

Ю.И.Усенко⁽¹⁾, В.И.Иванов, Ю.Н.Радченко⁽¹⁾,
В.Ф.Сапов⁽¹⁾, С.Е.Чижов

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ ПРОТЯЖНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ МЕТИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

⁽¹⁾Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск,
Запорожская государственная инженерная академия

Подано результати досліджень нагрівання під термічну обробку сталевго дроту в протяжних муфельних електропечах непрямого нагрівання перед гарячим цинкуванням. Запропоновано заходи щодо раціонального перерозподілу теплової потужності печей за довжиною робочого простору, а також зниження до мінімуму втрат теплоти через склепіння та бокові стіни. Виконано оцінку впливу скорегованого режиму нагрівання під термічну обробку на якісні показники сталевго дроту.

Представлены результаты исследований нагрева под термическую обработку стальной проволоки в протяжных муфельных электропечах косвенного нагрева перед горячим оцинкованием. Предложены мероприятия, предусматривающие перераспределение тепловой мощности печей по длине рабочего пространства, а также снижение до минимума потерь теплоты через свод и боковые стены. Выполнена оценка влияния скорректированного режима нагрева под термическую обработку на качественные показатели стальной проволоки.

Введение. В условиях ряда метизных предприятий Украины стальную проволоку перед горячим оцинкованием подвергают нагреву под термическую обработку в протяжных горизонтальных электропечах косвенного нагрева путем транспортировки каждой нити через отдельный муфель. Печи оснащены ленточными нагревателями сопротивления, объединенными в четыре зоны регулирования температуры, а также муфелями цилиндрической формы, расположенными над нагревателями.

Как показывает практика эксплуатации печей данного типа, при их тепловой работе имеет место значительный расход электроэнергии и достаточно большие потери теплоты излучением через футеровку свода и боковых стен во второй и третьей зонах рабочего пространства.

Постановка задачи. В этой связи целью данных исследований является поиск рациональных конструктивных решений, направленных на повышение теплоизоляционной способности футеровки протяжных электропечей метизного производства, а также совершенствование существующего режима нагрева стальной проволоки под термическую обработку.

Основная часть исследований. На первом этапе исследований, связанном с повышением надежности футеровки свода и боковых стен второй и третьей зон рабочего пространства протяжной электропечи, осуществляли вычислительный эксперимент с использованием ПЭВМ. При его проведении оценивали величину потерь теплоты через футеровку на указанных участках электропечи, уровень температуры на стыках ее отдельных слоев в зависимости от температуры в рабочем пространстве, толщины огнеупорного и теплоизоляционного слоев футеровки с учетом теплофизических характеристик данных материалов [1,2], а также экономическую эффективность и срок окупаемости для каждого варианта.

Таблица 1 – Техничко-экономические показатели размещения дополнительных слоёв теплоизоляционного материала на своде и боковых стенах протяжной печи

Показатели	Варианты								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Толщина слоя прошивных матов:									
- на своде печи, м	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	0,20
- на боковых стенах печи, м	0,05	0,10	0,15	0,10	0,15	0,10	0,15	0,20	0,20
Снижение величины тепловых потерь ^{*)} , %	29	36	38	54	62	69	82	76	72
Снижение расхода электроэнергии, кВт·ч/год · 10 ³	17,8	20,2	21,6	25,5	27,0	28,4	29,9	29,3	28,8
Экономический эффект, тыс. грн./год	5,8	6,6	7,0	8,3	8,8	9,2	9,5	9,3	9,0
Срок окупаемости, ч	190	251	312	265	313	297	340	344	350

Примечание: величина тепловых потерь при существующей футеровке свода и боковых стен второй и третьей зон печи - 100%

Рассматривали девять вариантов размещения дополнительных слоев теплоизоляционных волокнистых материалов в виде прошивных матов (толщиной 0,05; 0,10; 0,15 и 0,20 м) соответственно на своде и боковых стенах данной электропечи.

Результаты вычислительного эксперимента (табл.1) показали, что рациональным вариантом следует признать размещение дополнительных слоев огнеупорных материалов толщиной 0,15 м как на своде, так и боковых стенах печей данного типа, так как при его реализации достигается как минимальная величина потерь теплоты, так и максимальное значение годового экономического эффекта.

Далее осуществляли математическое моделирование процесса нагрева стальной проволоки под термическую обработку в исследуемых электропечах. Для этого использовали алгоритм аналитического поиска рационального режима термической обработки проволоки, обеспечивающего получение конечного продукта с аналогичными показателями качества при более низком удельном расходе электроэнергии. В основу алгоритма положено уравнение нагрева термически тонкого тела при лучистом теплообмене на внешней поверхности, представленное в конвективной форме с коэффициентами теплоотдачи, которые зависят от температуры рабочего пространства печи и поверхности нагреваемого металла. Данный алгоритм реализует известный принцип экономичного управления протяжными электропечами [3,4], который предусматривает интенсификацию нагрева металла в зонах, последних по ходу его транспортировки, для обеспечения минимальных энергетических затрат на его проведение.

Адаптацию предложенного алгоритма к условиям работы протяжной электропечи данного типа выполняли по результатам ранее проведенных экспериментальных исследований при нагреве под термообработку стальной проволоки по существующему режиму и скорости ее транспортировки 18,9...27,2 м/мин [5]. В качестве критерия идентификации принимали величину максимального отклонения расчетных и экспериментальных значений температуры проволоки в зонах печи, величина которого не должна превышать 10 °С или 1,25% измеряемой величины для режима, предусмотренного технологической инструкцией.

Определяли степень сходимости значений температуры для расчетного и экспериментального режимов нагрева стальной проволоки под термическую обработку для различных зон протяжной электропечи при изменении скорости ее транспортировки от 18,9 до 27,2 м/мин. Установлено, что величина максимального отклонения температуры для различных скоростей транспортировки проволоки не превышает заданного значения (см. табл.2), то есть имеет место адекватность предложенной модели реальному процессу нагрева стальной проволоки под термическую обработку в электропечах данного типа.

Таблица 2 – Величина относительной погрешности (ΔT_{max}) адаптации модели

Скорость транспортировки проволоки, м/мин	ΔT_{max} , % по зонам			
	I	II	III	IV
18,9	1,17	1,06	1,02	0,78
22,0	1,24	1,17	1,04	0,97
24,7	1,35	1,25	1,06	1,02
27,2	1,43	1,28	1,08	1,04

При выполнении последующей корректировки существующего температурного режима нагрева стальной проволоки под термическую обработку в протяжных электропечах соблюдали выполнение следующих требований:

- понижение удельного расхода электроэнергии до минимально возможной

величины при сохранении неизменного уровня качественных показателей металла;

- завершение периода нагрева стальной проволоки в конце третьей зоны печи при температуре 810 ± 5 °С для предотвращения ее резкого охлаждения;
- ограничение значения температуры в рабочем пространстве протяжной печи величиной 900 °С для предотвращения как преждевременного выхода из строя нагревателей сопротивления, так и снижения стойкости футеровки ее свода и боковых стен.

Согласно используемому алгоритму, расчеты распределения температуры по длине протяжной электропечи начинали от последней (четвертой) зоны по ходу движения проволоки. При этом, исходя из принципа экономичного управления, полагали, что температура в четвертой зоне печи поддерживается на максимально допустимом уровне ($T_{печ,IV} = 900$ °С = const).

В процессе корректировки существующего температурного режима отжига проволоки с целью улучшения технико-экономических показателей работы протяжной электропечи данного типа (снижения удельного расхода электроэнергии и потерь теплоты через футеровку свода и боковых стен) осуществляли перераспределение тепловой мощности по длине ее рабочего пространства.

Так, задавая конечное значение температуры металла $T_{м,1}$ для первой зоны печи, методом последовательных приближений вычисляли уровень температуры в печи $T_{печ,1}$ для данной зоны. При выполнении условия $(T_{i,1} - T_i^\delta) \leq 1$ °С и $T_{печ} \leq 900$ °С расчеты уровня температуры для первой зоны печи завершали и переходили к определению температурного уровня для второй зоны со своей конечной температурой нагрева металла и завершали комплекс расчетов определением уровня температуры для третьей зоны печи.

В случае, когда $(T_{i,1} - T_i^\delta) > 1$ °С осуществляли корректировку уровня температуры печи для первой зоны и последующие расчеты до достижения заданной величины отклонения. В случае, когда $T_{печ} > 900$ °С осуществляли понижение конечной температуры металла для первой зоны печи и одновременное повышение величины начальной температуры металла до достижения требуемого значения $T_{печ}$.

Результаты исследований по корректировке существующего режима нагрева проволоки диаметром 2,0 мм под термообработку при скорости ее транспортировки 18,9 м/мин приведены в табл.3.

Таблица 3 – Характеристика предложенного (числитель) и существующего (знаменатель) режимов нагрева проволоки диаметром 2,0-3,0 мм под термическую обработку

Показатели	Зона			
	I	II	III	IV
Температура печи, °С	$\frac{761}{850}$	$\frac{895}{850}$	$\frac{899}{840}$	$\frac{-}{830}$
Температура проволоки, °С				
- начальная	$\frac{20}{20}$	$\frac{325}{440}$	$\frac{625}{683}$	$\frac{-}{782}$
- конечная	$\frac{325}{440}$	$\frac{625}{683}$	$\frac{813}{782}$	$\frac{-}{782}$

На втором этапе исследований осуществляли экспериментальную проверку предлагаемого режима нагрева стальной проволоки под термическую обработку. В процессе испытаний зафиксировали существенное повышение уровня тепловой нагрузки во второй и третьей зонах протяжной электропечи, что нежелательно из-за возможности

выхода из строя нагревателей сопротивления ее соответствующих зон.

В связи с этим выполняли дальнейшую корректировку предлагаемого режима нагрева проволоки под термическую обработку по длине рабочего объема печи в направлении повышения до 800 °С температурного уровня в первой зоне и снижения его до 880 °С – во второй и третьей зонах.

Последующими промышленными испытаниями зафиксирована возможность реализации скорректированного режима нагрева стальной проволоки под термическую обработку в типовом технологическом процессе.

В задачу исследований входила также оценка влияния предложенного режима нагрева под термическую обработку на качество конечного продукта. Бунты проволоки из металла одинаковых плавок разделяли на две партии. Одну партию термически обрабатывали в протяжной печи по температурному режиму, предусмотренному технологической инструкцией, а другую – по скорректированному режиму. Как показали результаты сравнительного анализа качественных показателей готовой продукции, при скорректированном режиме нагрева проволоки под термическую обработку в протяжных печах данного типа, зафиксировано повышение однородности ее физико-механических свойств. Так, если после нагрева под термическую обработку по существующему режиму величина среднеквадратичного отклонения относительного удлинения (δ) готовой оцинкованной проволоки диаметром 2,0...3,0 мм достигает 2,5...2,8%, то после нагрева под термическую обработку по скорректированному режиму не превышает 1,5...1,9%, а разброс значений данного показателя по длине проволоки составляет соответственно 21,9...22,4 и 14,5...16,1%. Величина среднеквадратичного отклонения значений временного сопротивления на разрыв (σ_B) после нагрева под термической обработке по существующему режиму составляет 3,2...4,0 Н/мм², а после нагрева по под термическую обработку по предложенному режиму не превышает 1,8...2,2 Н/мм², разброс значений данного показателя по длине проволоки составляет соответственно 38,6...42,2 и 17,4...20,2 Н/мм². Повышение величины параметра δ после термической обработки по предложенному режиму на 8,0%, а параметра σ_B – на 6,5% позволяет увеличить скорость транспортировки проволоки в протяжных электропечах данного типа с 18,9 до 22,6 м/мин, а, следовательно, и повысить производительность данных агрегатов.

Экономическую эффективность предложенного режима нагрева стальной проволоки под термическую обработку определяли путем сопоставления значений расхода электроэнергии на электропечи в производственных условиях при существующем и скорректированном режимах.

Величину снижения расхода электроэнергии (ΔG) на протяжной электропечи после реализации скорректированного режима нагрева под термическую обработку проволоки, оценивали с использованием выражения:

$$\Delta G = 1,732 U \cdot \sum_{i=I_1}^n \sum_{j=\tau_1}^m (I_{2,i} \cdot \tau_{2,j} - I_{1,i} \cdot \tau_{1,j}),$$

где U - величина напряжения, подводимого к электропечи, В; $I_{1,i}$, $I_{2,i}$ - значение силы тока при реализации на электропечи существующего и скорректированного режимов нагрева под термическую обработку соответственно в течение суток, А; $\tau_{1,j}$, $\tau_{2,j}$ - продолжительность действия i -го значения силы тока при реализации на электропечи существующего и скорректированного режимов нагрева под термическую обработку соответственно в течение суток, ч.

Как показали результаты расчетов, значение показателя ΔG после реализации

скорректированного режима нагрева под термическую обработку соответствует снижению расхода электроэнергии в электропечах данного типа на 20%.

Рекомендации. Дальнейшее улучшение тепловой работы протяжных электропечей метизного производства необходимо проводить в направлении как интенсификации процесса нагрева при увеличении скорости транспортировки проволоки, так и внедрения секционного метода сборки электропечи данного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А.* Теплофизические свойства огнеупоров. - М.: Metallurgy, 1982. - 152 с.
2. *Факторович Л.М.* Краткий справочник тепловой изоляции. - М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. - 450 с.
3. *Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.И.* Управление нагревом металла. - М.: Metallurgy, 1981. - 27 с.
4. *Панферов В.И., Безвуляк А.С., Кулаченков Г.П.* Управление нагревом металла в протяжных печах и агрегатах // Сталь. - 1991. - № 3. - С.57-59.
5. *Каз И.Г., Полешко Ю.П., Усенко Ю.И. и др.* Совершенствование тепловой работы горизонтальных протяжных электропечей // Черная металлургия. - 1997. - Вып. 11-12 (1183-1184). - С.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2008 р.

Рецензент, проф. М.П.Ревун