

УДК 621.774

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-13-21

ОТЖИГ ХОЛОДНОКАТАННЫХ ПОЛОС В АТМОСФЕРЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

А.В. РАДИОНОВ, Н.В. ЗАКРЕВСКАЯ

(ООО «Металлопрокатная компания», Миоры)

канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО, канд. техн. наук, доц. О.П. ШТЕМПЕЛЬ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлены результаты моделирования процессов отжига нагартованных рулонов особо тонкой стальной полосы повышенного качества в защитных атмосферах водорода и азота в колпаковых печах. Приведен алгоритм расчета оптимального значения времени нагрева с учетом теплофизических свойств как обрабатываемых нагартованных рулонов особо тонкой стальной полосы, так и газов защитной атмосферы. Описана методика оптимизации режимов отжига нагартованных рулонов особо тонкой стальной полосы в колпаковой печи в среде чистого азота относительно базового режима в среде чистого водорода.

Ключевые слова: холодная прокатка, полоса, рулоны, защитная атмосфера, водород, азот.

Введение. Холодной прокаткой возможно производить тонкие и особо тонкие полосы повышенного качества из различных марок сталей и сплавов и с особыми свойствами металла^{1; 2} [1; 2]. Часть сортамента подвергается лужению и используется в пищевой промышленности, к такому металлу предъявляется дополнительный ряд требований. Процесс холодной прокатки сопровождается наклепом, поэтому металл подвергают отжигу. Чаще всего для этого используют колпаковые печи с защитной атмосферой. В качестве защитного газа применяют водород либо смесь азота и водорода. В большей мере используется водород. Технология отжига в атмосфере азота не до конца исследована, хотя и имеет ряд преимуществ.

Цель статьи – анализ технологических особенностей процесса отжига нагартованных рулонов из низкоуглеродистой стали 08пс в колпаковых печах с применением защитной атмосферы азота, выявление преимуществ и недостатков процесса, разработка алгоритма оптимизации значения времени нагрева рулонов полосовой стали в колпаковой печи с защитной атмосферой.

Основная часть. Методика проведения исследования. В работе использованы расчетно-аналитические методы на основе математического моделирования процессов нагрева металла в колпаковых печах с защитной атмосферой.

Анализ исследований. В колпаковой печи (рисунок 1) тепло к поверхности рулонов передается от муфеля (излучением) и защитного газа (конвекцией). Наружная поверхность муфеля нагревается от сгораемых газов (конвекцией) и кладки колпака (излучением).

Процесс теплообмена между газовой средой и поверхностью твердого тела, как правило, оценивают, рассматривая уравнение (закон теплоотдачи Ньютона)^{3; 4}

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где Q – общее количество тепла в единицу времени; α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности; Δt – перепад температур между газом и поверхностью.

Коэффициенты теплоотдачи определяют, пользуясь эмпирическими зависимостями (критерий Нуссельта)^{1; 2; 3} [2; 3]

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды; d – линейный размер твердого тела.

Если тело имеет один определяющий размер, то данная формула приобретает следующий вид^{1; 2; 3} [2; 3]:

$$Nu_m = C \cdot (Cr \cdot Pr)_m^n \cdot K, \quad (3)$$

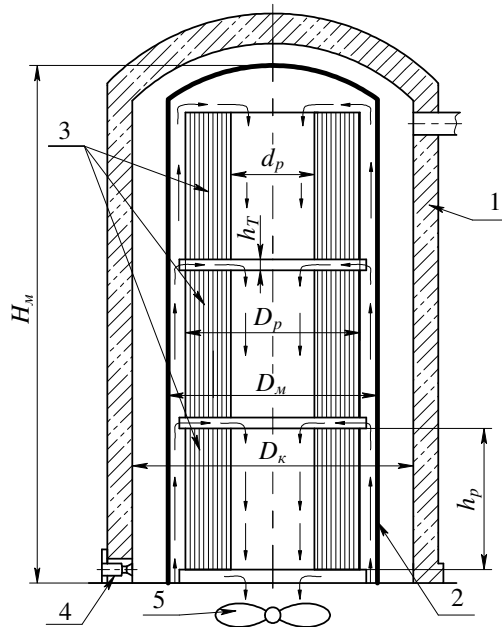
¹ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

² Уонг Х. Основные формулы и данные для по теплообмену для инженеров: справ. / пер. с англ. В.В. Яковлева и В.И. Колядина. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

³ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

⁴ Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Металлургия, 1975. – 386 с.

где $Pr = \nu/a_{cp}$ – число Прандтля; ν – кинематическая вязкость среды; a_{cp} – коэффициент температуропроводности среды; $Cr = \frac{g \cdot \beta (T_s - T_{cp}) L^3}{\nu^2}$ – число Грасгофа; g – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения среды; T_{cp} и T_s – средняя температура поверхности и температура среды соответственно; L – определяющий размер теплорассеивающей поверхности; m – индекс, указывающий, что значения физических параметров среды следует выбирать для температуры $T_m = \frac{T_s + T_{cp}}{2}$; K , C и n – коэффициенты.



1 – нагревательный колпак; 2 – муфель; 3 – роллоны; 4 – горелка; 5 – циркуляционный вентилятор;
 d_p и D_p – внешний и внутренний диаметр роллона; h_T – высота зазора между роллонами; D_k – диаметр колпака печи;
 D_m – диаметр муфеля⁵ [1–3]

Рисунок 1. – Схема колпаковой печи

При движении потока постоянной температуры вдоль плоской поверхности формула (3) может иметь вид^{5; 6; 7} [2; 3]:

$$Nu_d = C Re^n Gr_d^K, \quad (4)$$

где $Re = \frac{\omega d_s}{\nu} = \frac{\omega d_s \rho}{\mu}$ – число Рейнольдса; ω – скорость течения газа; d_s – характерный размер (эквивалентный диаметр), $d_s = \frac{4F}{U}$; U – периметр; F – площадь сечения; μ – динамическая вязкость.

Для различных условий и для различной формы нагреваемых тел выбирают определенные практикой значения коэффициентов K , C и n ^{5; 6; 7} [3].

Удельный тепловой поток к металлу в определенном сечении печи^{5; 7}

$$q = \sigma_{изл} \left[\left(\frac{T_{Г}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{П}}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где $\sigma_{изл}$ – приведенный коэффициент излучения; $T_{Г}$ и $T_{П}$ – температура газов и поверхности металла соответственно.

⁵ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

⁶ Уонг Х. Основные формулы и данные для теплообмена для инженеров: справ. / пер. с англ. В.В. Яковлева и В.И. Колядина. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

⁷ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

Тепловой поток вдоль пространства печи ($L_{печ}$) можно определить по следующей зависимости^{8; 9}:

$$q_{cp} = \frac{1}{L_{печ}} \int_0^{L_{печ}} q dL. \quad (6)$$

Коэффициент теплоотдачи в печи можно найти как^{8; 9}

$$\alpha_{т.о.} = \frac{q}{t_{Г} - t_{П}}, \quad (7)$$

где $F_{мет}$ – площадь металла.

Общее количество тепла, переданное металлу в единицу времени,

$$Q_{мет} = q_{cp} F_{мет}. \quad (8)$$

Коэффициент температуропроводности стали можно вычислить по формуле (при $C < 1,5\%$; $Mn < 0,5\%$; $Si < 0,5\%$) [3]

$$\lambda_{ст} = 1,163(60 - 8,7C - Mn - 29,0Si), \quad (9)$$

где C, Mn, Si – содержание элементов стали, %.

При этом, в зависимости от температуры, коэффициент температуропроводности принимает значения [3]: $\lambda_{ст.200} = 0,95\lambda_{ст.0}$; $\lambda_{ст.400} = 0,85\lambda_{ст.0}$; $\lambda_{ст.600} = 0,75\lambda_{ст.0}$; $\lambda_{ст.800} = 0,68\lambda_{ст.0}$; $\lambda_{ст.1000} = 0,68\lambda_{ст.0}$; $\lambda_{ст.1200} = 0,73\lambda_{ст.0}$.

Коэффициент температуропроводности вычисляется как

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho}, \quad (10)$$

где C_p – истинная теплоемкость; ρ – плотность стали.

При абсолютной прозрачности защитного газа приведенный коэффициент теплоотдачи излучением

$$C_{пр}^{нагр} = C_s \left[\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{D_m}{D_p} \left(\frac{1}{\epsilon_p} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (11)$$

где ϵ_m – степень черноты муфеля; ϵ_p – степень черноты рулона.

Приведенный коэффициент излучения для системы газ–кладка–металл (при учете непрозрачности газов) определяют по формуле^{8; 9} [3]

$$C_{пр}^{нагр} = C_s \times \frac{\epsilon_{мет} \left(1 + \frac{F_{кл}}{F_{мет}} - \epsilon_{газ} \right)}{\left[\epsilon_{мет} + \epsilon_{газ} (1 - \epsilon_{мет}) \right] \frac{1 - \epsilon_{газ}}{\epsilon_{газ}} + \frac{F_{кл}}{F_{мет}}}, \quad (12)$$

где $\epsilon_{мет}$ – степень черноты металла; $\epsilon_{газ}$ – степень черноты газа; $F_{кл}$ – площадь кладки; $F_{мет}$ – площадь металла.

Коэффициент теплоотдачи излучением от муфеля к наружной боковой поверхности рулона^{8; 9}:

$$\alpha_{б}^{изл} = C_{пр}^{нагр} \times \frac{\left(\frac{t_{Г} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{б} + 273}{100} \right)^4}{t_{Г} - t_{б}}. \quad (13)$$

Площади поверхностей, м² [3]: боковой – $F_b = \pi \times D_p \times h_p \times n_p$; торцевой – $F_t = \pi / 4 \times (D_p^2 - d_p^2) \times n_p$; внутренней – $F_v = \pi \times d_p \times h_p \times n_p$; муфеля – $F_m = \pi \times D_m \times H_m$.

Коэффициент приведения температуры газа к температуре муфеля^{8; 9}

$$\chi = \frac{k}{k+1}, \quad (14)$$

⁸ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Metallurgy, 1983. – 480 с.

⁹ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

где k – коэффициент: $k = (\alpha_6 \times (F_M + 0,8F_6)) / (\alpha_T \times F_T + \alpha_B \times F_B)$; α_6 , α_T и α_B – средние приведенные коэффициенты теплоотдачи конвекцией к боковой, торцевой и внутренней поверхностям рулона; $\bar{\alpha}_6 = \alpha_6^{\text{вн}} + \chi \times \alpha_6$; $\bar{\alpha}_T = \chi \times \alpha_T$; $\bar{\alpha}_B = \chi \times \alpha_B$.

Расчет температурного поля в рулоне включает расчет эквивалентного коэффициента теплопроводности в радиальном направлении^{10; 11}

$$\lambda_3 = \left(1 - \frac{a}{100}\right) \left(\frac{1}{1-\eta} \lambda_T + \frac{1}{\eta} \alpha S\right) + \frac{a}{100} \lambda_M, \quad (15)$$

где η – коэффициент заполнения рулона металлом (отношение объема металла в рулоне к объему самого рулона) $\eta = 0,9 \dots 0,98$; a – степень контакта, %; α – коэффициент теплоотдачи через газовые прослойки; λ_T – коэффициент теплопроводности газов прослойки; λ_M – коэффициент теплопроводности металла; S – толщина металла.

Рассчитывают эквивалентный коэффициент теплопроводности

$$a_3 = \frac{2,6\lambda_3}{c_M \cdot \eta \cdot \rho_M}, \quad (16)$$

где c_M – теплоемкость металла; ρ_M – плотность металла садки.

Числа Био^{10; 11; 12}

$$Bi_1 = \frac{\bar{\alpha}_6 \times (D_p - d_p)}{2\lambda_r}; \quad Bi_2 = \frac{\bar{\alpha}_B \times (D_p - d_p)}{2\lambda_r}. \quad (17)$$

Относительное положение экстремальной точки в рулоне¹⁰:

$$r_{extr} = R_{нар} \sqrt{\frac{0,5 Bi_1 \left(\frac{R_{нар}}{R_{вн}} + 1\right) + \frac{R_{нар}}{R_{вн}} + \frac{Bi_1}{Bi_2}}{\frac{1}{R} + \frac{Bi_1}{Bi_2} + \frac{Bi_1 \ln \frac{R_{нар}}{R_{вн}}}{\frac{R_{нар}}{R_{вн}} - 1}}}, \quad (18)$$

где $R_{нар}$ – наружный радиус рулона; $R_{вн}$ – внутренний радиус рулона.

Коэффициент формы¹⁰

$$\phi_1 = \frac{\sqrt{0,5 \left(\left(\frac{D_p}{d_p}\right)^2 - 1\right) - \ln \frac{D_p}{d_p}}}{\frac{D_p}{d_p} - 1}. \quad (19)$$

Толщина рулона в направлениях¹⁰, м,

$$S_r = \phi_1 \times \mu \times \frac{(D_p - d_p)}{2}, \quad (20)$$

$$S_z = 0,5h_p, \quad (21)$$

где $\mu = (R_{нар} - r_{extr}) / (R_{нар} - R_{вн})$.

Коэффициенты теплопроводности в направлениях^{10; 11}, м²/ч,

$$a_r = \frac{3,6\lambda_r}{c_M \times \eta \times \rho_M}; \quad a_z = \frac{3,6\lambda_r}{c_M \times \rho_M}. \quad (22)$$

¹⁰ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Metallurgy, 1983. – 480 с.

¹¹ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

¹² Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Metallurgy, 1975. – 386 с.

Числа Био и Фурье в направлениях r и z рассчитываются по следующим формулам^{13; 14}:

$$Bi_r = \frac{\bar{\alpha}_6 \times S_r}{\lambda_r} \quad Fo_r = \frac{a_r \times \tau}{S_r^2}, \tag{23}$$

$$Bi_z = \frac{\bar{\alpha}_6 \times S_z}{\lambda_z} \quad Fo_z = \frac{a_z \times \tau}{S_z^2}, \tag{24}$$

где τ – время нагрева.

Из уравнения теплопроводности в критериальной форме^{13; 14; 15} [3]

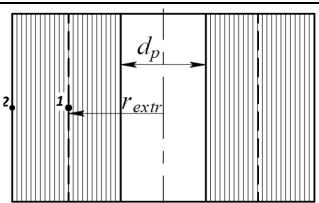
$$\theta = \frac{t_{\text{среды}} - t_{\text{точки}}}{t_{\text{среды}} - t_0} = f\left(\frac{x}{S}; Fo; Bi\right) \tag{25}$$

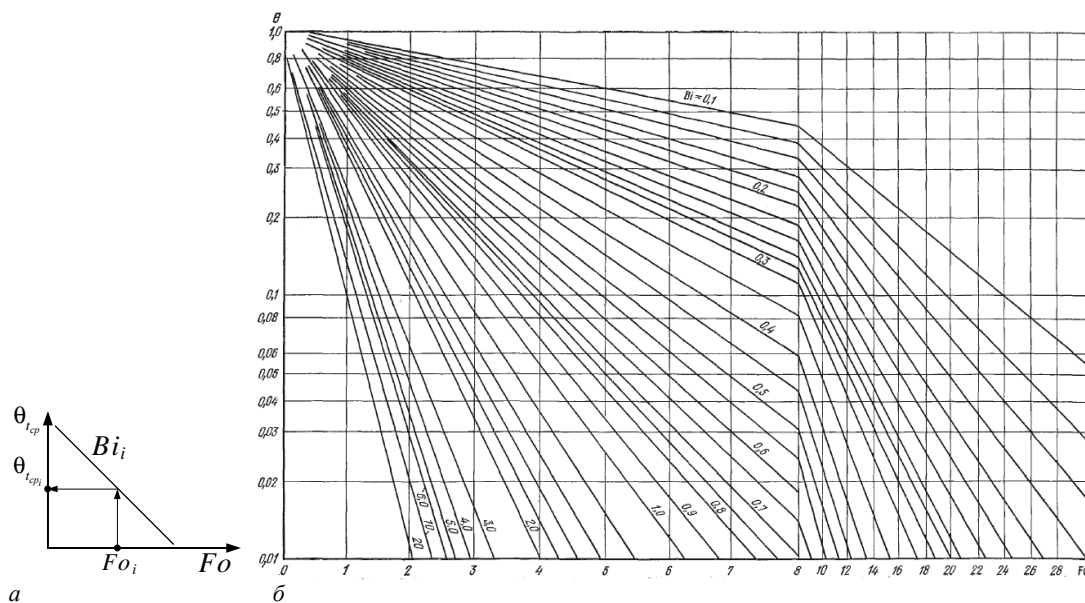
находим формулу расчета температуры рулона в нужной нам точке (таблица 1):

$$t_{\text{точки}} = t_{\text{среды}} - \theta(t_{\text{среды}} - t_0), \tag{26}$$

где S – половина толщины; x – координата сечения; t – температура точки с координатой x .

Таблица 1. – Выбор номера рисунка с номограммой определения значений температурных функций для разных точек рулона¹³

| Эскиз | θ | | $\theta_{t_{\text{cp}}}$ (номер рисунка) | Номер рисунка для определения θ для точки | |
|--|-------------------------------------|------------|---|--|---|
| | | | | 1 | 2 |
|  | $\theta = \theta_r \times \theta_z$ | θ_r | 2 | 3 | 4 |
| | | θ_z | | 3 | 3 |



а – схема определения $\theta_{t_{\text{cp}}}$ при известных значениях Fo и Bi (здесь и далее, на рисунках 3 и 4);

б – номограмма определения $\theta_{t_{\text{cp}}}$

Рисунок 2. – Номограмма определения $\theta_{t_{\text{cp}}}$

¹³ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

¹⁴ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

¹⁵ Уонг Х. Основные формулы и данные для по теплообмену для инженеров: справ. / пер. с англ. В.В. Яковлева и В.И. Колядина.– М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

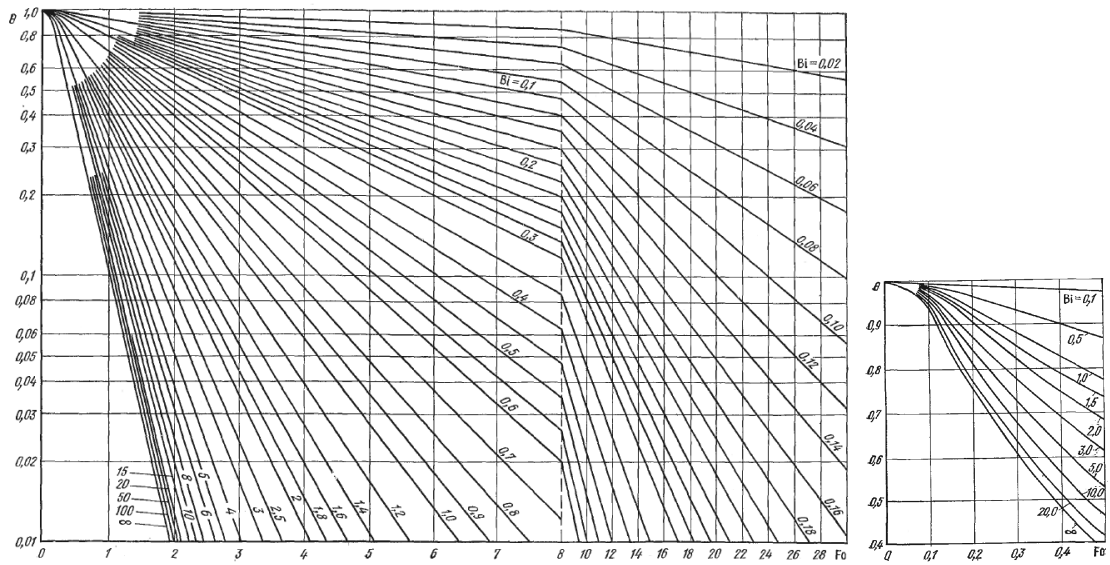


Рисунок 3. – Номограмма определения $\theta_{r,точ.1}$ и θ_Z ¹⁶

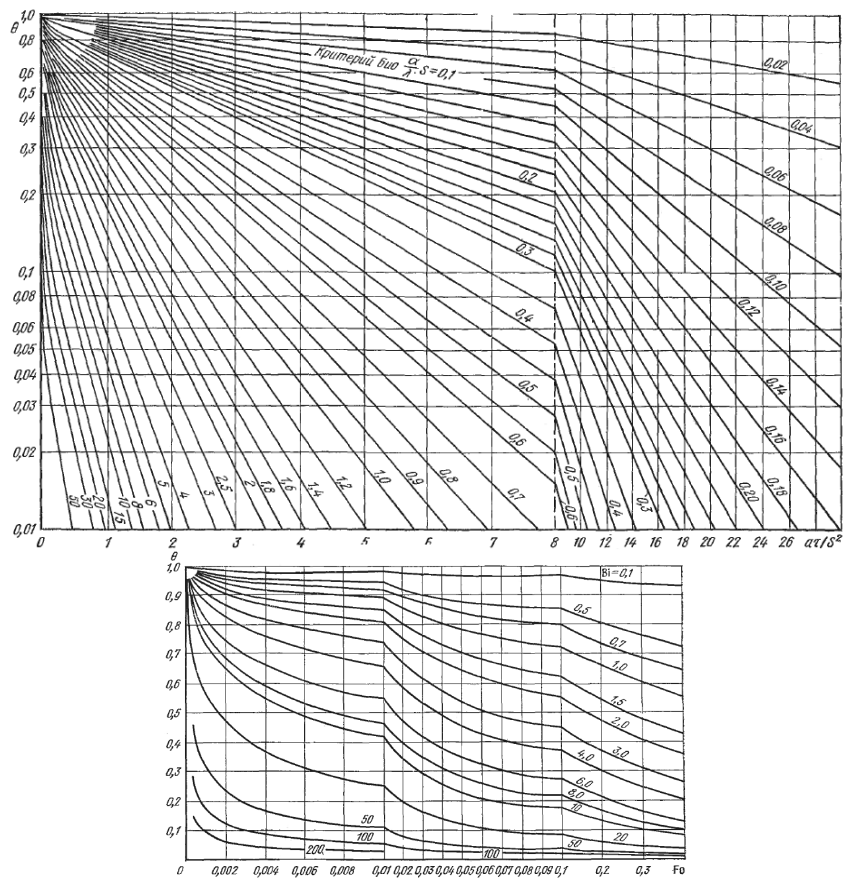


Рисунок 4. – Номограмма определения $\theta_{r,точ.2}$ ¹⁶

¹⁶ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

На рисунке 5 показана схема алгоритма расчета оптимального значения времени нагрева.

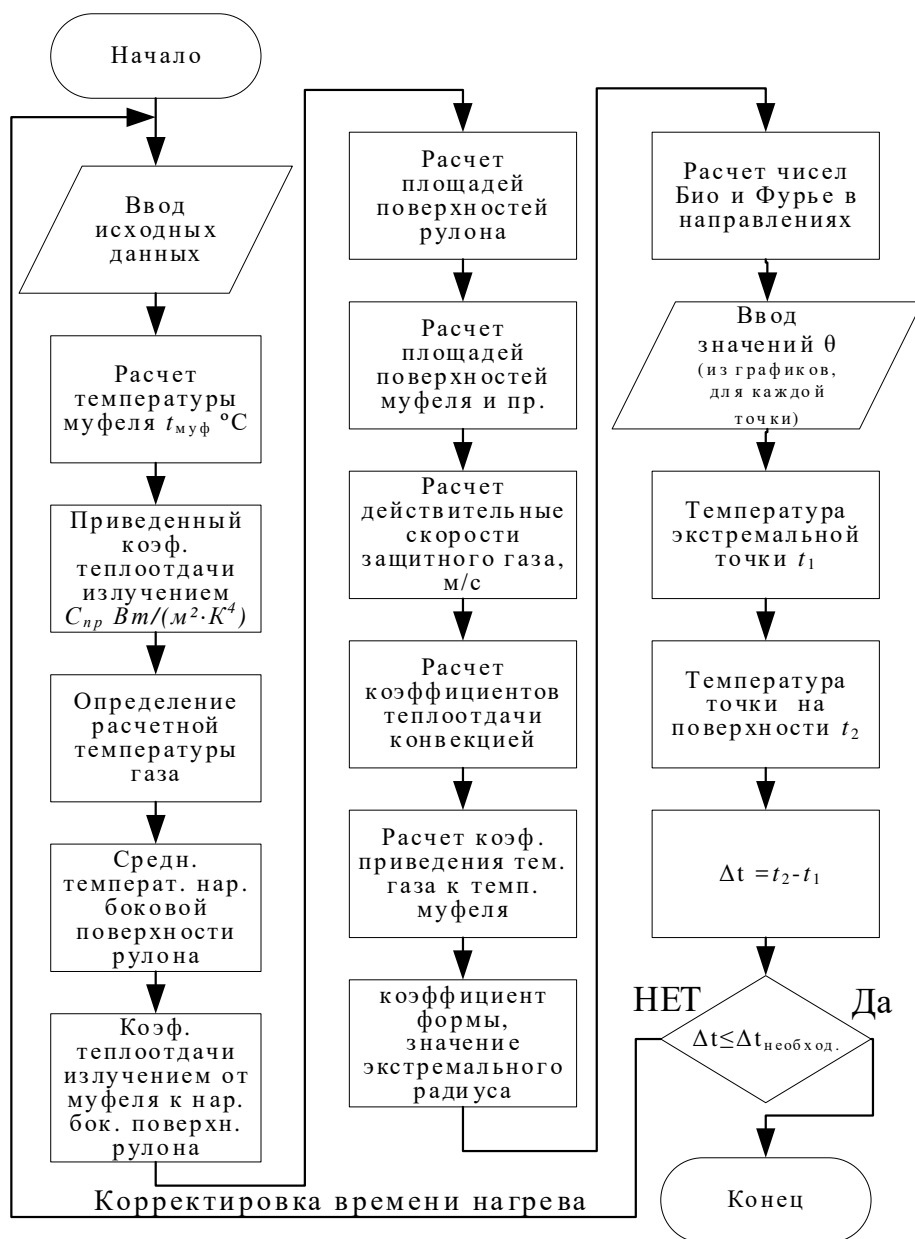


Рисунок 5. – Алгоритм оптимизации значения времени нагрева рулонов полосовой стали в колпаковой печи

Как видно из рисунка 5, в алгоритме имеется цикл, в котором оптимизируется значение времени нагрева до достижения минимального значения разницы температур между точкой 1 и точкой 2 (см. таблицу 1). Расчет усложняется тем, что значение функций θ определяется вручную по достаточно сложно интерполируемым графикам. Данный факт снижает точность расчетов.

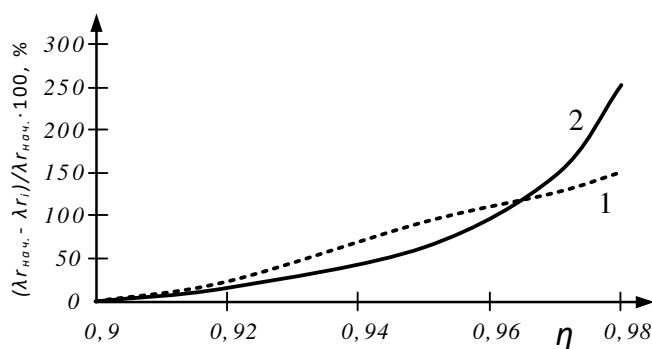
Рассматривая случай отжига в чистом азоте, следует отметить, что температура и теплопроводность азота принимают меньшие значения на всех рассматриваемых значениях температур, чем у водорода (см. таблицу 2). Данный факт говорит о сложности в достижении минимальной разницы температур по сечению рулона. Время нагрева и выдержки садки должно быть скорректировано в большую сторону. Исходя из этого, особое внимание следует уделить плотности намотки рулонов, т.к. этот параметр оказывает значительное влияние на средний коэффициент теплопроводности металла в радиальном направлении (λ_r , рисунок 6).

Согласно рисунку 6, чем выше значения плотности намотки, тем более высокие значения принимает и λ_r . Однако даже при увеличении степени коэффициента заполнения рулона металлом до максимальных значений, в случае отжига в среде азота λ_r принимает значительно меньшие значения, чем в случае применения водорода в качестве защитного газа. Из этого вытекает вопрос об увеличении времени выдержки садки (до достижения

оптимальной разницы температур между критическим сечением и точками на поверхности рулона). С увеличением времени нагрева возрастают и материальные затраты.

Таблица 2. – Физические параметры азота N_2 и водорода H_2 ($B = 1,01 \cdot 10^5$ Па)¹⁷

| T, °C | N_2 | | | | H_2 | | | |
|--|--|---|--|--|--|---|-----|--|
| | Коэффициенты | | | | | | | |
| | теплопроводности $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К) | вязкости | | температуро- проводности $a \cdot 10^6$, м ² /с | теплопроводности $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К) | вязкости | | температуро- проводности $a \cdot 10^6$, м ² /с |
| динамической $\mu \cdot 10^6$, Па·с | | кинематической $\nu \cdot 10^6$, м ² /с | динамической $\mu \cdot 10^6$, Па·с | | | кинематической $\nu \cdot 10^6$, м ² /с | | |
| 0 | 24,3 | 16,7 | 13,3 | 6,89 | 172 | 8,36 | 93 | 48,6 |
| 100 | 31,5 | 20,7 | 22,5 | 11,6 | 220 | 10,3 | 157 | 83,4 |
| 200 | 38,5 | 24,2 | 33,6 | 18,3 | 264 | 12,1 | 233 | 126 |
| 300 | 44,9 | 27,7 | 46,4 | 25,5 | 307 | 13,8 | 323 | 178 |
| 400 | 50,7 | 30,9 | 60,9 | 33,3 | 348 | 15,4 | 423 | 236 |
| 500 | 55,8 | 33,9 | 76,9 | 41,1 | 387 | 16,9 | 534 | 300 |
| 600 | 60,4 | 36,9 | 94,3 | 49,1 | 427 | 18,3 | 656 | 370 |



1 – водород; 2 – азот

Рисунок 6. – Зависимость изменения коэффициента теплопроводности рулона в радиальном направлении от коэффициента заполнения рулона металлом (200 °C)

Исходя из физических параметров азота, используя программу, написанную по алгоритму на рисунке 5, произведена корректировка времени нагрева садки рулонов полосы из стали TS 275 ($S = 0,184$ мм) для случая отжига в атмосфере чистого азота. За базовый режим отжига был принят режим отжига в среде 100% водорода в условиях ООО «Металлопрокатная компания». При расчетах определено, что в большей мере корректировке подвергается термин нагрева рулонов в интервалах более низких температур до 500 °C (время нагрева величественно). С повышением температур влияние среды азота на оптимальный термин нагрева рулонов (по сравнению с нагревом в среде водорода) становится не таким явным, и термин нагрева рулонов в этом промежутке температур практически не изменяется. Увеличение коэффициента заполнения рулона металлом позволяет уменьшить разность температур в критическом сечении и на поверхности рулона с меньшими затратами времени (и ресурсов).

Закключение. Анализ технологических особенностей процесса отжига в колпаковых печах с применением в качестве защитных газов водорода и азота показал, что применение в качестве защитного газа чистого азота сопряжено с рядом сложностей, связанных, главным образом, с тем, что температура и теплопроводность азота принимают меньшие значения во всем диапазоне температуры отжига, чем у водорода. Для их преодоления приходится идти на увеличение времени нагрева на каждом интервале температур, переходить на более плотную намотку рулонов.

Приведена методика оптимизации значения времени нагрева рулонов в колпаковой печи, согласно которой время нагрева корректируется в соответствии с разницей коэффициента теплопроводности в радиальном направлении с базовым режимом нагрева в среде чистого водорода.

¹⁷ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

В соответствии с предложенной методикой оптимизации значения времени нагрева рулонов в колпаковой печи проведена корректировка технологических параметров нагрева рулонов при замене защитного газа с водорода на азот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазур В.Л., Тимошенко В.И., Приходько И.Ю. Влияние режимов отжига в колпаковых печах на напряженно-деформированное состояние рулонов холоднокатаной стали // *Сталь*. – 2021. – № 9. – С. 22–29.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
3. Аверин С.И., Гольдфарб Э.М., Кравцов А.Ф. Расчеты нагревательных печей / под ред. Н.Ю. Тайнца. – Киев: Металлургия, 1969. – 560 с.

REFERENCES

1. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I. & Prikhod'ko, I.Yu. (2021). Vliyanie rezhimov otzhiga v kolpakovykh pechakh na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie rulonov kholodnokatanoi stali [Influence of annealing modes in bell-type furnaces on the stress-strain state of cold-rolled steel coils]. *Stal' [Steel]*, (9), 22–29. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Mikheev, M.A. & Mikheeva, I.M. (1977). *Osnovy teploperedachi*. Moscow: Energiya. (In Russ.)
3. Averin, S.I., Gol'dfarb, E.M. & Kravtsov, A.F. (1969). Pod red. N.Yu. Taints. *Raschety nagrevatel'nykh pechei*. Kiev: Metallurgiya. (In Russ.)

Поступила 18.04.2023

ANNEALING OF COLD-ROLLED STRIPS IN SHIELDING GAS ATMOSPHERE

A. RADIONOV, N. ZAKREVSAYA
(LLC “Metal Rolling Company”, Miory)
S. PILIPENKO, O. SHTEMPEL'

(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The results of modeling the processes of annealing cold-worked coils of extra-thin steel strip of high quality in protective atmospheres of hydrogen and nitrogen in bell-type furnaces are presented. An algorithm for calculating the optimal value of the heating time is given, taking into account the thermophysical properties of both processed hard-worked coils of extra-thin steel strip and protective atmosphere gases. A technique for optimizing the modes of annealing of hard-worked coils of extra-thin steel strip in a bell-type furnace in a pure nitrogen environment relative to the basic mode in a pure hydrogen environment is presented.

Keywords: cold rolling, strip, coils, protective atmosphere, hydrogen, nitrogen.