

Таблица 1. – Изменение параметров нагревателя и тока тлеющего разряда в зависимости от мощности нагревателя

% задания мощности нагревателя	$T_{\text{нагр}}, ^\circ\text{C}$	$I_{\text{разр}}, \text{A}$
20	458	85
30	471	83
40	523	66
50	565	46

Таким образом, эти эксперименты показали, что температура стенки камеры (в данном случае это муфель, так как нагреватель расположен внутри камеры) является еще одним управляющим параметром при проведении процесса обработки в тлеющем разряде, т. к. она в значительной мере влияет на параметры тлеющего разряда.

#### **Список использованных источников**

1. IonitechLtd.Products. [Electronicresource]. – Mode of access: <http://www.ionitech.com/products/coldwall-equipment.html>.
2. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. В. Сукомел. Изд. 4-е. – М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.

УДК 621.785.532

#### **Расчет температуры горячей стенки камеры для реализации низко-и высокотемпературного режима упрочняющей обработки**

**Опиок А. А., магистр**

*ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»*

*Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель; к.ф.-м.н., доцент Босяков М. Н.*

Аннотация:

В данной статье рассматривается расчет температуры горячей стенки камеры для реализации низко и высокотемпературного режима упрочняющей обработки. Поток тепла от садки к стенке ка-

меры зависит от температур стенки и садки, излучающей площади садки и степени их черноты.

Мощность тлеющего разряда (и, соответственно, сила тока) для камеры с холодными стенками зависит от температуры садки, количества теплозащитных экранов, степени их черноты и площади садки, которая определяет теплообмен со стенками камеры. Температура внутреннего, обращенного к садке экрана, от которой зависит теплообмен между садкой и стенкой, является подчиненной и зависящей от вышеперечисленных параметров. В камере с горячими стенками наоборот, температуру стенки или муфеля можно задавать любой, варьируя мощность нагревателя. Тем самым появляется возможность управлять мощностью тлеющего разряда, поскольку ее величина зависит от теплообмена между садкой и стенкой, т. е., в конечном счете, от температуры стенки.

Для приведенного примера расчета режима азотирования садки деталей стали 09Г2С рассмотрим, каким образом можно рассчитать значение температуры горячей стенки. Пусть диаметр садки составляет, например, 960 мм, а ее высота – 1400 мм. Диаметр горячей стенки принимаем  $960 + [(70 \text{ мм} - \text{зазор «садка-стенка»}) \times 2 = 140] = 1100 \text{ мм}$ , а высоту стенки принимаем равной 1600 мм.

Поток тепла от садки к стенке камеры зависит от температур стенки и садки, излучающей площади садки и степени их черноты. При условии, что 85 % мощности разряда расходуется на разогрев катода-садки [1], можно рассчитать диапазон изменения электрической мощности разряда (и, соответственно, плотности тока разряда) для выбранной геометрии камеры, геометрии садки и ее температуры. Для камеры с горячей стенкой величина  $A_{(c,ст.)}$  определяется следующим образом [2]:

$$A_{|c,ст|} = 1/(\epsilon_c^{-1} + (\epsilon_{ст}^{-1} - 1) (F_c/F_{ст})), \quad (1)$$

где  $\epsilon_c$  и  $\epsilon_{ст}$  – соответственно степень черноты садки и стенки;

$F_c$  и  $F_{ст}$  – площадь излучающей поверхности садки и стенки соответственно.

При расчете  $A_{(c.ct.)}$  принимаем значения величин  $\epsilon$  на основании данных из [3]:  $\epsilon_c = 0,4$ ;  $\epsilon_{ct} = 0,6$ ;  $\epsilon_{\alpha_1} = 0,6$ ;  $\epsilon_{\alpha_2} = 0,56$  и  $\epsilon_{\alpha_3} = 0,45$ .

Расчетное значение суммарной излучающей площади садки составит  $5,67 \text{ м}^2$ , из них на боковую поверхность приходится  $4,44 \text{ м}^2$  или 74 % общей площади, расчетное значение боковой поверхности стенки камеры –  $5,53 \text{ м}^2$ . Используя данные для степени черноты  $\epsilon_c = 0,4$ ;  $\epsilon_{ct} = 0,6$ , получим значение  $A_{(c.ct.)} = 0,33$ .

Значения электрической мощности тлеющего разряда рассчитаем для различных температур стенки – от  $440 \text{ °C}$  до  $460 \text{ °C}$ , а затем определим допустимый диапазон, чтобы обеспечить необходимую плотность потока азота.

$$P_{эл} = 1,18 \times 5,67 \times 0,33 \times 4,22 \times \left(4369 - \left(\frac{T_{ст}}{100}\right)^4\right) = 9,32 \times \left(4369 - \left(\frac{T_{ст}}{100}\right)^4\right). \quad (2)$$

При температуре стенки  $440 \text{ °C}$  значение полной электрической мощности, рассчитанной по предыдущей формуле, составляет величину  $22,5 \text{ кВт}$ , следовательно, при минимальном напряжении между катодом и анодом  $390 \text{ В}$ , сила тока составит  $57,7 \text{ А}$ , а плотность тока, соответственно  $2,9 \text{ А/м}^2$ . Далее, разделив плотность потока азота, равную  $4,91 \text{ л/час} \times \text{м}^2$  на величину плотности тока и на  $\sqrt{3} = 1,73$ , получим значение доли азота в составе газовой смеси:

$(\%N_2) = 4,91 : 2,9 : 1,73 = 0,98$ , а это означает, что азотирование должно проводиться практически в чистом азоте, так как на долю водорода и аргона остается лишь 2 % от общего расхода газа, который в данном случае должен быть

$$G_{сум.} = 98,2 : 0,98 = 100 \text{ л/час} . \quad (3)$$

Следовательно, в данном случае необходимо либо еще снижать температуру горячей стенки, либо увеличивать длительность второго шага выдержки, на котором значение плотности потока азота должно быть  $4,91 \text{ л/час} \times \text{м}^2$ . Предположим, что длительность второго шага будет 5 часов, следовательно,  $\sqrt{5} = 2,24$  и тогда доля азота в составе газовой смеси составит:

$(\%N_2) = 4,91 : 2,9 : 2,24 = 0,76$ , а общий расход газа  $G_{сум.} = 98,2 : 0,76 = 129,2 \text{ л/час}$  и на долю аргона и водорода остается  $G_{Ar+H_2} = 129,2 - 98,2 = 31 \text{ л/час}$ .

Для выбора режима обработки по давлению в камере можно воспользоваться данными рисунка 1 [4], где представлены расчетные значения нормальной плотности тока тлеющего разряда для азота, как компонента, имеющего наибольшее содержание в составе смеси. Как отмечалось в [4], для гарантированного существования тлеющего разряда в форме аномального, необходимо, чтобы реальная плотность тока была минимум в два раза больше, чем нормальная при данном давлении и температуре. Как следует из данных, этим условиям удовлетворяет диапазон давлений от 130 до 140 Па.

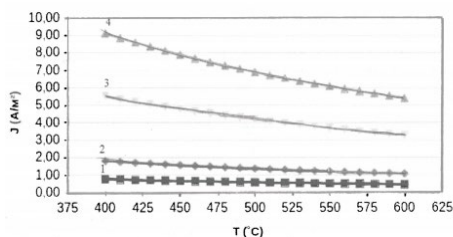


Рис. 1 – Расчетные значения нормальной плотности тока при различных давлениях в зависимости от температуры катода, 1 – 130, 2 – 200, 3 – 350, 4 – 450 Па [4]

Таким образом, проведенные расчеты показали, что при проведении процесса ионного азотирования в камере с горячими стенками температура горячей стенки не может задаваться произвольным образом, а должна быть согласована с температурой садки, площадью обрабатываемых деталей, плотностью потока азота и длительностью шага выдержки, на котором необходимо поддерживать заданную плотность потока постоянной.

Рассмотрим теперь, какова должна быть температура горячей стенки при проведении процесса высокотемпературной обработки, например, ионной цементации при температуре изотермической выдержки  $T = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Следует отметить, что параметры тлеющего разряда – ток, напряжение – могут быть аналогичными, как и при проведении низкотемпературной обработки, ионного азотирования. При расчете температуры горячей стенки будем иметь в виду, что степень черноты стенки и садки может отличаться от таковой при ионном азотировании, поскольку присутствие в составе рабочей газовой смеси углеродсодержащего газа, например,  $\text{CH}_4$  или про-

пан-бутана приводит к потемнению стенки камеры и поверхности деталей в садке. Как правило, при цементации максимальное значение степени черноты можно принять равным  $\epsilon_{с,ст} = 0,8$  [2]. С учетом сделанных допущений расчетная формула температуры горячей стенки примет следующий вид:

$$P_{эл} = 1,18 \times 5,67 \times 0,69 \times 4,22 \times \left(20944 - \left(\frac{T_{ст}}{100}\right)^4\right) = 19,48 \times \left(20944 - \left(\frac{T_{ст}}{100}\right)^4\right). \quad (4)$$

Если, например, принять электрическую мощность тлеющего разряда равной, как и при азотировании, 22,5 кВт, то температура горячей стенки должна быть 913 °С, что всего лишь на 17 °С меньше, чем температура садки.

Таким образом, мы видим существенное различие в разности температур «садка-горячая стенка» при проведении низкотемпературной обработки – ионного азотирования и высокотемпературной – ионной цементации.

### Список использованных источников

1. Marciniak, A. Non-uniform Heating Effects During Treatment in a Glow Discharge / A. Marciniak // Thin Solid Films. – 1988. – Vol. 156. – P. 337–344.
2. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей / Б. С. Матрюков. – М.: Металлургия. – 1986 – Т. 2. – 376 с.
3. Блох, А. Г. Теплообмен излучением: справочник / А. Г. Блох [и др.] – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
4. Босьяков, М. Н. Энергетические и газодинамические характеристики установок ионного азотирования промышленного типа / М. Н. Босьяков, А. А. Козлов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 342–350.