

# ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

С.Н.Тимошенко (ДонНТУ, г. Донецк), П.И. Тищенко (ООО «УМТ»,

г. Донецк)

*Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на тепловую работу водоохлаждаемых элементов дуговых сталеплавильных печей высокой мощности, в частности радиационная и конвективная составляющие падающего теплового потока, наличие гарнисажа и слоя отложений на рабочей и охлаждаемой поверхностях, теплота конденсации железа. Сделан вывод о развитии явления малоциклового усталости при эксплуатации водоохлаждаемых элементов и даны рекомендации по увеличению их стойкости.*

В дуговых сталеплавильных печах (ДСП) высокой мощности за последние два десятилетия водоохлаждаемые элементы (ВЭ) стен и свода стали неотъемлемой частью оборудования и энерготехнологии. В решающей степени этому способствовало развитие интенсивной технологии плавки с доводкой металла в установке печь-ковш и превращение ДСП в плавильный агрегат для производства полупродукта. Сокращение длительности жидкого периода плавки существенно повысило позитивное и нивелировало негативное влияние ВЭ на технико-экономические показатели работы печи.

Рост вводимой в печь удельной электрической мощности до 1...1,5МВт/т наряду с использованием альтернативных источников энергии привели к повышению отказов в работе ВЭ. Помимо прожогов вторичными электрическими дугами, что в значительной степени является случайным фактором, зависящим от качества, размера кусков и расположения в печи металлошихты, возникают проблемы, вызванные длительным перегревом наружной поверхности ВЭ [1].

Для анализа причин этого явления рассмотрим предельные условия эксплуатации ВЭ. Общепринятым является применение трубчатых элементов из стали 10, 20 или 20К. Нагрев воды в контуре охлаждения ВЭ, как правило, ограничивают температурой 50...55<sup>0</sup>С, что при использовании оборотного цикла водоснабжения предотвращает выпадение солей жесткости на внутренней поверхности трубы и ухудшение условий теплопередачи. Устойчивая тепловая работа ВЭ достигается отводом проходящего теплового потока циркулирующей с расчетной скоростью водой без существенного перегрева наружной, обращенной в рабочее пространство печи, поверхности трубы, а также самой воды.

Скорость циркуляции воды в контуре охлаждения (трубе) ВЭ ( $w$ , м/с) рассчитывается из критериального уравнения конвективного теплообмена между стенкой трубы и водой:

$$w = \frac{\nu}{d} \cdot \left[ \frac{\alpha \cdot d / \lambda_a}{0.021 \cdot \text{Pr}^{0.43}} \right]^{1.25} \quad (1),$$

которое имеет вид [2]:

$$Nu = 0,021 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.43} \quad (2),$$

где  $Nu = (\alpha \cdot d) / \lambda$  число Нуссельта;  
 $\text{Re} = (w \cdot d) / \nu$  число Рейнольдса;  
 $\text{Pr} = (\rho \cdot c \cdot \nu) / \lambda$  число Прандтля;  
 $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к воде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $d$  - внутренний диаметр трубы, м;  
 $\lambda_a$  - коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К);  
 $w$  - скорость воды в трубе, м/с;  
 $\nu$  - кинематическая вязкость воды, м<sup>2</sup>/с;  
 $\rho$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c$  - теплоемкость воды, Дж/(кг·К).

Температура наружной поверхности трубы ( $t_2$ ) определяется теплопередачей из рабочего пространства печи к воде через многослойную стенку (рис.1).

Величина коэффициента теплоотдачи к воде  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) рассчитывается по проходящему тепловому потоку ( $q$ , Вт/м<sup>2</sup>) и перепаду температуры между стенкой трубы ( $t_3$ ) и потоком воды ( $t_4$ ), принимая  $t_3 = 70 \dots 80^\circ\text{C}$ , а  $t_4$  как среднее значение между температурами подачи и слива:

$$\alpha = q / (t_3 - t_4) \quad (3)$$

Расчет  $t_2$  целесообразно выполнить для неблагоприятных условий эксплуатации ВЭ: в жидкий период плавки (практически нет экранирования излучения) и при отсутствии гарнисажа на его рабочей поверхности. На практике такие случаи имеют место периодически [3], когда термически равновесный слой гарнисажа быстро (за 1...2 мин) оплавляется ввиду резкого снижения теплоотвода при возникновении воздушного зазора между ним и трубой, а новый слой гарнисажа нарастает лишь за 10...20 мин.

$$t_2 = t_4 + \left( \frac{h}{\lambda_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) \cdot q \quad (4)$$

где  $\lambda_1, \lambda$  – коэффициент теплопроводности трубы и слоя отложений на охлаждаемой водой поверхности соответственно, Вт/(м·К);  
 $h, b$  – толщина стенки трубы и отложений соответственно, м.

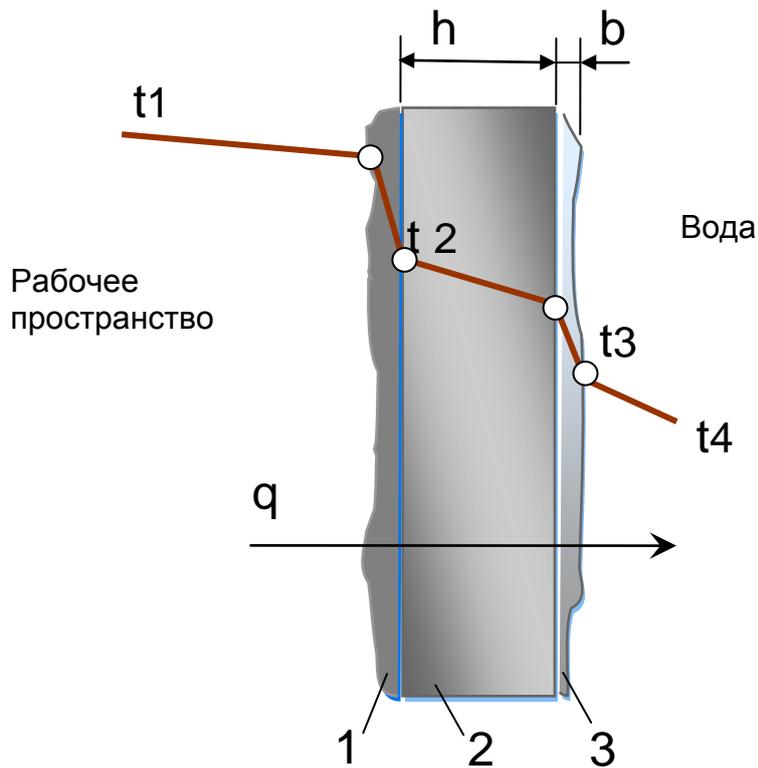


Рисунок 1 – Расчетная схема теплопередачи через водоохлаждаемый элемент. 1- гарнисаж, 2- стенка трубы ВЭ, 3- слой отложений на охлаждаемой водой поверхности, q- тепловой поток, проходящий к воде.

Проходящий к воде тепловой поток – сложная функция параметров энерготехнологического режима работы печи и конструкции ВЭ. Объективную информацию о потоке можно получить из теплового баланса ВЭ на основе данных о расходе и нагреве воды, ее теплоемкости и площади тепловоспринимающей поверхности, что, как правило, затруднено.

Оценку величины проходящего к воде теплового потока для наиболее теплонапряженного жидкого периода плавки можно получить путем анализа следующих составляющих.

1. Излучение ванны ( $q_1$ ). Полагаем, что излучение дуг, согласно принятой технологии, экранировано вспененным шлаком, энергия дуг передается ванне и ее температура эффективно усредняется в объеме за счет продувки аргоном через пористые пробки в подине.

$$q_1 = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot (T_B^4 - T_2^4) \quad (5)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$\varepsilon$  – степень черноты излучающей поверхности ванны;

$\varphi$  – угловой коэффициент взаимной облученности;

$T_B, T_2$  – температура ванны и поверхности ВЭ соответственно, К.

Приняв для жидкого шлака  $\varepsilon = 0,55$  [2],  $T_B = 1880\text{К}$ ,  $T_2 = 700\text{К}$  и задавшись  $\varphi = 0,35$  как отношением поверхности ванны к общей поверхности стен и свода печи, получим  $q_1 = 240$  кВт/м<sup>2</sup>.

2. Конвективная составляющая ( $q_2$ ), связанная с воздействием на ВЭ высокоскоростного пылегазового потока. Ориентируясь на данные [4], величину  $q_2$  можно принять 70...80 кВт/м<sup>2</sup>.
3. Теплота конденсации паров железа, испаряющегося в зоне дуг, на поверхности ВЭ. Этот фактор в анализе тепловой работы ВЭ ранее не рассматривался. Вместе с тем, оценка скорости испарения железа для 100-т ДСП высокой мощности в 2,5 кг/с [5] дает основание полагать, что даже при 5%-ном использовании теплоты конденсации железа на ВЭ (6,27 МДж/кг), например в газоотводящем сводовом патрубке, дополнительная тепловая нагрузка составит  $q_3 = 50...65$  кВт/м<sup>2</sup>.

Таким образом, общая тепловая нагрузка (проходящий к воде тепловой поток) на ВЭ при неблагоприятных условиях в 100...150 т ДСП высокой мощности может достигать:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 = 360...385 \text{ кВт/м}^2.$$

По данным прямых измерений [6], величина проходящего через ВЭ теплового потока в 150-т шахтной ДСП высокой мощности, использующей интенсивную технологию, достигает на своде пиковых значений 360 кВт/м<sup>2</sup>, что соответствует нашим оценочным инженерным расчетам.

Отложения на внутренней поверхности трубы ВЭ возникают при использовании технической воды оборотного цикла. Они представлены, главным образом карбонатами кальция, магния и оксидами железа. Последние, как правило, имеют рыхлую структуру с низким коэффициентом теплопроводности. Расчетная зависимость температуры

наружной (рабочей) поверхности ВЭ от толщины слоя отложений на его внутренней поверхности при найденной оценке теплового потока приведена на рис. 2. Полученные данные существенно зависят от коэффициента теплопроводности отложений ( $\lambda$ ), величина которого может отличаться на порядок [7,8].

Тепловой поток, проходящий через стенку трубы ВЭ, создает в ней перепад температуры, который ведет к возникновению термических напряжений. Расчет напряжений в стенке трубы ВЭ выполнен с использованием методики [9]. Чтобы определить запас прочности и тем самым дать оценку опасности данного состояния, полученное значение напряжений необходимо сопоставить с критической величиной этого параметра. В качестве последнего в технических расчетах принято использовать характеристику «предел текучести»  $\sigma_{02}$  – напряжение, вызывающее остаточную деформацию, равную 0,2% от размера образца или изделия.

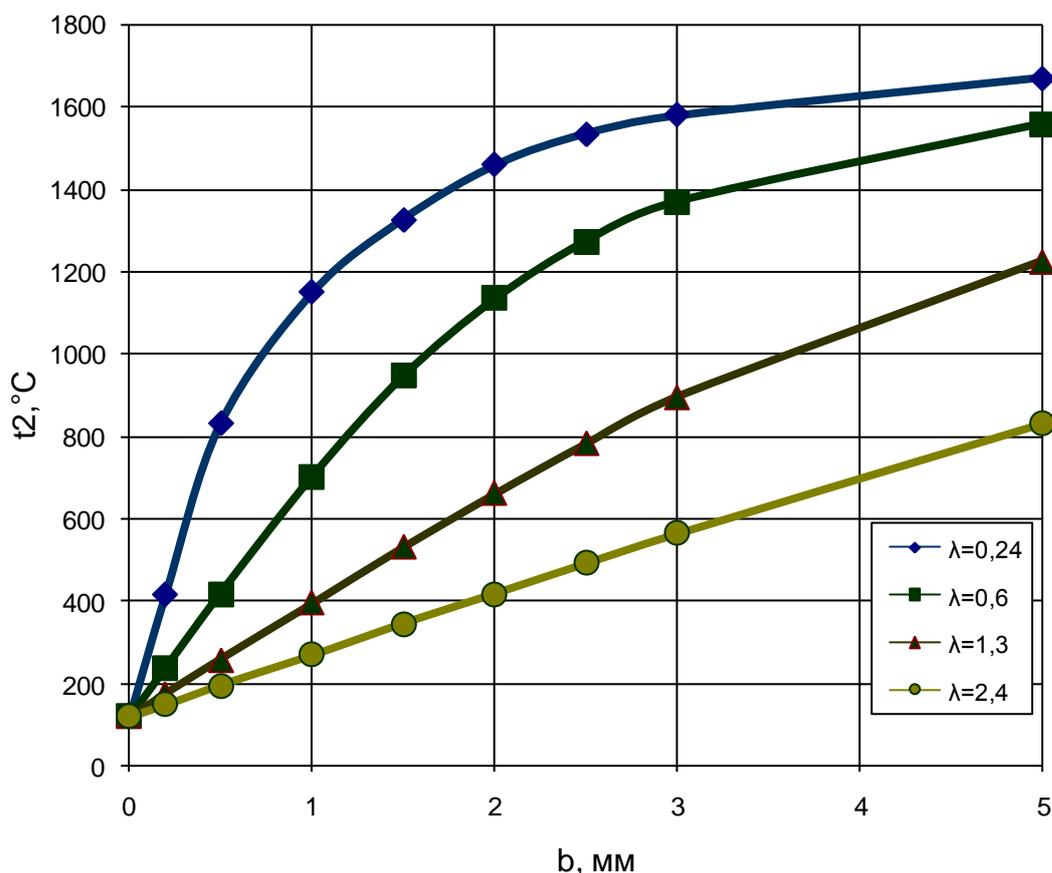


Рисунок 2 – Зависимость температуры рабочей поверхности ВЭ ( $t_2$ ) от толщины отложений на охлаждаемой поверхности ( $b$ ) и их теплопроводности ( $\lambda$ , Вт/(мК)).

На рис. 3 сопоставлены расчетные термические напряжения ( $\sigma$ ) в стенке трубы ВЭ ( $\varnothing 89 \times 10$  мм) и справочные данные по  $\sigma_{0,2}$  в зависимости от температуры рабочей поверхности для используемых в конструкциях ВЭ материалов: сталь 20 и сталь 10. Согласно расчетам, термические напряжения в стенке трубы достигают предела текучести при температуре стенки около  $500^{\circ}\text{C}$  для стали 10 и при температуре около  $600^{\circ}\text{C}$  для стали 20 (точки пересечения кривых). Соответственно, при указанных температурах коэффициент запаса прочности принимает значение, равное 1 и эксплуатационная надежность ВЭ резко падает.

Как отмечено выше, температура рабочей поверхности ВЭ определяется при данном тепловом потоке и конструкции ВЭ наличием и свойствами отложений на охлаждаемой поверхности (рис.2). Ориентируясь на теплопроводность отложений оксидов железа  $\lambda = 0,25 \dots 0,6$  Вт/(мК), следует ожидать, что при толщине слоя отложений около 1 мм температура рабочей поверхности ВЭ превысит  $700 \dots 800^{\circ}\text{C}$  (рис.1).

Цикличность перегрева ВЭ, связанная с теплосменами при работе печи, способствует развитию явления малоциклового усталости. На практике это проявляется в образовании трещин ВЭ и соответственно течей воды после нескольких тысяч циклов (1...3 тыс. плавов с учетом нескольких подвалок шихты) вместо нескольких десятков тысяч циклов при эксплуатации ВЭ без перегрева.

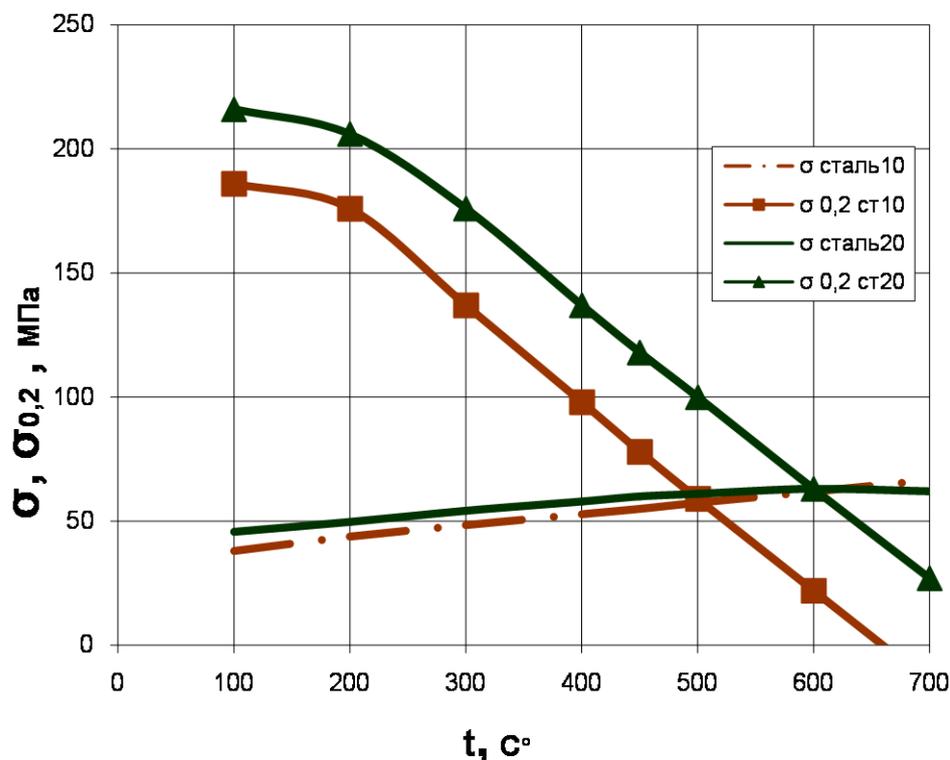


Рисунок 3 – Зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (линии с маркерами) и возникающих в стенке трубы напряжений (линии без маркеров) от температуры поверхности трубы для материалов: сталь 10 и сталь 20.

Наиболее доступным путем повышения надежности эксплуатации ВЭ в ДСП высокой мощности является использование трубы с уменьшенной толщиной стенки. Фактор толщины стенки при прочих равных условиях повышает предельный тепловой поток, при котором возникают опасные термические напряжения (рис. 4). Однако следует уделить основное внимание исключению причин перегрева рабочей поверхности ВЭ, т.е. водоподготовке. Необходимо принять меры для исключения коррозионного воздействия воды, как предписывает СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение, наружные сети и сооружения». Наиболее эффективный вид ингибитора коррозии должен определяться в каждом конкретном случае опытным путем.

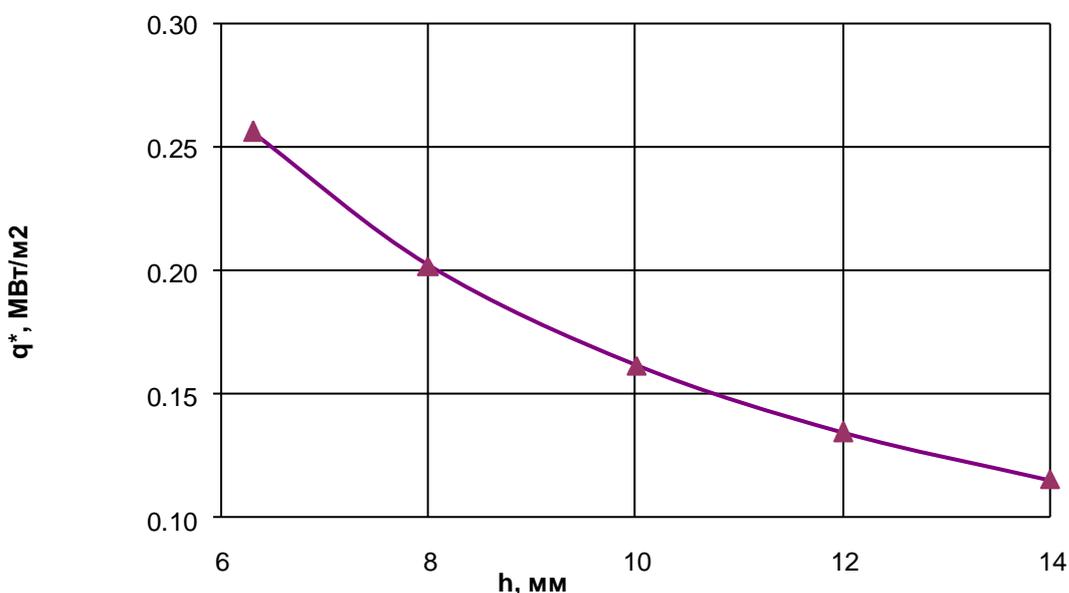


Рисунок 4 – Зависимость предельного теплового потока к воде ( $q^*$ ) от толщины стенки трубы ВЭ ( $h$ ) при температуре рабочей поверхности трубы (сталь 20) 400°C.

Таким образом, исследование условий эксплуатации водоохлаждаемых элементов ДСП высокой мощности выявило основные факторы, определяющие их тепловую нагрузку, которая может достигать 360...385 кВт/м<sup>2</sup>. Эксплуатация ВЭ при наличии слоя продуктов коррозии на внутренней поверхности труб ведет к перегреву их рабочей поверхности. При этом в стенке трубы возникают опасные термические напряжения, превышающие предел текучести материала трубы и ведущие к развитию явления малоциклового усталости. В конечном счете, это способствует быстрому разрушению и выходу ВЭ из строя в течение 1...3 тыс. плавков.

Мерами повышения стойкости и эксплуатационной надежности ВЭ являются использование трубы с меньшей толщиной стенки (6...8 мм

вместо 10...14мм) и улучшение водоподготовки для исключения коррозионного воздействия воды на ВЭ.

### Список литературы

1. Сосонкин О.М. Граничные условия замены кладки дуговых сталеплавильных печей охлаждаемыми конструкциями // Сталь.- 2001, №11.- С. 30-31.
2. Казанцев Е.И. Промышленные печи. М.: Metallurgiya, 1975 – 368 с.
3. Kruger K., Ehrbar A., Timm K. Schlackenabdeckungen und thermische Verluste eines Drehstromofens. Stahl und Eisen №9 (118), 1998, p. 63-67.
4. Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., Дунь Н.Б., Гасенко А.А. Особенности теплообмена в водоохлаждаемых газоходах дуговых сталеплавильных печей высокой мощности // Современные проблемы электрометаллургии. 13-я Международная конф. Челябинск: ЮУрГУ, 2007. Часть 2. - С. 163-167.
5. Карасев В.П., Сулягин К.Л. Об испарении железа при плавке стали в дуговых электропечах // Современные проблемы электрометаллургии. 13-я Международная конф. Челябинск: ЮУрГУ, 2007. Часть 2. - С. 182-189.
6. Волос Д.А. Исследование теплообмена в дуговой сталеплавильной печи с водоохлаждаемыми элементами// Повышение эффективности теплообменных процессов и систем. Международная научно-техническая конференция. Вологда, 2004.
7. Генель Л.С., Галкин М.Л. и др. Ингибиторы коррозии и отложений солей в системах охлаждения литевых форм. // Полимерные материалы, -2006, №4(83).
8. Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1990- 254 с.
9. Сосуды и трубопроводы высокого давления. Справочник. / Е.Р. Хисматулин и др. М.: Машиностроение, 1990 - 384с.