

Энергетика

УДК 681.5

ОБ ОГРАНИЧЕНИЯХ В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГАЗОВОГО АЗОТИРОВАНИЯ

Т.А. Бенгина

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрены вопросы постановки задач управления процессом газового азотирования. Проведено исследование системных связей, обеспечивающих основную цель этого вида химико-термической обработки – улучшение эксплуатационных характеристик обрабатываемых изделий. Установлены недопустимые области в пространстве состояний. Сформулированы ограничения по концентрациям азота в фазах, по температуре поверхности нагреваемого тела, по термонапряжениям, по мощности нагрева и по предельным значениям азотных потенциалов атмосферы.

Ключевые слова: газовое азотирование, тепломассоперенос, многофазная диффузия, оптимальное управление, объекты с распределенными параметрами, концентрация, нагрев.

Азотирование – один из видов химико-термической (ХТО) обработки материалов, при котором происходит диффузионное насыщение азотом поверхностного слоя изделия. Обрабатываемая деталь при определенной температуре выдерживается в активной газовой среде, при этом на поверхности изделия происходит взаимодействие между металлом и насыщающей средой. Концентрация диффундирующего элемента меняется по глубине металла, появляются фазы: α' – фаза – азотистый мартенсит; γ' – фаза – твердый раствор на основе нитрида железа Fe_4N ; ε – фаза – твердый раствор на основе нитрида железа Fe_3N_8 , и, как следствие, изменяются свойства обрабатываемого изделия.

Определяющее влияние на формирование диффузионных слоев и их структуру оказывают параметры газовой среды, температура процесса, степень и качество легирования стали, эти связи чрезвычайно сложны и многообразны. Существенную роль при постановке задачи управления азотированием играют ограничения в области пространства состояний объекта управления.

Наиболее значимое воздействие на показатели качества обрабатываемого изделия оказывает распределение концентрации азота по глубине слоя [4, 5].

Размеры детали несравнимо велики по сравнению с толщиной азотированного слоя, поэтому математическую модель процесса можно с высокой степенью точности считать одномерной.

Процесс диффузии азота в нагретую деталь в ходе ее азотирования может быть описан краевой задачей:

Татьяна Алексеевна Бенгина (к.т.н.), доцент кафедры «Высшая математика и прикладная информатика».

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_i \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x_i} \right), \quad \tau > 0, \quad 0 < x < R, \quad (1)$$

где D_i – коэффициент диффузии азота в i -той фазе; $C(x, \tau)$ – концентрация азота во внутренней точке x в момент времени τ .

Начальное распределение концентрации $C_0(x)$ и начальное положение межфазных границ $\xi_{i0}(x)$:

$$C(x, 0) = C_0(x); \quad (2)$$

$$\xi_i(x, \tau)|_{\tau=0} = \xi_{i0}(x). \quad (3)$$

Перенос азота из атмосферы на поверхность детали:

$$-D_i \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=R} = \beta_i (\Pi_N^0 - \Pi_N^i), \quad (4)$$

где β_i – коэффициент массопереноса для i -той фазы; $\Pi_N^0 = \frac{P_{NH_3}}{P_{H_2}}$ – азотный потенциал печной атмосферы; P_{NH_3}, P_{H_2} – парциальные давления аммиака и водорода соответственно; Π_N^i – равновесный азотный потенциал соответствующей фазы.

Граничное условие на левой границе:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0. \quad (5)$$

Условия на границах раздела фаз:

$$C(x_i, \tau) \Big|_{x_i=\xi_{i-0}} = C_i^-; \quad (6)$$

$$C(x_i, \tau) \Big|_{x_i=\xi_{i+0}} = C_i^+.$$

Закон движения межфазной границы отражает условие баланса вещества на границе:

$$j_i \frac{\partial \xi_i}{\partial \tau} = D_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{\xi_{i+0}} - D_{i-1} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{\xi_{i-0}}, \quad (7)$$

где $j_i = C_i^- - C_i^+$, $i = \overline{1, N}$, N – общее число областей, разделенных фазовыми переходами [1, 2].

Повышение твердости азотированного слоя связано с выделением в твердых растворах дисперсионных нитридов легирующих элементов. Для описания роста нитридов используется модель, предложенная в работе [3]. Предполагается, что они имеют сферическую форму и случайно расположены в матрице. При этих допущениях рост нитридов для относительной концентрации азота

$$\theta_N = \frac{C_0 - C_{cp}(\tau)}{C_0 - C_{NE}}$$

описывается уравнением

$$\frac{d\theta_N}{d\tau} = (K_N N_V^{2/3} D) \theta_N^{1/3} (1 - \theta_N),$$

где K_N определяется выражением

$$K_N = \left[48\pi^2 \frac{C_0 - C_{NE}}{C_{N\beta}} \right]^{\frac{1}{3}},$$

C_0 – исходная концентрация азота в твердом растворе; $C_{cp}(\tau)$ – средняя концентрация азота в момент времени τ ; C_{NE} – концентрация азота на границе «нитрид – твердый раствор»; D – коэффициент диффузии азота; N_V – количество нитридов в твердом растворе; $C_{N\beta}$ – концентрация азота в нитриде.

Необходимо также учесть, что на границах между фазами устанавливаются резкие перепады концентраций азота, соответствующие разностям его предельных растворимостей в соседних фазах $C_{\max}^{\alpha}, C_{\min}^{\gamma'}, C_{\max}^{\gamma'}, C_{\min}^{\alpha}$ в зависимости от абсолютной температуры детали T :

$$\begin{aligned} C_{\max}^{\alpha} &= \exp\left(-\frac{4975}{T} + 3\right) \frac{1}{n_{\text{ли}\alpha}}; \\ C_{\min}^{\gamma'} &= 5,77; \quad C_{\max}^{\gamma'} = 5,88; \\ C_{\min}^{\varepsilon} &= (3,01 + 0,0179T - 0,154 \cdot 10^{-4} T^2) \frac{1}{n_{\text{ли}\varepsilon}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь $n_{\text{ли}i}$ – коэффициент легирования, зависящий от химического состава стали, $i = \alpha, \gamma, \varepsilon$.

Повышение усталостной прочности при азотировании связано с возникновением в процессе поверхностного упрочнения остаточных напряжений, являющихся результатом объемных изменений в поверхностном слое [9]. Максимальная величина сжимающих напряжений фиксируется в зоне высокоазотированных нитридных фаз и на границах поверхностной нитридной зоны с диффузионным подслоем (на глубине 20 мкм). Несмотря на небольшое абсолютное значение, суммарная область действия остаточных напряжений характеризуется зоной существования нитридов. Именно эти напряжения вносят основной вклад в повышение сопротивления азотированной стали усталостному разрушению.

Таким образом, от концентрации азота зависят распределение, размеры и состав упрочненного слоя и, как следствие, эксплуатационные характеристики – твердость, износостойкость, коррозионная стойкость. Учитывая скачкообразный характер образования новых фаз (1–8), необходимо отметить эту особенность при постановке задачи управления, введя соответствующие безусловные ограничения по концентрациям азота в фазах.

Соблюдение требуемого температурного режима при азотировании обусловлено несколькими причинами.

Интенсивность диффузии азота внутрь детали определяется коэффициентами диффузии $D^i(T), i = \alpha, \gamma, \varepsilon$ в каждой фазе, а они зависят от температуры процесса T и коэффициента легирования $n_{\text{ли}}^i$ [5]:

$$D^{\alpha} = 6,6 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{18600}{RT}\right) n_{\text{ли}}^{\alpha}; \quad D^{\gamma} = 8,404 \cdot 10^{-6} \frac{C^{\gamma'}}{5,9 - C^{\gamma'}} n_{\text{ли}}^{\gamma} \exp\left(-\frac{23036}{RT}\right);$$

$$D^{\varepsilon} = 0,2277 \exp\left(-\frac{35259}{RT}\right) n_{\text{л}}^{\varepsilon}.$$

При превышении температуры относительно требуемой происходит укрупнение зерна и, как следствие, ухудшение механических свойств детали. Выбор температуры процесса азотирования для изделий из конструкционных сталей определяется требованиями к толщине и твердости слоя. Для получения высокой твердости при небольшой толщине слоя рекомендуется применять относительно низкую температуру $T = 500-520^{\circ}\text{C}$, при требовании больших толщин слоя и меньшей твердости применяется более высокая температура ($560-580^{\circ}\text{C}$). Для получения больших толщин слоя и высокой твердости применяют двухступенчатый температурный режим: 1-я ступень – $500-520^{\circ}\text{C}$ ($\sim 1/3 \dots 1/4$ от времени всего процесса), 2-я ступень – $540-560^{\circ}\text{C}$ [9].

Недопустимо отклонение от температурного режима и в ходе закалки или отпуска азотированной детали, так как существенно ухудшается качество обработки [4, 6, 7], происходит отклонение режима азотирования от расчетного, что, в свою очередь, влечет за собой отклонение результирующего распределения C от заданного C^* .

В силу вышеизложенного в пространстве состояний следует выделить недопустимые области, попадание в которые приведет к недопустимому ухудшению технико-экономических показателей процесса. Такие области образуются следующими ограничениями.

1. Ограничения по концентрации азота в фазах. Это безусловные ограничения, вызванные предельной растворимостью азота в соответствующих фазах, связанные с механизмом образования новой фазы:

$$C_i^{\min}(x, \tau) \leq C_i(x, \tau) \leq C_i^{\max}(x, \tau), \quad i = \alpha, \beta, \gamma, \quad (9)$$

где C_i – концентрация азота в i -той фазе; $C_i^{\max}$ – максимально возможная концентрация азота в i -той фазе; $C_i^{\min}$ – минимально возможная концентрация азота в i -той фазе.

2. Ограничение по температуре поверхности нагреваемого тела

$$T_{\min} \leq T(x, \tau)|_{x=l} \leq T_{\max}. \quad (10)$$

$T_{\min}$ – минимальная температура азотирования, технологически допустимая для проведения процесса.

Это ограничение необходимо соблюдать не столько для того, чтобы не оплавить поверхность, так как чаще всего температура азотирования ($500-560^{\circ}\text{C}$) значительно ниже температуры плавления, сколько в связи с тем, что повышение температуры выше допустимой повышает хрупкость за счет увеличения зоны сложных нитридов. Кроме того, температурные изменения коэффициента диффузии приводят к недопустимым изменениям размера фаз, а значит, и к изменению свойств упрочняемого слоя.

3. Ограничение по термонапряжениям. Термонапряжения в ходе интенсивного нагрева деталей ограничиваются допустимым по трещинообразованию перепадом температуры между поверхностью детали $T(1, \tau)$ и средней температу-

рой $\bar{T}(\tau) = \int_0^1 T(x, \tau) dx$ [7, 9]:

$$\left| \overline{T}(\tau) - T(1, \tau) \right| < \gamma_{\max}. \quad (11)$$

Кроме того, недопустимый уровень напряжений вызывается процессом диффузии азота в сталь с образованием многофазной структуры, если нарушается температурный режим и диффузионный регламент. Это определяется существенно различными коэффициентами линейного расширения и плотности α, γ и ε фаз [6,8].

Рассмотрим ограничения в пространстве управлений.

1. Ограничения теплового потока на поверхность детали, связанные с ограниченной мощностью нагрева:

$$q_{\min} \leq q(\tau) \leq q_{\max}. \quad (12)$$

Эти ограничения энергетического ресурса управления определяются мощностью электрических нагревателей печи в случае использования электропечи или предельными возможностями радиационных нагревателей по техническим ограничениям горелки или расходу газа в случае использования газовой радиационной печи.

2. Ограничения на предельный азотный потенциал атмосферы:

$$P_{\min} \leq P_C \leq P_{\max}. \quad (13)$$

Определяются техническими возможностями установки, например предельной степенью диссоциации ацетилена [1, 4].

Проблема автоматического, а особенно оптимального управления процессом газового азотирования к настоящему времени не может считаться решенной в полной мере. Проведенные теоретические исследования в этом направлении наметили перспективу решения данной задачи [1, 4, 6, 7]. Использование обобщенных ограничений (9–13) в задаче оптимизации азотирования позволяет ставить и решать задачи автоматического и оптимального управления этим процессом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бенгина Т.А. Оптимизация технологического процесса газового азотирования: Дис. ... канд. техн. наук. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 155 с.
2. Коган Я.Д., Булгач А.А. Моделирование на ЭВМ кинетики диффузионного насыщения при газовом азотировании // МиТОМ. – 1984. – № 1. – С. 10–19.
3. Коган Я.Д., Булгач А.А. Расчет упрочнения металлов дисперсными нитридами по механизму Мотта-Набарро и Орована // Повышение надежности и долговечности машин и инструмента методами химико-термической обработки: Сборник. – М.: МАДИ, 1981. – С. 12–21.
4. Лахтин Ю.М. Регулирование фазового состава и содержания азота в нитридном слое при азотировании стали 38Х2МЮА // МиТОМ. – 1996. – № 1. – С. 5–11.
5. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Булгач А.А. Азотирование в машиностроении // Сб. научных трудов МАДИ. – 1986. – С. 42–49.
6. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Александров В.А. Новые системы контроля процесса азотирования // МиТОМ. – 1978. – № 4. – С. 47–51.
7. Лившиц М.Ю. Теория и алгоритмы оптимального управления термодиффузионными процессами технологической теплофизики по системным критериям качества: Дис. ... д-ра техн. наук. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2001. – 425 с.
8. Хорошайлов В.Г., Гюмеханданов Е.Л. Химико-термическая обработка стали. – Л.: ЛПИ, 1980. – 78 с.
9. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Ю.А. Скаков, А.Н. Иванов, Л.Н. Расторгуев. – М.: Металлургия, 1982. – 631 с.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2016 г.

ON RESTRICTIONS IN THE PROBLEM OF OPTIMUM CONTROL PROCESS OF GAS NITRIDING

T.A. Bengina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The aspects of statement the management problems of gas nitriding process are considered. Research of the system communications providing the main purpose of this type of chemical heat treatment namely the improvement of operational characteristics of the processed products is conducted. Inadmissible areas in space of states are established. Restrictions on concentration of nitrogen in phases, on surface temperature of the heated body, on thermal stresses and on extreme values of nitric potentials of the atmosphere are formulated .

Keywords: *gas nitriding, heatmass transfer, multiphase diffusion, optimum control, objects with the distributed parameters, concentration, heating.*