

## РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОРДОВОЙ СТАЛИ В ПЕЧАХ ПАТЕНТИРОВАНИЯ

Докт. техн. наук, проф. ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,  
канд. техн. наук ФИЛИППОВ В. В., инж. САВЕНОК А. Н.,  
канд. техн. наук КОЗЛОВ С. М.,  
канд. техн. наук, проф. ТРУСОВА И. А., инж. РАТНИКОВ П. Э.

*Белорусская государственная политехническая академия,  
Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод»*

Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод» (РУП «БМЗ») занимает одно из ведущих мест в обеспечении высокопрочной кордовой нитью как стран СНГ, так и ряда государств дальнего зарубежья. За период продаж с 1997 по 2000 г. доля белорусского металлокорда на рынки СНГ составила 65 % от общего его потребления, а экспорт в Западную Европу — 30–35 % от общего производства. Несмотря на высокую стоимость конечной продукции (более 2000 у. е./т), объем производства (свыше 180 тыс. т в 2000 г.) высокоуглеродистой катанки имеет неуклонную тенденцию к росту.

В связи с постоянно увеличивающимися запросами к качеству со стороны потребителей, необходимостью укрепления и расширения своих позиций РУП «БМЗ» совместно с Белорусской государственной политехнической академией постоянно проводится большая научно-исследовательская работа по разработке и освоению технологии производства металлокорда перспективных конструкций (кордовые стали с содержанием углерода более 0,85 %).

Процесс патентирования как составная часть производства металлокорда предполагает восстановление проволоки диаметром 2,40–3,15 мм после грубого волочения на волочильных станках 6/560 со скоростью 570 м/мин путем рекристаллизации и снятия внутренних напряжений быстрым кратковременным нагревом в нагревательной печи и дальнейшим смягчением проволоки путем охлаждения в свинцовой ванне. Целью патентирования, последующего травления и обработки солями является подготовка поверхности катанки к сухому волочению со скоростью 750 м/мин, в результате чего получается проволока диаметром 0,85–1,67 мм, подвергаемая затем аналогично отработанной схеме патентированию и латунированию со скоростью 80–40 м/мин.

Основным металлургическим агрегатом процесса патентирования является нагревательная печь, общий вид которой представлен на рис. 1, а технические характеристики — в табл. 1 [2].

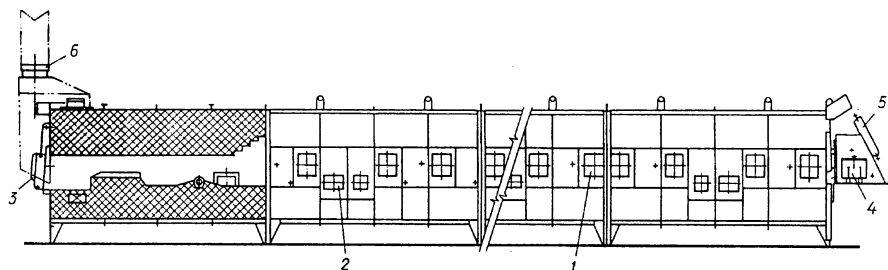


Рис. 1. Общий вид печи патентирования (аустенизации металлокорда): 1 — горелки; 2, 4 — смотровые окна; 3 — окно подачи проволоки; 5 — заслонка; 6 — котел-утилизатор

Анализ существующих методов расчета нагрева проволоки при ее патентировании показал, что в имеющейся технической литературе практически отсутствуют четкие рекомендации по вопросам моделирования и расчетов продолжительности нагрева, коэффициентов внешнего теплообмена, величин окалины и удельного расхода топлива. Это обусловлено, видимо, следующими причинами:

1) данный класс печей относится к так называемому четвертому-пятому переделам (проволочно-метизному) и с учетом исключительно малых поперечных размеров нагреваемых изделий было не целесообразно выполнять расчеты температурных перепадов, анализировать термическую массивность нагреваемых объектов, как, например, при нагреве крупных металлургических слитков и заготовок в пламенных печах;

2) конструктивная особенность печей данного типа позволяет практически управлять процессом нагрева только за счет изменения температуры печи и окислительной атмосферы (изменяя  $\alpha_v$  в технологических зонах).

Таблица 1

Технические характеристики нагревательной печи патентирования

Характеристика	Значение
Длина печи, м	26
Предварительный нагрев, м	6
Длина зоны нагрева, м	15,5
Внутренняя ширина, м	1
Количество зон, шт.	5
Количество горелок, шт.	35
Число зон регулирования	4
Максимальная температура, °С	1100
Установленная мощность, ккал	772000
Топливо	Природный газ
Температура проволоки на входе, °С	20
Температура проволоки на выходе, °С	950±20
Обрабатываемый материал	Проволока из высокоуглеродистой стали
Диаметр проволоки, мм	2,4–3,15
Количество параллельных нитей проволоки, шт.	24
Расстояние между двумя нитями, мм	32
Предусмотренная постоянная скорость, ммхм/мин	72
Максимальная скорость, м/мин	30
Минимальная скорость, м/мин	22,85
Максимальная производительность, кг/ч	1960
Минимальная производительность, кг/ч	1400

В данной работе приведена универсальная методика расчета печей патентирования РУП «БМЗ» с точки зрения научно обоснованного

управления температурным режимом печной установки при варьировании соотношения «топливо–воздух».

В общем случае при расчетах нагрева проволоки в печи патентирования следует учитывать ряд усложняющих задачу факторов:

1) нелинейность граничного условия задачи, связанную с совместным конвективно-радиационным теплообменом на поверхности изделия;

2) зависимость теплопроводности, плотности и теплоемкости стали от ее температуры;

3) процесс образования окалины на поверхности нагреваемых объектов.

В силу незначительной термической массивности проволоки, а также в соответствии с изложенным выше математическая модель процессов нагрева и окисления термически тонкого цилиндра представляет собой систему дифференциальных уравнений с сосредоточенными параметрами [3, 4]:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{2}{R\rho c} [\alpha_k (T_{\text{печ}} - T) + \sigma (T_{\text{печ}}^4 - T^4)]; \quad (1)$$

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{\chi}{T(\tau)} \exp\left(\frac{-\beta}{T(\tau)}\right), \quad (2)$$

с начальными и конечными условиями:

$$T(0) = T_0; \quad (3)$$

$$T(\tau_k) = T_k;$$

$$w(0) = 0, \quad (4)$$

где  $T(\tau)$  – температура проволоки в момент времени  $\tau$ ;  $R$  – радиус проволоки;  $\rho$ ,  $c$  – плотность и теплоемкость металла, зависящие от температуры;  $\alpha_k$ ,  $\sigma$  – коэффициенты теплообмена конвекцией и излучением соответственно;  $T_{\text{печ}}$  – температура печи;  $w$  – величина окалины;  $\chi$  – константа, характеризующая динамику роста окалины;  $\beta$  – отношение энергии активации к газовой постоянной;  $T_0$  – начальная температура проволоки;  $\tau_k$  – продолжительность нагрева;  $T_k$  – требуемая технологическая температура проволоки в конце нагрева.

Решить систему (1)–(4) в общем виде с учетом зависимости теплофизических величин от температуры нагреваемого металла возможно лишь численными методами.

Выполняя замену производной конечно-разностным отношением

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{T(\tau + \Delta\tau) - T(\tau)}{\Delta\tau},$$

имеем следующую расчетную схему:

$$T(\tau + \Delta\tau) = T(\tau) + \frac{2\Delta\tau}{R\rho c} [\alpha_k (T_{\text{печ}}(\tau) - T(\tau)) + \sigma (T_{\text{печ}}^4(\tau) - T^4(\tau))];$$

$$w(\tau + \Delta\tau) = w(\tau) + \frac{\chi}{T(\tau)} \exp\left(\frac{-\beta}{T(\tau)}\right) \Delta\tau$$

с начальными условиями (3), (4).

Зависимость теплотехнических коэффициентов (теплоемкости  $c$ , плотности  $\rho$ ) металла может определяться либо на основе эмпирических формул В. А. Маковского [5], либо в соответствии с методикой Г. Велка [6], позволяющей учитывать не только влияние температуры, но и химического состава стали.

В [2], [7] с целью оценки точности полученной математической модели был проведен анализ результатов численных расчетов и известных аналитических решений (отдельно рассмотрены случаи конвективного нагрева и нагрева излучением). Среднее отклонение приближенного решения от точного составляет около 5 %, что можно считать вполне удовлетворительным.

Параметрическая настройка математической модели (уточнение параметров теплообмена и окисления) осуществлялась на основе лабораторных и промышленных экспериментов. Методика проведения экспериментов, сравнение экспериментальных и численных результатов представлены в [7]. Анализ полученных результатов подтвердил адекватность построенной модели реальным условиям.

Производственный опыт эксплуатации действующих в условиях РУП «БМЗ» печей патентирования показал, что в зависимости от диаметра обрабатываемой проволоки время нагрева составляет порядка 45–65 с, удельный расход условного топлива – 45–65 кг у. т./т, толщина слоя печной окалины – 4,1–2,2 мкм.

Тепловой баланс печи патентирования, выполненный в соответствии с действующей методикой расчета, а также технико-экономические показатели ее работы приведены в табл. 2 и 3. Исходные данные к расчету: диаметр проволоки – 3,15 мм, скорость – 23,78 м/мин, производительность – 1908 кг/ч.

Таблица 2

Тепловой баланс нагревательной печи патентирования

Статья прихода	МДж/ч	%
1. Химическая теплота топлива	3143,97	98,88
2. Теплота экзотермических реакций	35,59	1,12
Итого	3179,56	100
Статья расхода		
1. Теплота, идущая на нагрев проволоки	1201,45	37,79
2. Потери теплоты с уходящими газами за котлом-утилизатором	418,62	13,17
3. Теплота, идущая на выработку пара в котле-утилизаторе	710,87	22,36
4. Потери теплоты через ограждающие поверхности печи и котла-утилизатора	688,79	21,03
5. Неучтенные потери теплоты	179,83	5,65
Итого	3179,56	100

Технико-экономические показатели работы нагревательной печи патентирования

Показатель	Значение
1. Среднечасовой расход топлива на печь $B_r^n$ , м <sup>3</sup> /ч	92,2
2. Удельный расход условного топлива на нагрев 1 т проволоки $b_{уд}$ , кг у. т./т	56,22
3. Удельный расход теплоты на нагрев 1 кг проволоки $q_{уд}$ , МДж/кг	1,67
4. КПД нагревательной печи $\eta$ , %	37,7
5. Коэффициент использования топлива $\eta_{и.т.}$ , %	86,83

Одним из существенных недостатков печей патентирования является значительный процент угара металла. Следует, однако, отметить, что при разработке оптимальных по критерию минимума окисления режимов нагрева проволоки имеет место весьма сложная проблема: с одной стороны, необходимо стремиться к максимально возможному снижению величины окалина, а с другой — окалина должна быть достаточно «рыхлой» и пористой для облегчения процесса ее травления.

В [8] отмечено, что оптимальным с точки зрения минимизации окалинообразования и обезуглероживания, а также рациональным по критерию топливопотребления является режим

$$T_{печ}^*(\tau) = \begin{cases} A_1, & 0 \leq \tau \leq \tau^*; \\ A_2, & 0 < \tau \leq \tau_k, \end{cases} \quad (5)$$

где  $A_1, A_2$  — некоторые константы, определяемые из технологических соображений;  $\tau^*$  — некоторый момент переключения, при котором обеспечивается нагрев металла до заданной температуры  $T_k$  за время  $\tau_k$ .

Поэтому усовершенствование режимов нагрева металла осуществлялось за счет реализации малоокислительной теплотехнологии по следующему алгоритму.

На первом этапе рассчитывался оптимальный режим работы печи на основе численного решения системы (1)–(4), где в качестве функции управления выступает температура среды  $T_{печ}^*(\tau)$ , определяемая из (5).

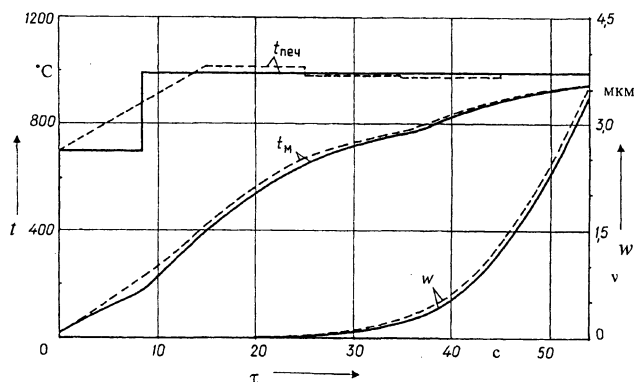


Рис. 2. Динамика температур металла  $t_M$ , печи  $t_{печ}$  и толщины слоя окалина  $w$ : — — оптимальный; - - - - базовый режимы

На рис. 2 представлены графики, соответствующие решению сформулированной задачи при следующих исходных данных:  $T_{печ}(0) = 700$  °C;  $T(\tau_k) = 950$  °C;  $\chi = 3,27 \times 10^6$ ;  $\beta = 8,85 \times 10^3$ , диаметр проволоки — 3,15 мм. Очевидно, что фактическая величина печной окалина к моменту окончания

нагрева снизилась по сравнению с исходным (базовым) вариантом на 2–3 % (с 3,5 до 3,4 мкм).

Легко видеть, что реализовать режим нагрева проволоки в соответствии с полученными теоретическими результатами не представляется возможным. Поэтому оптимальный режим нагрева металла был трансформирован практически к двухзонному (рис. 3). При этом величина окалины получается ниже базового варианта расчета на 2–2,5 % (приблизительно на 0,5 % выше, чем при оптимальном режиме нагрева).

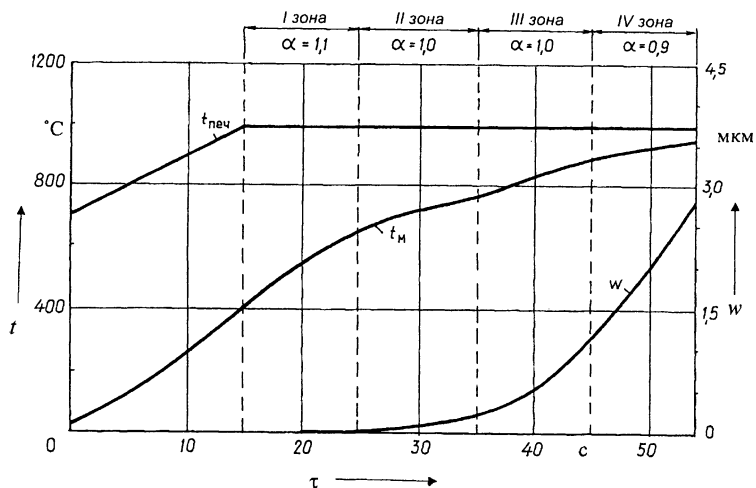


Рис. 3. Рациональный режим нагрева проволоки с учетом изменения  $\alpha_b$  по длине печи

На втором этапе применительно к трансформированному режиму реализовывался предельно возможный вариант снижения соотношения «топливо–воздух» в различных технологических зонах печи патентирования (с учетом полного дожигания продуктов горения). В результате получены следующие параметры: I зона –  $\alpha_b = 1,05–1,15$ ; II –  $1,0–1,1$ ; III –  $1,0–1,1$ ; IV –  $0,85–1,0$ . Разработанный рациональный режим нагрева проволоки с учетом изменения  $\alpha_b$  по длине печи (рис. 3) внедрен в производство.

Дальнейшее планиметрирование проб окалины с отобранных образцов показало, что толщина слоя окалины в зависимости от диаметра проволоки уменьшилась на 8–18 %.

Следует отметить, что в печах патентирования при автоматическом регулировании соотношения «топливо–воздух» и температур по зонам имеется возможность достигнуть более высоких технико-экономических показателей с точки зрения окалинообразования. Рекомендовано также понижение коэффициента избытка воздуха в III и IV зонах печи до величины  $0,7–0,8$  за счет изменения некоторых конструктивных узлов печной установки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский В. И., Филиппов В. В., Трусова И. А. Разработки Белорусской государственной политехнической академии для Белорусского металлургического завода и металлургических предприятий стран СНГ // Литье и металлургия. – 2000. – № 3. – С. 18–19.
2. Филиппов В. В. Исследование температурно-тепловых режимов нагрева металла в печах сталепроволочных цехов РУП «БМЗ» // Литье и металлургия. – 2001. – № 1. – С. 50–54.

3. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. Б. Стеблов, И. А. Павлюченков. — Мн.: Выш. шк., 1992. — 217 с.

4. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов. — М.: Машгиз, 1962. — 856 с.

5. Маковский В. А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали // Сталь. — 1972. — № 1. — С. 87–89.

6. Велк Г. Формулы для расчета теплофизических свойств стали на ЭВМ // Черные металлы. — 1971. — № 5. — С. 48–50.

7. Расчет процесса нагрева проволоки в печах патентирования / Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, В. В. Филиппов и др. // Литье и металлургия. — 2000. — № 1. — С. 51–52.

8. Решение задач управления нагревом металла на основе метода магистральной асимптотической оптимизации / В. И. Тимошпольский, С. М. Козлов, В. Б. Ковалевский и др. // Литье и металлургия. — 2000. — № 4. — С. 103–108.

Представлена НТС УНПО  
«БГПА — БМЗ»

Поступила 11.07.2001

УДК 658.264:621.643

## **ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ ПРОЧНОСТЬ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ ТРУБОПРОВОДОВ**

**Канд. техн. наук ЮХИМЕЦ П. С.**

*Институт электросварки имени Е. О. Патона НАН Украины*

**Канд. техн. наук ЯКОВЛЕВ Б. В.**

*РУП «БелНИПИэнергопром»*

**Кандидаты техн. наук ГУСЕНКОВ А. П., МОСКВИТИН Г. В.**

*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова НАН России*

В 1985–1986 гг. были построены и начали эксплуатироваться опытно-промышленные участки тепловых сетей из самокомпенсирующихся труб (СКТ) диаметром 630 мм [1]. Прокладка СК трубопроводов в Минске (400 м) и Витебске (500 м) осуществлена канальным, а в Санкт-Петербурге (400 м) — бесканальными способами. Конструкция СК трубопроводов основывается на принципе непрерывной компенсации продольных перемещений, что достигается снижением осевой жесткости труб посредством введения в их стенку винтовых гофров [2].

Металл трубопроводов тепловых сетей испытывает воздействие нестационарных нагрузок [3]. Эти нагрузки, обусловленные изменением температуры и давления рабочей среды, могут быть причиной малоциклового разрушения СК трубопровода.

Известно, что долговечность конструкции определяется уровнем и характером изменения местных напряжений во времени, а также циклическими свойствами конструкционного материала [4].

В процессе изготовления СКТ конструкционный материал подвергается холодному пластическому деформированию, степень которого изменяется в зависимости от зоны расположения конструкции. Максимальное утонение стенки и соответствующая ему вытяжка металла при