

УДК 53.043

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМОЙ

И.И. Антропов

В работе рассмотрена задача нагрева стальных изделий неравновесной плазмой, зажигаемой между электролитическим катодом и обрабатываемым изделием. Приведены результаты расчета температур с учетом радиационных потерь поверхности. Приведенные экспериментальные результаты по распределению твердости материала показывают удовлетворительную сходимость с результатами моделирования.

Ключевые слова: электролитический катод, плазменная обработка, твердость.

Плазменная поверхностная обработка на сегодняшний день достаточно широко используется для поверхностного упрочнения стальных изделий. Это обусловлено такими характеристиками плазмотронов, как сравнительно низкая себестоимость оборудования и его эксплуатации, достаточно гибкий диапазон режимов обработки, которые могут заключаться не только в традиционной термообработке, но и в обеспечении легирования поверхности, высокая технологичность процесса. Основные типы плазмотронов уже стали традиционными, основные режимы работы выявлены, а исследования посвящены, в основном, задачам конструктивной оптимизации или использованию комбинированных методов, таких как лазерно-плазменная обработка.

Сравнительно недавно появилось новое направление развития плазменных генераторов, позволяющих создать неравновесную плазму между обрабатываемой поверхностью и жидким электродом. Применение такой схемы обработки позволяет значительно повысить КПД процесса при минимальных затратах на создание самой установки. В качестве материала для жидкого электрода в таких схемах используются различные растворы солей, концентрация которых позволяет регулировать режим обработки в достаточно широких пределах. Известно [1], что при сравнительно низких значениях напряжения между обрабатываемой деталью и электродом в устройстве реализуется электролиз, переходящий при повышении теплового потока в пограничное пузырьковое, а затем пленочное кипение с образованием парогазовой подушки. Типичные значения напряжений, подающихся на электрохимическую ячейку, при этом составляют 100–300 В. Протекающие процессы при этом позволяют реализовать азотирование или цементацию поверхности анода, закалку за счет погружения нагретой детали в электролит.

При повышении напряжения на электролитической ячейке до единиц кВ между электролитом и обрабатываемой поверхностью начинают развиваться многоканальный разряд, эффективно нагревающий обрабатываемую поверхность (рис. 1). Данная работа посвящена моделированию процесса нагрева поверхности анода получаемой неравновесной плазмой.

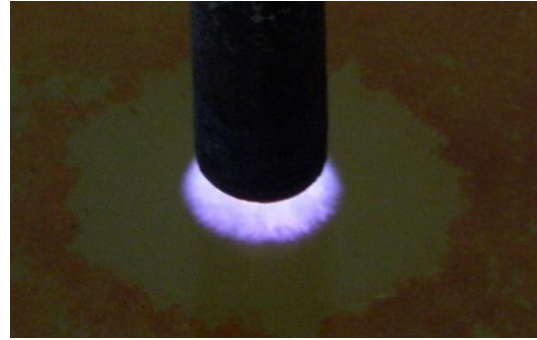


Рис. 1. Характер разряда при обработке

Для проведения обработки была использована установка, которая включает в себя регулируемый высоковольтный управляемый выпрямитель, L-С-фильтр и электрохимическую ячейку. На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики разряда для различных концентрации электролита от 0 до 0,6 вес% NaCl. Исследование распределения потенциала зондовым методом показало, что основное падение напряжения происходит на разрядном промежутке. Таким образом, представленные характеристики позволяют определить рабочие диапазоны и удельную интегральную мощность, вводимую в поверхностный слой.

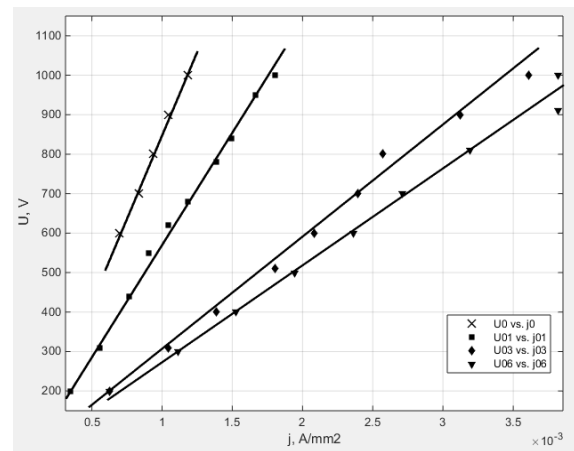


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики для различных концентраций электролита

Задача плазменного нагрева при рассматриваемом методе обработки может быть описана уравнением теплопроводности в виде:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \nabla T \right) = \nabla (k \nabla T) + Q, \quad (1)$$

где ρ – плотность обрабатываемого материала, c_p – удельная теплоемкость, k – теплопроводность, T – температура, Q – тепловой источник.

Начальные и граничные условия можно представить в виде:

начальные условия:

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (2)$$

граничные условия для боковой поверхности:

$$-\vec{n}(-k \nabla T) = \varepsilon_1 \sigma (T_0^4 - T^4), \quad (3)$$

граничные условия для поверхности, соприкасающейся с плазмой:

$$-\vec{n}(-k\nabla T) = q_0 + \varepsilon_2 \sigma (T_0^4 - T^4), \quad (3a)$$

где T_0 – температура окружающей среды, ε – коэффициент черноты поверхности при температуре T , q_0 – тепловой поток через поверхность, контактирующую с плазмой.

Задача решалась на пространственной сетке методом конечных элементов. В качестве входных параметров модели использованы следующие значения:

- обрабатываемая деталь – параллелограмм с основанием 12x12 мм и длиной 50 мм;
- тепловой поток $4 \cdot 10^6$ Вт/м² подводится в основание;
- время обработки – 60 с.

Результаты определения температур представлены на рис. 3. Анализ представленных зависимостей показывает, что температура торцевой поверхности при нагреве может достигать температуры плавления. В основном массиве обрабатываемого изделия наблюдается неравномерное распределение температуры как в продольном направлении вследствие инерционности теплопроводности, так и поперечном направлении из-за конвекционных и излучательных потерь. Приведенные оценки показывают, что вследствие охлаждения разница температур боковой поверхности и центральной части образца может достигать 50 °С, что может существенно сказаться на распределении твердости поверхности при малых временах обработки поверхности.

Исходя из приведенных зависимостей для температуры, можно предположить возможность протекания фазовой перестройки в областях с температурой выше точки A_{c3} при осуществлении быстрого охлаждения образца.

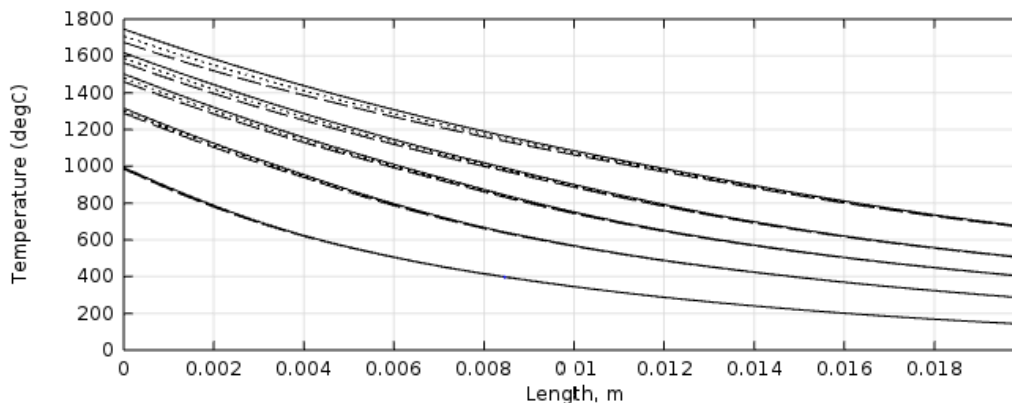


Рис. 3. Распределение температур вдоль образца по центральной линии (сплошные кривые), образующей (пунктирные кривые) и середине боковой стороны (точечные линии) для моментов времени 10 с, 20 с, 40 с, 60 с

Необходимо отметить, что представленная расчетная модель достаточно хорошо согласуется с проведенными экспериментами [2]. Так, при обработке визуально наблюдается большое количество областей спонтанной

контракции разрядных каналов и нагрев торцевой поверхности образца вплоть до температуры плавления. Протяженность области проплавления составляет несколько микрометров. Результаты исследования твердости (рис. 4) и микроструктуры поверхности после обработки также достаточно хорошо согласуются с результатами моделирования, протяженность зоны упрочнения соответствует рассчитанному распределению температур и для указанного режима составляет порядка 12 мм. Твердость образца при этом повышается до 4,5 раз по сравнению с необработанными участками.



Рис. 4. Распределение твердости

В качестве дальнейшего направления исследований можно рассматривать введение в граничные условия (3) слагаемых, характеризующих конвективный теплообмен с окружающей средой и парами электролита.

Библиографический список

1. Ясногородский, И.З. Нагрев материалов и сплавов в электролите / И.З. Ясногородский. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1949. – 128 с.
2. Мурга, В.В. Использование плазмотрона с жидким катодом для упрочнения поверхности материалов / В.В. Мурга, Дж. Омеман, И.И. Антропов. – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – С. 6.

[К содержанию](#)