



*The matters of optimization of thermal insulation of high-temperature units of metallurgy and machine-building are considered. Comparison of expenses for power efficient brickwork and fuel economy is given.*

Д. В. МЕНДЕЛЕВ, И. А. ТРУСОВА, П. Э. РАТНИКОВ, БНТУ

УДК 669.04

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ФУТЕРОВОК С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ТОПЛИВОПОТРЕБЛЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

В соответствии с основными направлениями повышения эффективности тепловой работы печей важное значение имеет уменьшение тепловых потерь через ограждающие конструкции [1, 2].

Еще в конце 80-х годов XX ст. Г. Г. Немзером в работе [3], систематизирующей методы интенсификации и повышения энерготехнологической эффективности печей кузнечно-прессового производства, отмечено, что ближайшей перспективой должно было стать использование волокнистых огнеупоров в нагревательных и термических печах. При этом автором было отмечено, что расход топлива в печах периодического действия снижается до 25%, уменьшается продолжительность цикла нагрева и термообработки, повышается производительность на 10–15%, масса футеровки снижается в 5–10 раз, облегчая, тем самым, конструкцию каркаса печи, фундаментов и т. д., затраты на выполнение ремонтных и строительных работ сокращаются в 3–5 раз. Автор также акцентировал внимание на том, что резко сокращаются тепловые потери в окружающую среду за счет герметизации рабочего пространства печей, которое удается термостатировать в большей степени, т. е. применение легковесных волокнистых огнеупоров и теплоизоляционных материалов является комплексным фактором топливосбережения в печах и повышения их энерготехнологической эффективности.

В странах СНГ внедрение волокнистых изделий применительно к термическим печам (топливным и электрическим) началось с 1977 г. в условиях ПО «Ижорский завод», завод «Энергомашспецсталь» и других институтом «Союзтеплострой» (Ленинградское отделение) и ВНИПИ «Теплопроект» [4]. В отмеченной работе приведены результаты замены традиционной футеровки на волокнистую для термической печи с выкатным подом

для ПО «Ижорский завод», которые показали сокращение удельного расхода условного топлива на 15 кг у. т./т металла, снижение времени подъема температуры на 20%, а также повышение качества нагрева металла за счет равномерности. Аналогичные результаты были получены и для термической рециркуляционной печи: снижение топливопотребления составило 10–12 кг у. т./т термообрабатываемого металла.

На металлургических и машиностроительных предприятиях дальнего зарубежья применение волокнистых материалов для нагревательных и термических печей началось в 60-х годах прошлого века [5]. В бывшем СССР в тот период времени не было соответствующих материалов и технологий их применения и только в 1982 г. институтом «Теплопроект» (г. Москва, Россия) была разработана инструкция по проектированию футеровки промышленных печей из огнеупорных волокнистых материалов, которой пользуются проектанты и в настоящее время. Авторами работы выполнен анализ опыта применения волокнистых огнеупоров, на основании которого были сделаны следующие выводы. Применение волокнистых материалов для футеровки печей позволяет по сравнению с кирпичной футеровкой снизить тепловые потери через футеровку на 20–30%, сократить в несколько раз время разогрева печи и длительность монтажа футеровки, получить экономию энергозатрат до 45% при периодических остановках печей (что актуально в настоящее время, особенно при неритмичной работе печного оборудования). Более того, отмечено, что волокнистые материалы следует более широко использовать в термических газовых и особенно в электрических печах, а также для теплоизоляции водоохлаждаемых элементов печей всех конструкций. Для рабочего слоя футеровки

высокотемпературных газовых нагревательных и термических печей необходимо разрабатывать новые волокнистые материалы и способы крепления их в печах. В работе В. И. Губинского [6] приведены данные по снижению удельного расхода условного топлива для термической (закалочной) печи с выкатным подом фасонно-сталелитейного цеха при замене шамотной футеровки волокнистыми плитами. Для конкретного случая расход топлива сократился с 220 до 73 кг у. т./т.

В работе [7] авторы отмечают, что использование современных теплоизоляционных материалов, а также газогорелочного оборудования и системы управления с высокоточными контроллерами применительно к термическим печам машиностроения и металлургии позволяет снизить удельный расход природного газа с 230 до 38–75 кг у. т./т.

Авторы работы [8] приводят основные показатели нагревательной печи (проект ООО «Совпром-печь») для нагрева заготовок под ковку в условиях ОАО «Тяжпрессмаш» с футеровкой из модульных волокнистых блоков, выполненных на опытной базе НПП «Теплограждение». Масса футеровки снизилась в 20 раз, трудозатраты на монтаж футеровки – на 60%, расход условного топлива – на 30%.

В работе [9] установлено, что при работе кузнечных печей периодического типа действия при высоких температурах и при снижении массы футеровки примерно на 11% потери теплоты через футеровку снижаются примерно на 62%, а время разогрева печи до 1500 °С снижается с 6 до 2,5 ч.

Опыт применения волокнистых огнеупорных материалов, изготавливаемых ЗАО «Кераммаш» для условий машиностроительных предприятий [10], показал, что благодаря малой величине коэффициента теплопроводности имеется возможность использовать более тонкие слои огнеупоров, что уменьшает теплоотдающую поверхность в 2,4 раза, а в печах с выкатным подом или в проходных печах с вагонетками применение легковесного муллитового огнеупора в сочетании с волокнистым огнеупорным материалом достигается уменьшением массы печной вагонетки в 2 раза.

В работе [11] приведены достижения ООО «Морган Термал Керамикс Сухой Лог» (г. Екатеринбург, Россия) в области разработки и использования теплоизоляционных материалов. В частности, отмечается, что при толщине кладки из теплоизоляционных шамотных изделий, обеспечивающей температуру на кожухе около 55 °С, масса используемых огнеупоров увеличивается в 2,8–6,0 раз, а количество теплоты, затраченное на нагрев футеровки – в 6,5–43,7 раза в зависимости от материала футеровки, в свою очередь, расход энерго-

носителя вследствие уменьшения количества теплоты, требуемой на нагрев волокнистой футеровки, снижается в 2,3–8,4 раза, что в совокупности с низкой аккумуляцией теплоты волокнистыми материалами дает экономию энергоносителя 30–50%.

Преимущества и достоинства волокнистых футеровок, а также опыт зарубежного печестроения использованы при разработке конструкции и создании под руководством В. И. Тимошпольского современной полупромышленной печи для нагрева и термообработки сплавов и металлов на базе ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси» [1, 2, 12]. Позднее в данной печи специалистами этой организации были проведены сравнительные экспериментальные исследования нагрева металла до температур термообработки 710–730 °С с использованием волокнистой и шамотной футеровок, а также с учетом количества подсосов холодного воздуха [13]. Результаты показали, что удельный расход условного топлива при использовании волокнистой футеровки снизился с 78 до 30 кг у. т./т по сравнению с использованием традиционной футеровки из шамотного кирпича, а теплота, аккумулированная кладкой в процессе нагрева печи, на порядок ниже (с 280 до 28 МДж).

Помимо снижения потерь теплоты теплопроводностью и на аккумуляцию кладкой, использование волокнистых футеровок в нагревательных и термических печах позволяет увеличить межремонтные периоды за счет повышения строительной прочности и стойкости футеровочных материалов, особенно при периодических и резких нагревах и охлаждениях. В работе [14] отмечено, что стойкость футеровок нагревательных и термических печей достигает в среднем двух лет, включая промежуточные ремонты отдельных элементов и узлов. Применение волокнистых материалов в сочетании со штучной кирпичной футеровкой стен оказалось малоэффективным. Современный зарубежный опыт печестроения показывает возможность повышения стойкости футеровок нагревательных печей в среднем до 5 лет.

В соответствии с этим применение новых огнеупорных материалов требует комплексного учета принципиальных особенностей проектирования и строительства нагревательных и термических печей. Вместе с тем, вопросы разработки методик расчета конструкций многослойных футеровок, обеспечивающих минимальные тепловые потери и требуемую температуру наружной поверхности печи, к настоящему времени не получили должного развития и освещения в технической

литературе. При проектировании печей (включая печи кузнечно-штамповочных цехов) конструкцию футеровки зачастую либо выбирают исходя из опыта эксплуатации аналогичных печей, либо рассчитывают только лишь с учетом требуемой температуры наружной поверхности печи. Однако существуют немногочисленные публикации, в которых предприняты попытки к определению рациональной конструкции футеровки.

В работе [15] отмечено, что при проектировании промышленных печей требуется определять эффективную степень тепловой изоляции ограждений рабочей камеры, теплоиспользующих элементов и газоходов, а для действующих печей также может рассматриваться вопрос о целесообразности дополнительной тепловой изоляции. В обоих случаях возникает оптимизационная задача, требующая сопоставления расходов на тепловую изоляцию с получаемой экономией топливозергетических ресурсов.

Вопросам оптимизации изоляции тепловых агрегатов с учетом сопоставления расходов и экономии топлива посвящены также работы [16–19]. Авторами этих работ предложена расчетная методика оптимизации конструкций изоляции камерных нагревательных печей с использованием многослойных футеровок. В работе [17] также отмечено, что применимость теплоизоляционных материалов в тепловых агрегатах определяется как теплоизоляционными свойствами материалов, так и размерами применяемых изоляционных конструкций, при этом авторы приводят зависимость, которая позволяет выделить область допустимых конструктивных решений по указанным параметрам, а для повышения теплоизоляционных свойств материалов предложены высокопористые матричные структуры. В свою очередь, автор работы [18] учитывает влияние температуры газа в зонах печи на эффективность тепловой изоляции.

По данным работы автора [9], в процессе длительной службы в условиях примерно постоянных температур теплопроводность огнеупоров повышается на 10–15%, а в условиях переменных температур понижается вследствие образования дополнительных микротрещин в структуре огнеупора. Автор также отмечает, что для практического использования любого огнеупорного материала в качестве теплоизоляции важны две основные характеристики: температура длительного применения и аккумулирующая способность, при этом предлагается использовать единую характеристику (коэффициент аккумуляции теплоты  $b = \sqrt{\lambda \rho c}$ ) для указанных выше характеристик, этот коэффициент для большинства традиционных огнеупо-

ров в интервале температур от 500–600 до 1000–1200 °С колеблется в пределах  $\pm 10$ . В соответствии с этим автор отмечает, что современное тепловое ограждение печей из традиционных кирпичей и блоков уступает сложным волокнистым теплоизоляционным материалам, так называемым функционально-градиентным, каждый слой из которых выполняет свою функцию: один обеспечивает прочность, другой служит тепловым экраном.

Авторы работы [20] отмечают, что при разработке конструкций многослойных футеровок необходимо учитывать такие параметры, как стоимость, температуру применения, коэффициент теплопроводности с учетом изменения его от перепада температуры на границе слоя и теплоемкости материалов, стойкость огнеупоров, экологические требования, термическое расширение и срок службы. Из всех этих параметров авторами выделен срок службы по критерию, который включает потерю основных эксплуатационных базовых свойств (теплопроводность, теплоемкость, механическая прочность). Интегральным универсальным параметром, определяющим экономическую целесообразность и термотехнологическую работоспособность модульных высокотемпературных теплоизолирующих облегченных материалов (МВТОМ), может служить, по мнению авторов, критерий

$$K = \frac{B}{Q_H^p} \int \frac{f(\tau)}{(\Phi_1 + \Phi_2)} d\tau,$$

где  $Q_H^p$  – теплотворная способность топлива;  $B$  – стоимость единицы топлива;  $\int f(\tau) d\tau$  – сверхнормативные потери теплоты за расчетный период  $\tau$ ;  $\Phi_1, \Phi_2$  – соответственно затраты на демонтаж старой и монтаж новой футеровки.

Если критерий  $K \geq 1$ , то необходимы капитальный ремонт и модернизация футеровки теплового агрегата. При этом авторами отмечается, что проблемы оптимизации указанных ранее критериев выбора МВТОМ должны решаться за счет использования многослойных футеровок, что нашло отражение в разработанной методике подбора материалов и конструкций футеровок, в частности, выбор слоев производится из расчета минимизации скачка теплопроводности в месте стыка слоев, исключающих возможность возникновения локальных термонапряжений. Учитывая, что используемые анкеры из жаропрочной стали приводят к приросту температуры на 6–15 °С на кожухе, в работе предложено использование дополнительного (поверх кожуха) теплоизолирующего слоя.

Авторами работы [8] наряду с основными теплофизическими параметрами футеровки и ее

конструкцией предложено учитывать скорость движения печных газов. Для послойной футеровки рекомендуемая скорость движения печных газов не должна превышать 10 м/с. В свою очередь, автором работы [11] отмечено, что для футеровки из современных материалов ООО «Морган Термал Керамикс Сухой Лог» рекомендуемая скорость газового потока должна быть не более 20–30 м/с.

В работе [21] отмечено, что традиционный путь снижения тепловых потерь за счет прямой и непосредственной теплоизоляции поверхностей промышленной печи снаружи и изнутри может привести к отклонению температурного режима печи от заданного в соответствии с технологией. Поэтому при выборе футеровки печи необходимо

сопоставлять градиенты температур по сечению теплоизоляции до и после модернизации печи.

Выполненный анализ использования современных футеровочных материалов для нагревательных и термических печей машиностроительного и металлургического производств показал возможность снижения удельного расхода топлива на 5–25% (в зависимости от режима работы печей, производительности, организации технологического процесса и т. д.).

Несмотря на внедрение футеровочных материалов для промышленных печей, вопросы разработки методик выбора конструкции футеровки требуют дальнейшего развития и совершенствования.

### Литература

1. Тимошпольский, В. И. Герман М. Л. Концепция реконструкции и модернизации парка нагревательных печей металлургических и машиностроительных предприятий Республики Беларусь: от теории к практике (проблемы вопросы) / В. И. Тимошпольский, М. Л. Герман // *Литье и металлургия*. 2007. № 2. С. 21–28.
2. Тимошпольский В. И. Энергоэффективные печи для промышленного комплекса Беларуси // *Наука и инновации*. 2007. № 2. С. 12–14.
3. Немзер, Г. Г. Теплотехнология кузнечно-прессового производства / Г. Г. Немзер. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1988.
4. Гришин, И. Е. О повышении эффективности работы энергетических тепловых агрегатов за счет перспективы применения современных огнеупорных и теплоизоляционных материалов / И. Е. Гришин, А. С. Горшков, Б. П. Губин // *Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: материалы II междунар. конгресса*. 2006. С. 90–94.
5. Губинский, В. И. Опыт применения волокнистых материалов для футеровки печей трубного производства / В. И. Губинский, А. А. Згура, А. В. Красин // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. НМетАУ: в 9-ти т. Днепропетровск*, 2003. Т. 9. С. 64–69.
6. Губинский, В. И. Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей / В. И. Губинский // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. НМетАУ: в 2-х кн. Днепропетровск*, 2005. Кн. 1. С. 149–156.
7. Мунтяну, Я. Д. Современные энергосберегающие промышленные печи производства ЗАО «Кераммаш» для машиностроения и металлургии / Я. Д. Мунтяну, П. Н. Бегунов // *Теплотехника и энергетика в металлургии: сб. тр. XV междунар. конф. Днепропетровск, 7–9 октября 2008 г. Днепропетровск*, 2008. С. 151–152.
8. Шахов, И. И. Конструкции футеровок термических и нагревательных печей на основе волокнистых огнеупорных материалов / И. И. Шахов, Н. Н. Калинина, В. В. Курносков // *Металлургическая теплотехника: История, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М. А. Глинкова: сб. тр. III междунар. науч.-практ. конф. М., 1–3 февраля 2006 г. М., 2006. С. 637–641.*
9. Кашеев, И. Д. Огнеупорные материалы для футеровок тепловых агрегатов / И. Д. Кашеев // *Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: материалы I междунар. конгресса. М., 2004. С. 27–36.*
10. Лактионов, В. В. Возможности энергосбережения в термическом оборудовании ЗАО «Кераммаш» / В. В. Лактионов // *Теория и практика энергосберегающих термических процессов в машиностроении: сб. тр. III междунар. науч.-практ. конф. Минск, 19–21 ноября 2008 г. Минск*, 2008. С. 232–234.
11. Михалев, К. М. Анализ эффективности замены традиционной футеровки колпаковых и камерных печей металлургического производства на футеровку из огнеупорного керамического волокна / К. М. Михалев // *Новые огнеупоры*. 2010. № 10. С. 16–20.
12. Печь с выкатным подом: пат. 4210 Респ. Беларусь: МПК F 27 В 3/00, F 27 В 9/00, F 27 В 13/00 / В. И. Тимошпольский, М. Л. Герман, П. С. Гринчук и др.; заявитель Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Бел. нац. техн. ун-т. № u 20070199; заявл. 22.03.2007; опублик. 15.11.2007 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. 2007. № 6. С. 101.
13. Гринчук, П. С. Нагрев металла в газопламенных печах. Математическое моделирование и экспериментальное исследование / П. С. Гринчук [и др.] // *Тез. докл. и сообщ.: VI Минский междунар. форум по тепло- и массообмену. Минск, 19–23 мая 2008 г. Минск*, 2008. Т. 2. С. 310–314.
14. Замятин, В. Л. Современные огнеупорные материалы и изделия для футеровок нагревательных и термических печей / В. Л. Замятин, И. В. Егоров, О. Н. Липин // *Сталь*. 2006. № 7. С. 81–82.
15. Маслов, В. А. Высокотемпературный теплоизоляционный материал из железграфитовых отходов металлургии / В. А. Маслов // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. ГМетАУ (Энергетика. Металлургия): в 2-х т. Днепропетровск*, 1999. Т. 1. С. 59–62.
16. Словиковский, П. А. Оптимизация футеровки камерных нагревательных печей / П. А. Словиковский, Г. С. Хандрига // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. НМетАУ: в 7-ми т. Днепропетровск*, 2002. Т. 7. С. 87–90.
17. Торопов, Е. Е. Оптимизация изоляции тепловых агрегатов / Е. Е. Торопов, В. И. Панферов // *Металлургическая теплотехника: История, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М. А. Глинкова: сб. тр. III междунар. науч.-практ. конф. М., 1–3 февраля 2006 г. М., 2006. С. 593–596.*

18. С о к о л о в, А. К. К выбору экономичной тепловой изоляции зон топливной секционной печи / А. К. Соколов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2008. № 5. С. 35–38.
19. П а р а м о н о в, А. М. Оптимизация параметров футеровки высокотемпературных установок / А. М. Пармонов, В. В. Крайнов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. № 4. С. 60–64.
20. З у б а щ е н к о, В. М. Принцип оптимизации многослойных теплоизолирующих облепленных футеровок промышленных печей и установок / В. М. Зубашенко, И. Н. Кузин // Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: материалы II междунар. конгресса. 2006. С. 181–183.
21. Б а й р а ш е в с к и й, Б. А. Основы рациональной утилизации теплоты с поверхности промышленных печей / Б. А. Байрашевский // Изв. вузов и энергет. объедин. СНГ. Энергетика. 2011. № 1. С. 52–63.