

УДК 621.785.532

**Формирование технологического режима упрочняющей
низкотемпературной обработки в камерах
с горячими стенками – расчет расхода газа**

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 рассматриваются особенности процессов упрочняющей обработки в камере с горячими стенками на различных стадиях. Суммарный расход газа и расход водорода по шагам могут оставаться неизменными – изменится лишь расход азота и аргона, в зависимости от площади садки и плотности тока.

К низкотемпературной упрочняющей обработке относятся процессы ионного азотирования и карбонитрирования, температурный диапазон их реализации – 350–580 °С, поэтому рассмотрим особенности реализации данного процесса на установках с горячими стенками. Первая стадия процесса – разогрев садки деталей до температуры изотермической выдержки, может быть реализована за более короткое время, если геометрия деталей позволяет осуществить их разогрев с повышенной скоростью. Вторая стадия – непосредственно изотермическая выдержка, как правило, проводится при некоторой выбранной температуре и в качестве активной среды используется газовая смесь на основе азота с определенным соотношением компонент в ее составе.

Параметром, характеризующим интенсивность процесса ионного азотирования, является плотность потока азота, которая является функцией параметров разряда (плотности тока), доли азота в составе газовой смеси и заданного расхода и может изменяться в ходе процесса по любому алгоритму [1].

Количественно плотность потока азота на поверхность можно представить в следующем виде:

$$\Pi_{N_2} = 0,897 \times J \times \% N_2, \quad (1)$$

где 0,897 – коэффициент пропорциональности между расходом азота в литрах в час при нормальных условиях (давление – 0,1 МПа и температура $T = 293 \text{ K}$) и количеством частиц в секунду;

J – плотность тока разряда (A/M^2);

$\%N_2$ – доля азота в газовой смеси ($1 \text{ л}/\text{ч} \cdot \text{M}^2 = 2,78 \times 10^{-7} \text{ M}^{-3}/\text{с} \cdot \text{M}^2$).

В то же время, плотность потока азота Π_{N_2} ($\text{M}^{-3}/\text{с} \cdot \text{M}^2$) или $\text{л}/\text{ч} \cdot \text{M}^2$) должна выбираться в зависимости от величины растворимости азота и коэффициента диффузии в α -твердом растворе для конкретной марки стали [1]:

$$\Pi_{N_2} = 0,89 \times C_{\alpha\text{-Fe}^{\text{лег}}} \times \sqrt{D_{\alpha\text{-Fe}^{\text{лег}}}} / \sqrt{\tau}, \quad (2)$$

где $D_{\alpha\text{-Fe}^{\text{лег}}}$ – коэффициент диффузии азота в α -твердом растворе легированной стали, τ – время, в течение которого при потоке азота Π_{N_2} концентрация его в поверхностном слое достигает значения, равного величине растворимости $C_{\alpha\text{-Fe}^{\text{лег}}}$, после чего может начаться образование «белого слоя» ($\gamma'+\epsilon$), существенно замедляющего диффузию азота в металл. Следует отметить, что растворимость азота и коэффициент диффузии для конкретной марки стали зависят от типа и концентрации легирующих элементов в стали и температуры процесса [2]. Объединив выражения (1) и (2), получим взаимосвязь химической активности разряда с характеристиками азотируемой стали – растворимостью азота в α -твердом растворе и коэффициентом диффузии:

$$0,897 \times J \times \%N_2 = 0,89 \times C_{\alpha\text{-Fe}^{\text{лег}}} \times \sqrt{D_{\alpha\text{-Fe}^{\text{лег}}}} / \sqrt{\tau}, \quad (3)$$

и после преобразований – выражение, связывающее искомую долю азота в смеси активных газов, как функцию плотности тока разряда, времени азотирования и характеристик азотируемой стали:

$$\%N_2 = \frac{C_{\alpha\text{-Fe}^{\text{лег}}} \times \sqrt{D_{\alpha\text{-Fe}^{\text{лег}}}}}{J} \times \sqrt{\tau}. \quad (4)$$

В выражении (4) для определения величины $C_{\alpha-Fe}^{лег}$ (в размерности литр азота в метре кубическом стали) можно воспользоваться соответствующими выражениями, приведенными в [3].

В выражение (4) входит параметр j (A/m^2) – плотность тока тлеющего разряда, которая определяется, как частное от деления силы тока разряда на общую площадь (катод+садка+оснастка), вокруг которой существует тлеющий разряд.

Сила тока тлеющего разряда существенным образом зависит от температуры «горячей» стенки (или муфеля) и, соответственно, должно быть понимание, какая же должна быть температура стенки камеры, чтобы при обработке было задано нужное значение концентрации азота.

Исходя из химического состава стали детали, рассчитывается «азотируемость» стали, т. е. комплекс – $C_{\alpha-Fe}^{лег} \times \sqrt{D_{\alpha-Fe}^{лег}}$ («растворимость×корень из диффузии») как функция температуры обработки. Величина этого комплекса позволит определить состав насыщающей среды (процент азота в зависимости от плотности тока разряда), чтобы не образовался преждевременно так называемый «белый слой», состоящий из нитридов железа, который затормозит дальнейшую диффузию азота в металл.

В данном комплексе значение величины $C_{\alpha-Fe}^{лег} \times \sqrt{D_{\alpha-Fe}^{лег}}$ характеризуют марку стали, плотность тока разряда J – параметры разряда, τ – длительность шага (или сегмента) программы на стадии разогрева или выдержки, в течение которого сохраняется определенный состав рабочей газовой смеси и определенная доля азота в нем. Далее задается количество шагов (сегментов) на стадии выдержки, их длительность (время выдержки на каждом шаге) и состав газа на каждом шаге выдержке – для этого необходимо определить величину разрядного тока в конце первого шага, на котором расход азота задается минимальным, и, исходя из этого значения тока, далее задается режим выдержки с определенным соотношением компонент рабочей смеси, в которой доля азота рассчитывается в соответствии с вышеприведенной формулой.

Следующим этапом «конструирования» режима обработки является расчет расхода газовой смеси. Плотность тока определяется путем деления значения силы тока разряда в конце первого шага выдержки длительностью 1 час, когда параметры разряда практиче-

ски стабилизируются, на площадь садки. Далее, воспользовавшись полученным значением параметра $C_{\alpha-Fe}^{лег} \times \sqrt{D_{\alpha-Fe}^{лег}}$ с учетом рассчитанной величины плотности тока J можно рассчитать процентное содержание азота в газовой смеси и время τ , в течение которого будет в камеру подаваться газовая смесь с расчетным значением процентного содержания азота в ней:

Например, нужно рассчитать режим выдержки для садки, состоящей из деталей общей площадью 20 м^2 ; марка стали – 09Г2С, температура выдержки – $540 \text{ }^\circ\text{C}$. Расчетное значение комплекса $C_{\alpha-Fe}^{лег} \times \sqrt{D_{\alpha-Fe}^{лег}}$ в размерности $[\text{л/час} \times \text{м}^2]$ для названной марки стали, полученное на основании данных из [2, 4] составляет $4,91 \text{ л/час} \times \text{м}^2$. Пусть сила тока разряда в конце первого шага равна 70 А , тогда плотность тока равна $J = 70 \text{ А} : 20 \text{ м}^2 = 3,5 \text{ А/м}^2$, следовательно,

$$\frac{C_{\alpha-Fe}^{лег} \times \sqrt{D_{\alpha-Fe}^{лег}}}{J} = \frac{4,91}{3,5} = 1,4. \quad (5)$$

Далее, если длительность второго шага выдержки принять, к примеру, 3 часа, то $\sqrt{3} = 1,73$ и, следовательно, доля азота в составе смеси газов составит величину:

$$\%N_2 = \frac{1,4}{1,73} = 0,81, \quad (6)$$

а общий расход азота рассчитывается таким образом:

$$G_{N_2} = 4,91 \text{ л/час} \times \text{м}^2 \times 20 \text{ м}^2 = 98,2 \text{ л/час},$$

соответственно общий расход всей газовой смеси (аргон + азот + водород)

$$G_{\text{сум.}} = 98,2 : 0,81 = 121,2 \text{ л/час},$$

следовательно, суммарно расход водорода и аргона составит:

$$G_{Ar+H_2} = 121,2 - 98,2 = 23 \text{ л/час}.$$

Если расход водорода задать $G_{H_2} = 5$ л/час, то расход аргона будет соответственно:

$$G_{Ar} = 23 - 5 = 18 \text{ л/час.}$$

Аналогичным путем рассчитывается состав газовой смеси и на последующих шагах выдержки. Количество шагов и их длительность задаются, исходя из необходимости сформировать азотированный слой заданной глубины.

Суммарный расход газа и расход водорода по шагам могут оставаться неизменными – изменяется лишь расход азота и аргона, в зависимости от площади садки и плотности тока.

Список использованных источников

1. Босяков, М. Н. Научные основы разработки промышленных технологических процессов плазменной химико-термической обработки изделий машиностроения. Исследование и оптимизация параметров процесса / М. Н. Босяков [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. научных трудов. В 2 кн. Кн. 1. Новые технологии и материалы. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2021. – С. 60–80.
2. Лахтин, Ю. М. Расчет влияния легирующих элементов на растворимость и диффузию азота в стали при азотировании в α и ϵ – фазах / Ю. М. Лахтин [и др.] // Труды МАДИ. Азотирование в машиностроении. – 1974. – № 174. – С. 42–59.
3. Берлин, Е. В. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Е. В. Берлин [и др.] // – М.: Техносфера, 2012. – 464 с.
4. Hosseini, S. R. Calculation and experimentation of the compound layer thickness in gas and plasma nitriding of iron / S. R. Hosseini, F. Ashrafizadeh, A. Kermanpur // Iranian Journal of Science & Technology. – 2010. – Vol. 34, № 5. – P. 553–566.