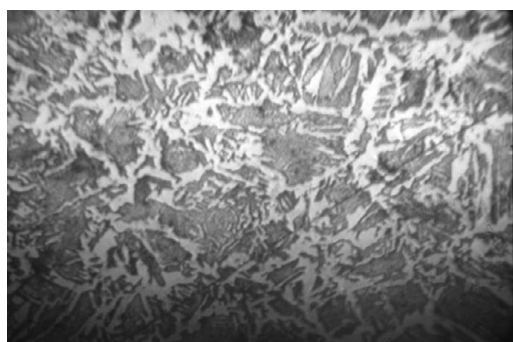


Рис. 4. Микроструктура необработанной стали

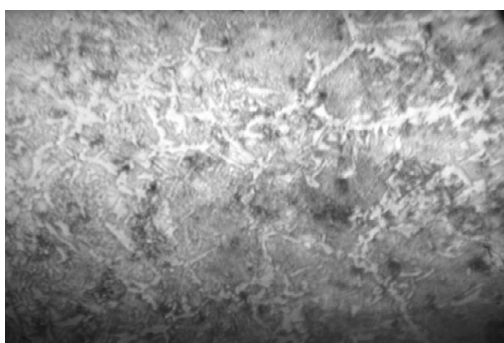


Рис. 5. Пограничный слой, разделяющий закаленную и незакаленную области

Оценка показателей твердости образца производилась по методу Роквелла. Данные измерений, соответствующие обработке в течение 180 с, приведены на рис. 6.

Переход в этом случае представляет собой протяженный участок. Это заметно на рис. 1, 2.

ВЫВОДЫ

В работе произведен анализ особенностей формирования упрочненного слоя в изделиях из стали при термообработке в плазматроне с жидким катодом.

Такой способ обработки позволяет достичь высокой твердости поверхностного слоя, избежав при этом формирования резкой границы, отрицательно сказывающейся на свойствах изделия. Данное свойство нагрева деталей в неравновесной плазме снижает остаточные напряжения в закалённой области.

Для процесса обработки в неравновесной плазме, источником которой является плазматрон с жидким электродом, характерно формирование упрочненного слоя толщиной порядка 0,5 мм. Это связано с неравномерностью прогрева поверхности при стримерном характере разряда.

В целом метод поверхностного упрочнения с использованием плазматрона с жидким катодом может быть пригодным для промышленного применения.

В дальнейшем исследования должны быть направлены на получение равновесной структуры упрочненного слоя при обработке деталей в плазматронах с жидким электродом.

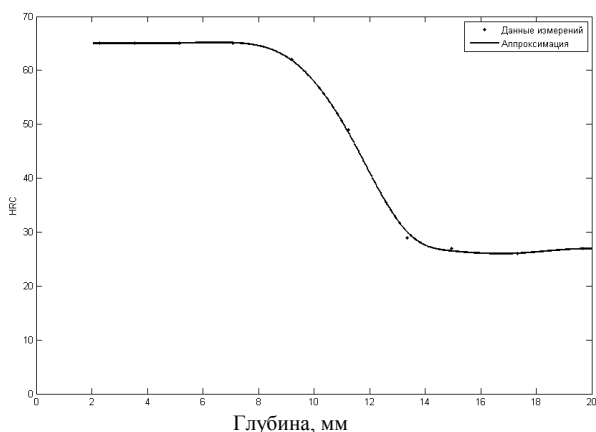


Рис. 6. Зависимость твёрдости образца от глубины обработки

Значение твердости в данном случае превышает показатели при традиционной термической и лазерной обработках, причем время обработки, включая предварительную подготовку, значительно уменьшается. Исследование структуры материала после обработки в плазматроне с жидким электродом показало, что нет строгой границы между упрочненным и неупрочненным слоями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.В. Мурга, Дж. Омеман, И.И. Антропов. *Использование плазмотрона с жидким катодом для упрочнения поверхности материалов*. Алчевск: ДонГТУ, 2008, 6 с.
2. И.В. Сулиманов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов. *Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов* / Под ред. И.В. Сулиманова. М.: «Техносфера», 2011, т. 1, 464 с.
3. Д.К. Гамазін, І.І. Антропов. Дослідження багатоканального розряду в системі

електролітичний катод–твердий анод за атмосферного тиску // *Shevchenkivska vesna 2013. Proceedings of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists*. Kyiv: “Logos”, 2013, N XI, p. 196-199.

4. И.И. Антропов, Дж. Омеман, Д.К. Гамазин, А.В. Жданович. Моделирование процесса нагрева стальных изделий в электролите // *Всеукраїнська конференція «Відкриті фізичні читання»* (11 травня, м. Алчевськ): Збірник тез доповідей. Алчевськ: ДонДТУ, 2012, с. 12.

Статья поступила в редакцию 30.01.2015 г.

ФОРМУВАННЯ ЗМІЦНЕНОГО ШАРУ ПРИ ОБРОБЦІ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ В НЕРІВНОВАЖНІЙ ПЛАЗМІ

V.V. Murga, D.K. Gamazin, I.I. Antropov, J. Omeman

Представлено результати експериментальних досліджень зміни механічних і структурних характеристик поверхні сталі при обробці в нерівноважній плазмі. Як джерело нерівноважної плазми розглядається плазмотрон з рідким електродом. Проведено аналіз стану поверхні після локального теплового впливу, що супроводжується фазовими перетвореннями. Представлені дані показують, що твердість поверхні після обробки в нерівноважній плазмі може перевищувати значення твердості, що отримані при будь-якому іншому способі обробки. Показана висока енергетична ефективність описаного способу обробки матеріалів.

HARDENED LAYER FORMING DURING NONEQUILIBRIUM PLASMA TREATMENT OF CARBON STEELS

V.V. Murga, D.K. Gamazin, I.I. Antropov, J. Omeman

Results of experimental studies of changes in the mechanical and structural characteristics of the steel surface by treatment in a nonequilibrium plasma are presented. Plasma generator with liquid electrode was used as a source of nonequilibrium plasma. There are described results for the surface after the local thermal exposure accompanied by phase transformations. These data show that surface hardness after treatment in a nonequilibrium plasma may be greater of the hardness value after any other processing method. The high energy efficiency of the described material processing method is showed.