

УДК 621.783.245

Усенко Ю.И., Иванов В.И., Скачков В.А., Болюк С.В.

ПУТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ОДНОСТОПНЫХ КОЛПАКОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Практика эксплуатации колпаковых электропечей для отжига стальной проволоки в бунтах свидетельствует о наличии существенной неравномерности распределения температуры как по высоте загрузки в целом, так и в радиальном направлении отдельных бунтов, что обусловлено несовершенством организации процессов внешнего теплообмена в их рабочем объеме.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на ряде металлургических заводов стран СНГ [1, 2], позволили установить, что на качество нагрева бунтов стальной проволоки в печах данного типа значительное влияние оказывает размещение источников и стоков тепловой энергии.

Одноstopные двузонные колпаковые электропечи типа СГЗ сталепроволочного цеха ОАО «Запорожский сталепрокатный завод» имеют установленную мощность 180 кВт, равномерно распределенную по высоте нагревательного колпака. В печах подвергают рекристаллизационному отжигу (нагрев при командной температуре 750 °С в течение 17,0 ч последующее охлаждение под отключенным колпаком до температуры 150 °С) загрузки из трех плотно намотанных бунтов проволоки марки БСтОМ с наружным диаметром 800–900 мм, внутренним диаметром 300–400 мм и высотой 400–500 мм.

При отжиге по данной технологии нагрев проволоки характеризуется наличием значительного и различного по высоте загрузки (в верхнем – 25, среднем – 40 и нижнем 75 °С) перепада температуры на наружной боковой поверхности бунтов в конце периода нагрева, что свидетельствует о нерациональности использования установленной мощности нагревательного колпака. При этом значительная часть нижнего бунта не нагревается до заданного температурного уровня (рисунок, кривые 1 и 2).

Одним из путей сокращения непроизводительных потерь теплоты в электропечах типа СГЗ является рациональное размещение установленной мощности в электрических зонах нагревательного колпака, по отношению к загрузке бунтов проволоки.

Для достижения подъема температуры на наружной боковой поверхности бунтов проволоки с минимальной по высоте загрузки неравномерностью проводили комплекс экспериментов, направленных на улучшение условий подвода теплоты к поверхности нижнего бунта в данной колпаковой электропечи, с использованием ее электро-тепловой модели [3].

Результаты исследования на модели зафиксировали следующее:

– равномерный нагрев наружной боковой поверхности металла по высоте загрузки бунтов достигается при перераспределении установленной мощности нагревательного колпака электропечи в сторону увеличения до 93 кВт в его первой (нижней) зоне и уменьшения до 75 кВт во второй (верхней) зоне;

– рациональное размещение мощности нагревательных элементов по высоте первой зоны колпака описывается выражением:

$$P_i = [1 - 0,87\delta_i + 0,42\delta_i^2] \cdot P_1 \cdot 10^{-2}, \quad (1)$$

где P_i – мощность i -того нагревательного элемента первой зоны, кВт; δ_i – относительная высота размещения i -того нагревательного элемента, $\delta_i = h_i/H_1$; h_i – расстояние от продольной оси i -того нагревательного элемента до основания колпака м; H_1 , P_1 – высота, м, и мощность, кВт, первой зоны колпака.

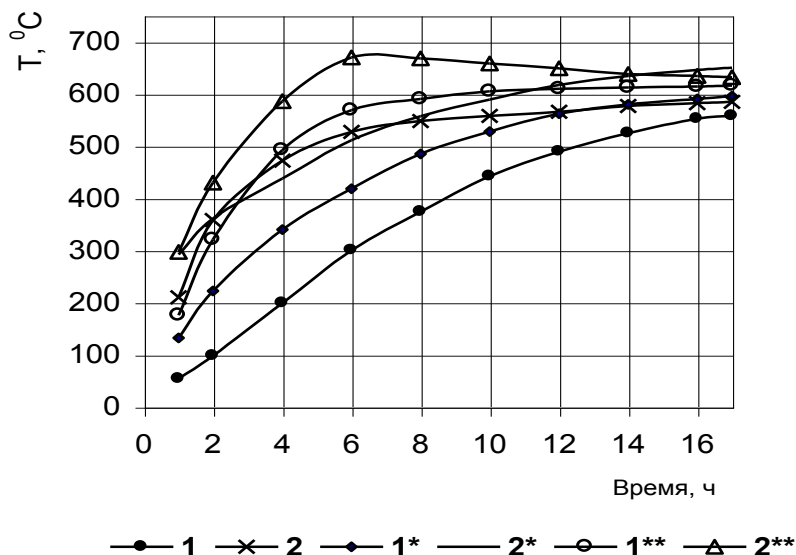


Рисунок 1 – Динамика изменения температуры в наружном (1, 1*, 1**) и внутреннем (2, 2*, 2**) витках проволоки марки БСтОМ нижнего бунта стопы
 1, 2 – при отжиге по существующей технологии в печи с равномерным распределением мощности;
 1*, 2* – при отжиге по существующей технологии в печи с предложенным распределением мощности;
 1**, 2** – при отжиге по разработанной технологии в печи с предложенным распределением мощности

– перераспределение мощности между нагревательными элементами второй зоны колпака не оказывает заметного влияния на характер подъема температуры металла в загрузке, а условия их размещения существенно усложняются.

Промышленные испытания модернизированной электропечи типа СГЗ на ОАО «Запорожский сталепрокатный завод» показали, что увеличение сосредоточения мощности нагревательного колпака в его нижней зоне позволило значительно улучшить равномерность нагрева проволоки по высоте загрузки бунтов, а также повысить темп нагрева нижнего бунта (рисунок 1 – кривые 1* и 2*). Однако наличие значительного перепада температуры по сечению загрузки, величина которого в конце периода нагрева достигает 60–70 °С, ограничивает скорость подъема температуры внутренних витков бунтов.

В связи с этим определяли температурно-временные параметры отжига исследуемой проволоки, при реализации которых обеспечиваются как минимальная величина перепада температуры по сечению бунтов, так и низкие энергозатраты на его проведение.

При математическом моделировании исследуемого процесса распределение температуры по толщине намотки бунтов $T(r, \tau)$ описывали одномерным дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности с нелинейными коэффициентами в цилиндрических координатах:

$$c(T) \cdot \rho(T) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \lambda(T) \cdot \left[\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right]; \quad (2)$$

с нелинейными условиями однозначности

$$T(r, 0) = T_{п,0} - \frac{\Delta T_0 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R_2^2} + 2\omega^2 \cdot \ln \frac{r}{R_2} \right)}{1 - \omega^2 + 2\omega^2 \cdot \ln \omega}; \quad (3)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha_{изл}^{н-м} \cdot (T_H - T_M) + \alpha_{изл}^{\phi-м} \cdot (T_K - T_M); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(R_1, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (5)$$

где $c(T)$, $\rho(T)$ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность металла, кг/м³; r , τ – пространственная и временная координаты, м, с; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К); T_H , T_K , T_M – температура нагревательных элементов, футеровки нагревательного колпака и металла, К; $T_{п,0}$ – температура наружной поверхности бунта, К; ΔT_0 – разность температур по сечению бунта в начальный момент нагрева; $\Delta T_0 = T(R_2, 0) - T(R_1, 0)$; R_1 , R_2 – внутренний и наружный радиусы бунта, м; $T(R_2, 0)$, $T(R_1, 0)$ – температура наружной и внутренней поверхности бунта в начальный момент нагрева, К; $\omega = R_1/R_2$; $\alpha_{изл}^{н-м}$, $\alpha_{изл}^{\phi-м}$ – коэффициенты теплоотдачи излучением в системах «нагреватели-металл», «кладка-металл», Вт/(м²·К).

Численную реализацию математической модели (2)–(5) осуществляли локально-одномерным методом на ПЭВМ с применением неявной разностной схемы на равномерной сетке [4]. В расчетах учитывали зависимость теплофизических свойств стали от температуры [5]. При моделировании задавали среднемассовую температуру проволоки в начале и конце процесса отжига, изменяли командную температуру в зонах нагревательного колпака, а также продолжительность периодов нагрева и выдержки под отключенным колпаком на отдельных стадиях отжига. При этом оценивали как значение перепада температуры по сечению бунтов, так и величину удельных затрат тепловой энергии на проведение данного процесса.

Как показали результаты исследований на модели, вышеуказанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяет режим, который предусматривает нагрев металла (в первой зоне при командной температуре 850 °С, во второй зоне при температуре 820 °С) в течение 10,2 ч и выдержку под отключенным колпаком в течение 3,3 ч.

Испытания разработанного режима отжига проводили на одной из электропечей типа СГЗ сталепроволочного цеха, оборудованной нагревательным колпаком с рациональным размещением мощности. Полученные результаты зафиксировали существенный рост темпа нагрева различных слоев среднего и нижнего бунтов загрузки (рисунок, кривые 1** и 2**). Максимальный перепад температуры между сходственными точками верхнего и нижнего бунтов в конце периода нагрева снизился до 5–10 °С для наружных витков, 15–20 °С – для срединных витков и 20–25 °С – для внутренних вит-

ков соответственно, а величина температурного перепада между поверхностью наружных витков верхнего бунта и поверхностью внутренних витков нижнего бунта в конце периода нагрева не превышала 35–40 °С. Все участки бунтов исследуемой проволоки достаточное время находились в интервале отжигаемости. Повышение командной температуры в зонах печи позволило на 3,5 ч сократить продолжительность периода нагрева проволоки по сравнению с величиной, предусмотренной технологической инструкцией, при этом общая длительность процесса отжига не превышала 13,5 ч.

Оценку энергетической эффективности применения разработанных мероприятий выполняли путем составления балансов тепловой работы колпаковой электропечи до и после ее модернизации (табл. 1).

Таблица 1 – Тепловой баланс колпаковой электропечи типа СГЗ до (вариант I) и после (вариант II) реализации предложенных мероприятий

Наименование статей	I	II
Приход теплоты, МДж (%):		
– теплота, вносимая нагревательными элементами колпака	2814,5 (100,0)	2642,0 (100,0)
Расход теплоты, МДж (%):		
– нагрев бунтов проволоки	1108,9 (39,4)	1136,1 (43,0)
– нагрев муфеля и защитного газа	253,4 (9,0)	251,0 (9,5)
– аккумуляция футеровкой печи	492,5 (17,5)	517,8 (19,6)
– потери теплоты через футеровку печи и при коротких тепловых замыканиях	959,7 (34,1)	737,1 (27,9)
Итого	2814,5 (100,0)	2642,0 (100,0)

Анализ расходных статей теплового баланса при отжиге проволоки по разработанному режиму в колпаковой электропечи типа СГЗ после ее модернизации позволил установить:

- рост полезно используемой тепловой энергии, что соответствует повышению производительности печи;
- повышение (на 3,6 %) термического коэффициента полезного действия печи, что свидетельствует о возрастании ее тепловой экономичности;
- существенное снижение (на 6,2 %) потерь теплоты через футеровку печи и при коротких тепловых замыканиях.

Технико-экономические показатели тепловой работы колпаковой электропечи до и после реализации мероприятий по рациональному использованию тепловой энергии нагревательных элементов представлены в табл. 2. Видны очевидные преимущества реализации разработанных мероприятий с точки зрения энергопотребления: снижение на 12,7 % удельного расхода электроэнергии на нагрев металла, а также сокращение на 21,4 % длительности процесса отжига.

Сопоставление качественных показателей металла показывает, что после отжига в колпаковой электропечи по предложенному режиму проволока характеризуется более высокими и стабильными значениями пластических характеристик по сравнению с проволокой, подвергнутой отжигу по принятой технологии. Механические свойства отожженной проволоки также удовлетворяют требованиям стандарта.

По результатам проведенных исследований разработаны дополнения, которые были внесены в технологическую инструкцию по отжигу стальной проволоки марки БСтОМ.

Таблица 2 – Техничко-экономические показатели колпаковой электропечи типа СГЗ до (I) и после (II) реализации предложенных мероприятий

Характеристика печи	I	II
Мощность нагревательного колпака, кВт:	180	168
– первая зона	90	93
– вторая зона	90	75
Показатели работы печи:		
– продолжительность нагрева, ч	17,0	13,5
– производительность печи, т/ч	0,176	0,231
– коэффициент полезного действия, %	39,4	43,0
– удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг	0,292	0,249

Дальнейшее совершенствование использования энергии в электропечах данного типа следует осуществлять как в направлении рационального размещения источников тепловой энергии на стенде и во внутренней полости загрузки бунтов стального проката, так и повышения степени использования объема ее рабочего пространства, а также реализации предварительного подогрева загрузки бунтов и утилизации теплоты охлаждаемой проволоки.

Литература

1. Тандура И.П., Иванов В.И., Баздырев В.С. и др. Повышение эффективности тепловой работы одностопных колпаковых электропечей // *Металлургическая и горно-рудная промышленность*. – 1985. – № 1 (135). – С. 33–34.
2. Усенко Ю.И., Михеев Ю.В., Иванов В.И. и др. Совершенствование процесса нагрева бунтов стальной проволоки в одностопных колпаковых электропечах // *Черная металлургия*. – 1992. – Вып. 7 (1119). – С. 30–32.
3. Усенко Ю.И., Горшков Ю.Ф., Иванов В.И. Электротепловое моделирование внешнего теплообмена в колпаковой электропечи // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1992. – № 4. – С. 81–82.
4. Марчук Г.И., Шайдуров В.В. Повышение точности решения разностных схем. – М.: Наука, 1979. – 200 с.
5. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник / Под ред. Б.Е.Неймарка. – М.:–Л.: Энергия, 1967. – 239 с.

УДК 621.783.245

Усенко Ю.И., Иванов В.И., Скачков В.О., Болюк С.В.

ШЛЯХИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ОДНОСТОПНИХ КОВПАКОВИХ ЕЛЕКТРОПЕЧАХ

Розроблено заходи щодо раціонального використання теплової енергії в ковпачкових електропечах опору типу СГЗ під час відпалювання бунтів сталевих дроту. Впровадження раціонального перерозподілу потужності за висотою нагрівального ковпака та енергозберігаючого режиму відпалювання даного дроту дозволило суттєво знизити енергетичні витрати на проведення процесу, підвищити продуктивність печей і стабілізувати якісні показники дроту, що оброблено.