

А. В. Дорошенко, Б. П. Дядьков
С. Н. Тимошенко /к. т. н./
П. И. Тищенко /к. т. н./

ПАО «Сумское НПО», г. Сумы, Украина
ДонНТУ, г. Покровск, Украина
ЧП «Фирма РОУД», г. Киев, Украина
e-mail: tkm @frunze.com.ua

Комбинированный водоохлаждаемый свод дуговых электропечей малой вместимости

A. V. Doroshenko, B. P. Dyad'kov

S. N. Timoshenko /Cand. Sci. (Tech.)/
P. I. Tischenko /Cand. Sci. (Tech.)/

PJSC «Sumy Scientific-Production Association»,
Sumy, Ukraine
DonNTU, Pokrovsk, Ukraine
PE «Company ROUD», Kyiv, Ukraine
e-mail: tkm @frunze.com.ua

Combined water-cooled roof for electric arc furnaces of small capacity

Цель. Разработка энергоэффективных и экономичных решений свода дуговой электропечи малой вместимости.

Методика. Математическое моделирование, промышленный эксперимент.

Результаты. Разработано и внедрено инновационное решение комбинированного свода дуговой сталеплавильной печи (ДСП) малой вместимости, сочетающее водоохлаждаемые элементы и огнеупорную футеровку.

Научная новизна. Определена тепловая нагрузка и на ее основе рациональные геометрические параметры комбинированного свода 3-т ДСП, работающей по классической технологии.

Практическая значимость. Применение комбинированного свода в условиях 3-т ДСП литейного цеха при оптимальном соотношении водоохлаждаемых элементов в центральной части и огнеупорной футеровки на периферии обеспечивает сокращение удельного расхода огнеупоров в 1,4–2,5 раза в сравнении с традиционным огнеупорным сводом. (Илл. 2. Табл. 2. Библиогр.: 5 назв.)

Ключевые слова: дуговая печь, литейный цех, комбинированный свод, экономия огнеупоров.

Постановка проблемы. В литейных цехах машиностроительных заводов, которые характеризуются термином «малая» металлургия и обеспечивают жидким металлом основное производство, преимущественно используют дуговые печи малой и средней вместимости (1,5–20 т), работающие по классической технологии.

Технологические характеристики ДСП «большой» и «малой» металлургии, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о существенном отличии этих агрегатов как по энергопотреблению, так и по структуре потерь энергии [1]. Особенности энергобаланса ДСП «малой» металлургии являются повышенный расход и доля электроэнергии в приходной части; значительно более высокие абсолютные величины потерь теплоты, в частности через футеровку, в расходной части.

Традиционные водоохлаждаемые панели с плотной укладкой труб взамен огнеупорной футеровки стен и свода не находят широкого применения в дуговых печах «малой» металлур-

гии ввиду значительных потерь теплоты, что в условиях классической технологии затрудняет проведение операций экстракционного рафинирования металла шлаком [2].

По этой же причине неэффективно применение традиционной системы аспирации посредством газоотводящего патрубка со значительным притоком воздуха в печь, который охлаждает рабочее пространство и способствует окислению поверхности электродов. Портальная аспирационная камера, обычно используемая в данном классе печей, не обеспечивает локализации неорганизованных пылегазовых выбросов через электродные зазоры.

Таким образом, специфика дуговых печей литейных цехов с относительно слабой энергооборуженностью агрегатов, длительным жидким периодом плавки и продолжительными простоями обуславливает их невысокие технико-экономические показатели, в частности повышенный

Сравнительная характеристика энергобаланса дуговых печей «большой» и «малой» металлургии

Приходная часть энергобаланса				
Статьи энергобаланса	Печи «малой» металлургии		Печи «большой» металлургии	
	кВтч/т	%	кВтч/т	%
Электроэнергия	722	82	396	65
Энергия топливно-кислородных горелок	0	0	31	5
Энергия экзотермических реакций в ванне	158	18	183	30
Всего	880	100	610	100
Расходная часть энергобаланса				
Статьи энергобаланса	Печи «малой» металлургии		Печи «большой» металлургии	
	кВтч/т	%	кВтч/т	%
Сталь	511	58	348	57
Шлак	105	12	61	10
Потери с пылегазовой средой	62	7	122	20
Потери с водой	53	6	61	10
Потери через футеровку и прочие потери	149	17	18	3
Всего	880	100	610	100
Основные показатели				
Удельная мощность трансформатора, МВт/т	0,4-0,6		1,0-1,4	
Относительная длительность жидкого периода плавки, %	40-55		16-20	

удельный расход дорогостоящих огнеупоров и электродов. В связи с этим актуальной является разработка энергоэффективных решений систем водоохлаждения и аспирации, отличных от аналогов, применяемых в высокопроизводительных ДСП «большой» металлургии.

Цель работы – разработка комбинированного свода повышенной стойкости для дуговой печи малой вместимости, сочетающего водоохлаждаемые элементы и огнеупорную футеровку, с возможностью совершенствования системы аспирации путем локализации неорганизованных пылегазовых выбросов через электродные зазоры.

Основной материал. Концептуальное решение комбинированного свода состоит в замене огнеупоров водоохлаждаемыми элементами в наиболее критичной, теплонапряженной и подверженной износу области, определяющей стойкость свода в целом.

Предварительная оценка распределения теплового потока излучения в жидкий период плавки по радиусу свода позволяет определить область максимальной тепловой нагрузки, в которой целесообразно установить водоохлаждаемые элементы, и выполнить их тепловой расчет. С этой целью использована инженерная методика [3], которая применительно к ДСП, работающей по классической технологии, учитывает следующие источники излучения: жидкая ванна, боковая поверхность электродов и открытая поверхность дуг.

Задача схематически представлена на рис. 1а. Радиус-векторы \vec{r} показывают направление излучения из произвольных точек B, C, D на каждой из поверхностей источников на элементарную площадку свода (его форма в модели принята плоской) в окрестности точки A с координатами (ρ, H) , принимающей излучение.

Основным высокотемпературным источником излучения в печи являются электроды и дуги. Излучающей поверхностью электродов $S_{эд} = 2\pi \cdot r_{эд} \cdot L_{эд}$ в расчетной модели является боковая поверхность цилиндра радиусом распада электродов $r_{эд}$ и высотой, равной длине электродов в рабочем пространстве печи $L_{эд}$. Излучающей поверхностью дуг $S_d = 2\pi \cdot r_{эд} \cdot L_d$ по аналогии с электродами, является условная поверхность цилиндра диаметром $r_{эд}$ и высотой, равной длине дуги L_d . Последняя является функцией вторичного напряжения трансформатора, условий ионизации разрядного промежутка и степени экранирования дуги при электродинамическом заглужении в жидкую ванну.

Плотность теплового потока излучения электродов и дуг, ввиду неопределенности температуры и ее распределения по поверхности данных источников, удобнее выразить через контролируемые электрические параметры. Мощность тепловыделения на единицу излучающей поверхности при прохождении рабочего тока I через сечение электрода диаметром $d_{эд}$ с электрическим сопротивлением $R_{эд}$ (тепло Джоуля) представим

в виде: $N_{эд} = I^2 \cdot R_{эд} / S_{эд}$. Мощность тепловыделения дуг в первом приближении соответствует мощности, выделяемой в разрядном промежутке на единицу излучающей поверхности с учетом коэффициента экранирования $k_{экр}$ дуги

$N_{д} = (P_{мп} - I^2 \cdot R_{эд})(1 - k_{экр}) / S_{д}$ (где $P_{мп}$ – активная мощность трансформатора). Тогда выражения для искомой плотности теплового потока излучения электродов и дуг (рис. 1а) будут следующие.

Излучение электродов:

$$q_{эд} = \frac{N_{эд}}{\pi} \cdot 2r_{эд} \int_0^{a \cos(r_{эд}/R)} \int_{L_д}^{L_{эд}} \frac{(H-h) \cdot (\rho \cdot \cos(\varphi) - r_{эд}) \cdot dh d\varphi}{\left[(r - r_{эд} \cdot \cos(\varphi))^2 + r_{эд}^2 \cdot \sin(\varphi)^2 + (H-h)^2 \right]^2} \quad (1)$$

Излучение дуг:

$$q_{д} = \frac{N_{д}}{\pi} \cdot 2r_{эд} \int_0^{a \cos(r_{эд}/R)} \int_0^{L_д} \frac{(H-h) \cdot (\rho \cdot \cos(\varphi) - r_{эд}) \cdot dh d\varphi}{\left[(r - r_{эд} \cdot \cos(\varphi))^2 + r_{эд}^2 \cdot \sin(\varphi)^2 + (H-h)^2 \right]^2} \quad (2)$$

В зависимостях (1–2) подынтегральные функции представляют собой коэффициенты взаимной облученности; h, φ – линейная и угловая координаты.

Результирующий тепловой поток q на комбинированный свод ДСП является сложной функцией взаимного излучения рассмотренных источников, а также футеровки, ванны и пылегазовой среды в рабочем пространстве. Приняв допущения, что тепловой режим печи в жидкий период плавки стационарный, а температура водоохлаждаемого элемента существенно ниже температуры источников излучения, можно полагать, что тепловой поток не превысит сумму составляющих (1–2) без учета экранирующего действия газовой запыленной среды.

Допущения характеризуют предельный случай эксплуатации водоохлаждаемого элемента при отсутствии гарнисажа на его рабочей поверхности, что соответствует максимальной величине

проходящего к воде теплового потока и обеспечивает определенный запас при последующих тепловых, гидравлических и прочностных расчетах панели.

Результаты расчета q для условий жидкого периода плавки в 3-т ДСП: $P_{мп} = 1,8$ МВт; $I = 4,8$ кА; $H = 1,0$ м; $R = 1,05$ м; $r_{эд} = 0,325$ м; $T_{г} = 1950$ К; $T_{нат} = 520$ К; $L_д = 0,15$ м; $k_{экр} = 0,2$; $\epsilon_{г} = 0,7$ [4] приведены на рис. 1б.

Согласно полученным данным, наиболее теплонапряженная центральная часть свода, которую целесообразно выполнить водоохлаждаемой, охватывает область с относительным радиусом $\rho / R = 0,4-0,45$.

Тепловой расчет водоохлаждаемой панели состоит в оценке скорости циркуляции воды в трубчатом змеевике, позволяющем отводить расчетный тепловой поток 330–350 кВт/м² (рис. 1б). Согласно [4] скорость циркуляции определяется

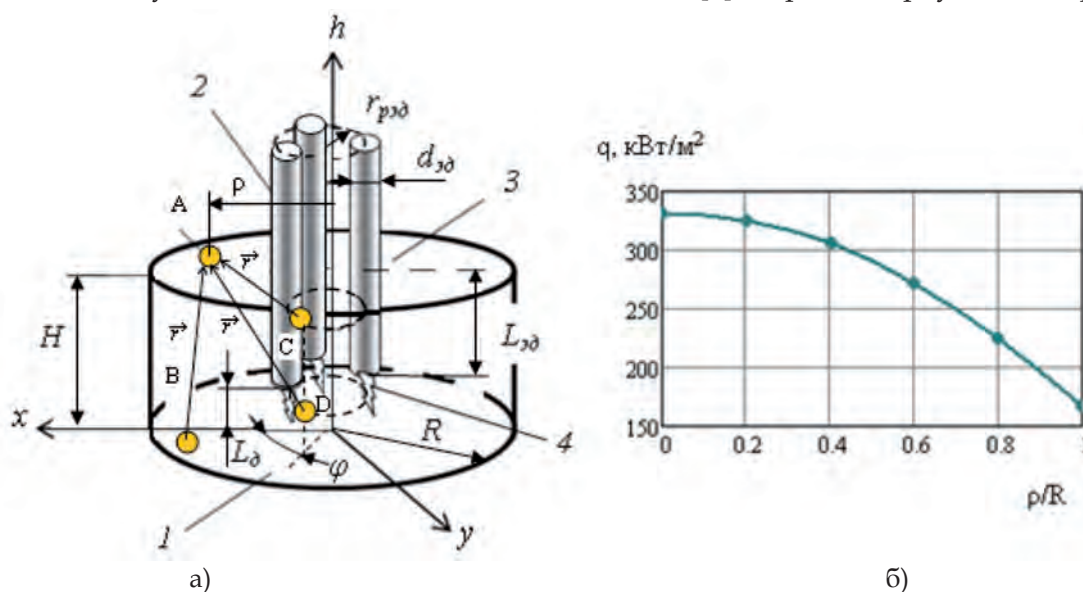


Рис. 1. Расчетная схема излучения на свод ДСП (а) и распределение плотности результирующего теплового потока q по относительному радиусу свода ρ / R (б):

1 – поверхность ванны, 2 – электроды, 3 – свод; 4 – дуга (обозначения – в тексте)

из критериального уравнения теплоотдачи конвекцией от стенки трубы к воде:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \quad (3)$$

где $Nu = (\alpha \cdot d) / \lambda$ – число Нуссельта; $Re = (w \cdot d) / \nu$ – число Рейнольдса; $Pr = (\gamma \cdot c \cdot \nu) / \lambda$ – число Прандтля; α – коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к воде; d – внутренний диаметр трубы; w – скорость воды в трубе; ν, γ, c, λ – кинематическая вязкость, плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности воды соответственно.

Коэффициент теплоотдачи α от стенки трубы к воде выражается из уравнения Ньютона для конвективного теплообмена.

$$\alpha = q / (t_{cm} - t), \quad (4)$$

где t_{cm}, t – температура охлаждаемой стенки трубы и средняя температура циркулирующей в панели воды соответственно.

Решение (3) с учетом (4) приводит к следующему выражению для скорости циркуляции воды:

$$w = \frac{\nu}{d} \cdot \left[\frac{q \cdot d}{0,021 \cdot Pr^{0,43} \cdot \lambda \cdot (t_{cm} - t)} \right] \quad (5)$$

Конструктивное исполнение комбинированного свода ДСП малой вместимости представлено на рис. 2. В нем использованы водоохлаждаемые элементы в центральной, наиболее теплонапряженной и изнашиваемой части и огнеупоры в периферийной зоне. Центральная водоохлаждаемая часть свода опирается на сводовое кольцо посредством трех трубчатых водоохлаждаемых спиц и газоотводящего патрубка. При этом футеровка периферийной части разбивается на несколько областей. В центральной части свода в местах прохода электродов установлены огнеупорные наливные вставки-экономайзеры, которые обеспечивают электроизоляцию и в определенной мере газоплотность.

Рассмотренное техническое решение позволяет при минимальных потерях тепла с водой, которые на практике за длительный период эксплуатации

обычно не фиксируют, сократить удельный расход огнеупоров за счет замены их водоохлаждаемыми элементами в центральной части, обычно лимитирующей стойкость свода в целом. При этом повышается стойкость периферийной части, что существенно улучшает технико-экономические показатели комбинированного свода.

Базовая конструкция комбинированного свода имеет резервы совершенствования, в частности в направлении модернизации системы аспирации. Установка водоохлаждаемого газоотводящего патрубка взамен традиционной малоэффективной порталной камеры позволяет производить рассредоточенный отбор пылегазовой среды как из периферийной, так и из центральной областей подсводового пространства. Согласно данным численного моделирования [5] система рассредоточенной аспирации позволяет уменьшить неорганизованные выбросы в электродные зазоры на 35–40 % и снизить приток воздуха в рабочее окно на 20–22 %. Последний фактор позволяет рассчитывать на снижение расхода графитированных электродов за счет их окисления приточным воздухом.

Комбинированный водоохлаждаемый свод внедрен на 3-т ДСП ПАО «Сумское НПО», г. Сумы. В печи выплавляют конструкционные, жаропрочные, коррозионностойкие марки стали как по классической технологии, так и методом переплава легированных отходов. Средняя масса плавки 3,4 т; мощность трансформатора 2МВА; диаметр свода 3,5 м, диаметр распада электродов 0,65 м, диаметр электродов 0,2 м.

Обобщенные данные по результатам внедрения представлены в табл. 2. Параметры плавки, удельные расходы материалов и энергоносителей при внедрении комбинированного свода практически не изменились. Негативного влияния комбинированного свода на шлаковый режим и продолжительность плавки не наблюдалось.

Анализ срока окупаемости комбинированного свода, выполненный путем сопоставления статей

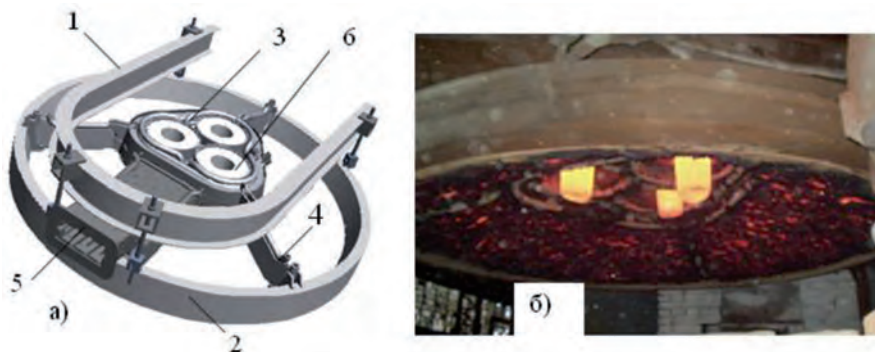


Рис. 2. Комбинированный свод ДСП. Концептуальное решение (а) и реализация (б):
1 – портал печи, 2 – опорное кольцо свода, 3 – центральная водоохлаждаемая часть, 4 – спицы,
5 – газоотводящий патрубок, 6 – огнеупорная вставка – экономайзер

Технико-экономические показатели комбинированного свода

Конструкция свода	Стойкость свода, относительных единиц		Экономия, кг/т стали	
	Динасовый	Магнезитовый	Огнеупоров	Электродов
Традиционная кирпичная	1	1	-	-
Комбинированная	1,4	2,0-2,5	6,5-11	1,2-1,5

экономии (табл. 2) и затрат: инвестиционных и на вставки-экономайзеры, дает величину в пределах 7–8 месяцев. Срок службы водоохлаждаемых элементов свода составляет 2–3,5 тыс. плавков в зависимости от условий эксплуатации

Выводы. Разработано новое концептуальное решение свода ДСП малой вместимости – комбинированный свод, включающий водоохлаждаемые и огнеупорные элементы. Внедрение комбинированного свода на 3-т ДСП позволило при прочих равных условиях (технология плавки и тип кирпича) увеличить стойкость в 1,4–2,5 раза и довести ее при использовании магнезитового кирпича до 200 плавков.

Незначительные инвестиционные затраты, низкий срок окупаемости и минимальные изменения инфраструктуры производства позволяют рекомендовать данную конструкцию к широкому применению в ДСП и ДСППТ вместимостью до 10–15 т.

Библиографический список / References

1. Pretorius E. EAF fundamentals / E. Pretorius, H. Oltmann, J. Jones // Process Technology Group – LWB Refractories. – 54 p. – Available at: <http://etech.lwbref.com/Downloads/Theory/Fundamentals%20of%20the%20EAF%20Process.pdf>

Pretorius E., Oltmann H., Jones J. *EAF fundamentals*. Process Technology Group. LWB Refractories, 54 p. Available at: <http://etech.lwbref.com/Downloads/Theory/Fundamentals%20of%20the%20EAF%20Process.pdf> (accessed 22 February 2017).

2. Тищенко П. И. Водоохлаждаемый свод и стеновые панели дуговых сталеплавильных печей малой металлургии / П. И. Тищенко, С. М. Нихамин, С. Н. Тимошенко, Н. Б. Дунь // Современные проблемы электрометаллургии стали. Материалы 13 Международной конф. – Челябинск: ЮУрГУ, 2007. – Ч. 2. – С. 159–161.

Tischenko P. I., Nekhamin S.M., Timoshenko S. N., Dun N. B. (2007). *Vodookhlazhdaemij svod i stenovii paneli dygovykh staleplavilnykh pecej maloj metallurgii* [Water-cooled roof and wall panels of the foundry EAFs]. Cheljabinsk Electrometallurgy international conf. proceedings. South Ural University. Part 2. Pp. 159-161 (in Russian).

3. Timoshenko S. N. Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace / Timoshenko S. N. // System

technologies. – Dnepropetrovsk, 2016. – № 3 (104). – P. 33–39.

Timoshenko S. N. *Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace*. System technologies. Dnepropetrovsk, 2016, no. 3 (104), pp. 33-39.

4. Toulouevski Yu. N. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection / Yu. N. Toulouevski, I. Y. Zinurov. – Berlin: Springer, 2010. – 258 p.

Toulouevski Yu. N., Zinurov I. Y. *Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection*. Berlin, Springer, 2010, 258 p.

5. Тимошенко С. Н. Моделирование системы аспирации электродуговой печи с целью повышения энергоэффективности и экологической безопасности / С. Н. Тимошенко, П. И. Тищенко, Н. С. Тимошенко, А. Н. Семко // Экология и промышленность. – Харьков: «УкрНТЦ «Энергосталь», 2013. – № 2 (35). – С. 66–69.

Timoshenko S. N., Tischenko P. I., Timoshenko N. S., Semko A. N. (2013) *Modelirovaniye sistemy aspiratsii elektrodugovoy pechi s tsel'yu povysheniya energoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti* [Simulation of the electric arc furnace system aspiration to improve the energy efficiency and environmental safety]. Kharkiv, UkrNTC "Energostal", no. 2 (35), pp. 66-69 (in Russian).

Purpose. The development of economy and energy-efficient solution of the roof of electric arc furnace of small capacity.

Methodology. Mathematical modeling, numerical simulation, industrial experiment.

Findings. An innovative solution for a combined arch of an electric arc steel melting furnace (EAF) of low capacity was developed and introduced, which combines water-cooled elements and refractory lining.

Originality. The thermal load and on its basis rational geometrical parameters of the combined roof of 3-t EAF operating according to the classical technology are determined.

Practical value. The use of a combined roof of 3-ton EAF at an optimal ratio of water-cooled elements in the central part and refractory lining at the periphery provides a reduction in the specific consumption of refractories 1.4–2.5 times.

Key words: electric arc furnace, foundry, combined roof, saving of refractories.

Рекомендована к публикации
д. т. н. М. В. Губинским

Поступила 15.09.2017