

## ФИЗИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КАТОДНОГО ПЯТНА ВАКУУМНОЙ ДУГИ НА ПОВЕРХНОСТЬ

В. Т. Барченко, В. Д. Гончаров, Д. М. Репеева,  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»;  
А. А. Лисенков

*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

*Рассмотрена модель воздействия теплового потока на поверхность при наличии катодных пятен. Исследовано распространение теплоты в глубь металла, влияние скорости нагрева на структурные превращения. Показаны преимущества исследованного метода нагрева при закалке деталей.*

Вакуумно-дуговой разряд – это сильнооточный, самостоятельный разряд, развивающийся в замкнутом объеме в парах материала катода. Эмиссионным центром разряда является катодное пятно, характеризующееся малыми размерами и являющееся источником первичных электронов и основанием столба дуги. Высокая температура в пятне обуславливает интенсивное воздействие на материал катода. Существование и перемещение катодного пятна трактуются как нестационарные, циклические процессы возникновения и отмирания эмиссионных центров (*emission center or explosive center*).

Процессы в дуговом разряде подразделяются:

- на генерационные, протекающие в катодном пятне (в расплавленном слое жидкого металла) и оказывающие влияние на поверхность катода;
- протекающие в прикатодной области, определяющие условия генерации и динамику перемещения катодных пятен;
- протекающие в зоне транспортировки, в межэлектродном пространстве, начиная от области с сильно неидеальной низкотемпературной плазмой.

В процессе работы источника плазмы на поверхности катода наблюдаются катодные пятна различных типов, отличающиеся главным образом подвижностью, взаимной связью и временем возникновения [1].

Локализация энергии с высокой плотностью в малых объемах и выделение ее за время от наносекунд до единиц микросекунд приводит к сложным физико-химическим процессам, протекающим на поверхности твердого тела и приводящим к изменению структурного и фазового состава поверхностного слоя.

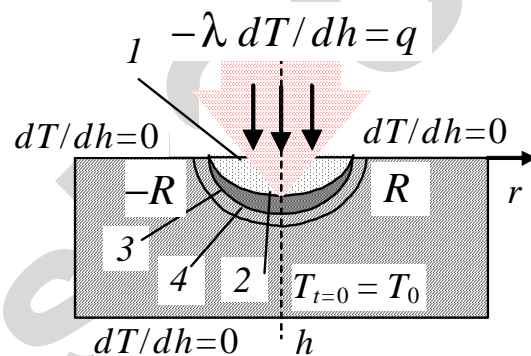
Технологические устройства на основе дугового разряда широко используются на предприятиях черной и цветной металлургии для удаления ржавчины, окалины и других загрязнений с металлических поверхностей [2].

Принцип теплового воздействия катодных пятен вакуумно-дугового разряда на поверхность металла может применяться как для получения порошков [3], так и для поверхностной закалки деталей [4].

Катодное пятно, как тепловой источник воздействия на поверхность катода, моделируется в форме круга радиусом  $R$  (рис. 1).

Полагая, что плотность электрического тока, протекающего через поверхность катодного пятна, одинакова во всех точках области и пренебрегая краевыми эффектами, в первом приближении интенсивность распределения мощности теплового источника можно считать равномерной по пятну.

Рис. 1. Модель воздействия теплового потока на поверхность: 1 – начальное положение катодного пятна на поверхности; 2 – нижняя граница при кипении; 3 – нижняя граница жидкой фазы; 4 – граница прогрева катода до температуры эмиссии



Таким образом, в пределах катодного пятна тепловой поток, подводимый из разряда и взаимодействующий с поверхностью, постоянен для любого момента времени:  $-\lambda(dT/dh)_{h=0} = q$ ,  $(0 \leq r \leq R)$ , а вне его равен нулю. Катод, по отношению к эффективному размеру источника тепла, является полубесконечным телом, поэтому на бесконечном удалении от поверхности тепловой поток равен нулю, а температура постоянна:  $(dT/dh)_{h=0} = 0$ ,  $(-\infty \leq r \leq -R \text{ и } R \leq r \leq \infty)$   $(-R \leq r \leq R)$ ;  $(dT/dh)_{h=\infty} = 0$ ;  $T_{h=\infty} = T_0$ . В исходном состоянии температура поверхности катода одинакова во всех точках:  $T_{t=0} = T_0$ .

За короткое время воздействия катодного пятна на поверхность выделенная теплота распространяется в глубь металла, тонкий слой которого нагревается выше температуры аустенитных превращений. Теплота сохраняется в течение времени, достаточного для растворения углерода. В процессе нагрева на поверхности формируются наибольшие градиенты температур. Для быстрого охлаждения тепло отводится в тело металла.

Скорость нагрева оказывает существенное влияние на размер рекристаллизованного зерна, так как с ее увеличением число центров

рекристаллизации растет быстрее, чем скорость роста центров. Это приводит к измельчению зерна. Кратковременное пребывание стали в области закалочных температур и протекание фазовых превращений при температурах, превышающих равновесные, приводят к получению механических свойств, отличающихся от свойств стали, закаленной традиционными источниками воздействия.

Более мелкая структура закаленной стали достигается за счет быстрого нагрева поверхности катодным пятном (скорость перемещения катодных пятен по рабочей поверхности достигает 100 м/с), что обеспечивает получение более благоприятного сочетания достигаемых свойств прочности и вязкости.

В процессе поверхностной закалки изделий существенное влияние оказывает состав окружающей газовой среды. При высокой температуре происходит химическое взаимодействие поверхности металла с окружающей средой, при этом особое значение имеют два протекающих процесса – обезуглероживание стали, связанное с выгоранием углерода в поверхностных слоях ( $C + O_2 \rightarrow CO_2$ ), и окисление поверхности, ведущее к образованию окалины и окислов ( $Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$ ). Это приводит к необходимости задавать припуск на последующее шлифование, что также удорожает и усложняет технологию изготовления обрабатываемых деталей.

В [4] предложен способ закалки стальных изделий за счет нагрева поверхностного слоя изделия локально-концентрированным источником энергии в виде катодного пятна в вакууме с последующим его охлаждением за счет отвода тепла в тело изделия. В этом случае эффект достигается за счет высокой скорости перемещения эмиссионного центра (до 100 м/с), малых его геометрических размеров ( $10^{-6}$  м), высокого уровня выделяющейся мощности (до  $10^9$  Вт/м<sup>2</sup>) и активного охлаждения.

Использование данного способа может повысить качество получаемых изделий за счет устранения процессов обезуглероживания и окисления, а также позволит расширить номенклатуру обрабатываемых изделий за счет обработки сложных геометрических поверхностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Современные технологические процессы в производстве мощных генераторных ламп / В.Т. Барченко и др. – СПб: ГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. – 213 с.
2. Кузнецов, В.Г. Вакуумная электродуговая очистка поверхности металлопроката – новое направление в металлообработке: материалы 7-й Междунар. конф. «Пленки и покрытия-2005». – СПб., 2005. – С. 57 – 62.
3. Способ получения мелкодисперсных порошков: пат. № 2395369 МПК В22F9/12. / В.Т. Барченко и др.; опубл. 27.07.2010. – Бюл. № 21.
4. Способ закалки стальных изделий: пат. РФ № 2386705 МПК С21D1/06. / В.Г.Кузнецов, А.А. Лисенков; опубл. 20.04.2010. – Бюл. № 11.