

Тепловая работа и перспективные конструкции шахты и металлоприемника доменной печи при применении пылеугольного топлива

Выполнены исследования и анализ тепловой работы системы ограждения доменной печи при освоении технологии плавки с применением ПУТ. Показана необходимость адаптации конструкции доменной печи под работу с ПУТ. Ил. 4. Табл. 2. Библиограф.: 9 назв.

Ключевые слова: доменная печь, пылеугольное топливо, шахта, металлоприемник, система охлаждения, тепловые потери, контроль, термограмма

Researches and analysis of thermal performance of blast furnace guarding system during assimilation of melting practice with application of pulverized coal fuel (PCF) are fulfilled. The necessity of adaptation of blast furnace construction for working with PCF is shown.

Keywords: blast furnace, pulverized coal fuel, shaft, blast-furnace crucible, cooling system, thermal losses, control, thermograph

Опыт освоения пылеугольного топлива (ПУТ) в 2009-2013 году на доменных печах среднего объема (1500÷3000 м³) ПАО «Алчевский металлургический комбинат» («АМК») и ПАО «Запорожсталь» показал, что кроме организационных факторов (качество сырья, технология) имеются и технические, которые уменьшают эффективность применения технологии ПУТ в Украине в сравнении с зарубежной практикой [1, 2]: малый объем печей; неэффективные загрузочные устройства; уменьшение ресурса работы системы охлаждения печи.

Перевод отечественных доменных печей ПАО «АМК», ПАО «Запорожсталь» и ПАО «ММК им. Ильича» в 2000-х годах на технологию работы с ПУТ показал, что конструкция системы охлаждения этих печей выходит из строя быстрее по сравнению с их работой на природном газе [1, 2].

Исследования тепловой работы на ДП № 1 ПАО «АМК» показали, что при использовании ПУТ увеличивается: общая тепловая мощность печи и ее производительность, количество первичного шлака и содержание закиси железа в нем, нестабильность тепло-газодинамической работы фурменной зоны и печи в целом, тепловые нагрузки на систему охлаждения горна и лещади, заплечиков и шахты. Износ шахты и горна усилился после полного отключения природного газа и перевода печи на работу только с ПУТ, несмотря на уменьшение концентрации кислорода в дутье и периферийного потока газов, усиление осевого распределения газового потока посредством управления режимом загрузки шихты [1, 2].

На ДП № 1 при увеличении расхода ПУТ и уменьшении расхода природного газа усиливалась окружная неравномерность и величина температурно-тепловых нагрузок в нижней части печи, особенно на заплечики и фурменные приборы. Тепловые нагрузки на одну фурму увеличились со 130÷190 до 160÷240 кВт, неравномерность их распределения увеличилась более чем в полтора раза. Изменения распределения температурно-тепловых

нагрузок по высоте и периметру печи отслеживались термографическим методом на основании инструментальных измерений температур кожуха печи и обработки их по специальной методике (рис. 1) [3-5].

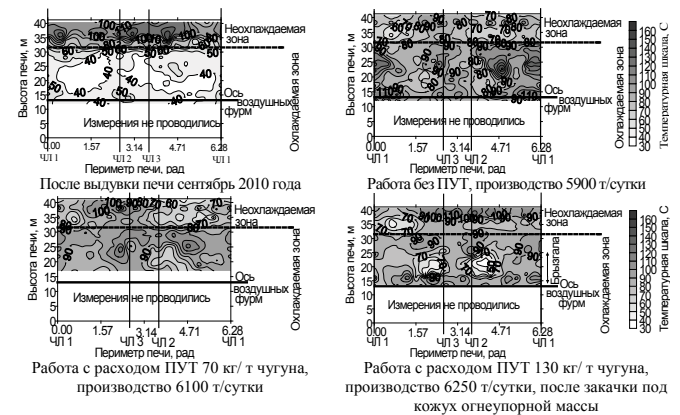


Рис. 1. Термограммы кожуха доменной печи по данным инструментальных замеров в период вдувания ПУТ и природного газа

Инструментальными замерами суммарных тепловых потерь в системе охлаждения ДП № 1 по методике ИЧМ НАНУ установлено, что средняя величина внешних тепловых потерь при работе с природным газом составляла 14 МВт (12÷18 МВт, 6 замеров), при работе с ПУТ и с природным газом – 20 МВт (15÷25 МВт, 6 замеров), только с ПУТ – 23 МВт (18÷26 МВт, 4 замера) [1-5].

При переходе на технологию работы ДП № 1 с ПУТ тепловые нагрузки на заплечики и горн увеличились более чем в полтора раза (см. рис. 1) [1, 2]. Расчетная величина расхода кокса на покрытие внешних тепловых потерь изменялась от 18 до 36 кг/т чугуна. В результате износа системы ограждения печи и уменьшения производительности печи в 2013 году удельные на тонну чугуна тепловые потери увеличились на 20 % в сравнении с работой в 2011 году, а расход кокса на покрытие тепловых потерь увеличился на 7 кг/т чугуна (рис. 2).

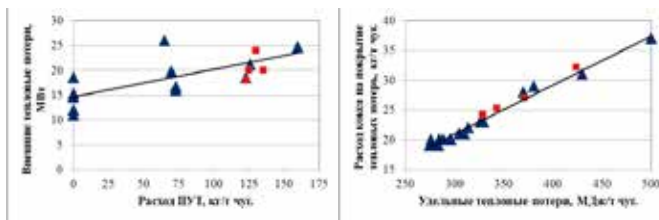


Рис. 2. Суммарные тепловые потери в системе охлаждения печи и расход кокса на их покрытие (▲ – 2010-2011 гг., ■ – октябрь-декабрь 2013 г.)

Увеличение тепловых нагрузок на заплечики и горн, усиление окружающей неравномерности их распределения требует пересмотра технических решений, принимаемых при разработке конструкции, системы охлаждения, холодильников и профиля печей, переходящих на технологию работы с ПУТ. Актуальным является автоматизированный контроль внешних тепловых потерь в системе охлаждения печи и изготовление качественных холодильников стойких к термомеханическим напряжениям и истиранию [3-5].

Работы в направлении продления срока службы печи исторически ведутся в трех основных направлениях усовершенствования: системы охлаждения; профиля и геометрических размеров печи; управления распределением шихты и газового потока по радиусу печи.

С увеличением объема доменных печей от 1033 до 2000, 3200 и 5000 м³ проектный угол наклона шахты уменьшается с 85°35' до 84°23', 83°43', а для печи объемом 5500 м³ составляет 81°59'. Уменьшение угла наклона шахты, определяющее тенденцию развития периферийного потока газа, прогрессирующего в процессе износа футеровки и системы охлаждения, по-видимому, является одной причиной роста тепловых нагрузок на холодильники печей большого объема [4]. Замеры на доменных печах различного объема показали, что средний удельный тепловой поток возрастает примерно на 60% с увеличением их объема с 1000 до 5000 м³, а в шахте эта величина увеличивается вдвое; что не подтверждает используемое в проектах систем охлаждения положение о независимости плотности теплового потока от объема печи [4].

Опыт ИЧМ НАНУ, накопленный при освоении работы доменных печей большого и среднего объема, показал, что уменьшить тепловые нагрузки на систему охлаждения и продлить кампанию доменной печи можно за счет формирования в печи интенсивного осевого газового потока и рационального дутьевого режима плавки. Эффективно реализовать эти мероприятия позволяют современные бесконусные загрузочные устройства и конструкции фурменных приборов [1-4].

Увеличение высоты заплечиков и распара при увеличении отношения диаметра распара к диаметру горна способствуют уменьшению тепловых нагрузок на заплечики и более стабильной тепловой работе низа печи за счет улучшения условий для

противотока газов, шихты и расплава, тепловой обработки материалов и восстановительной работы газового потока, уменьшению сопротивления восходящему потоку газов, разрыхлению слоя шихтовых материалов в районе распара и заплечиков, что особенно актуально для технологии работы с ПУТ в условиях недостаточного хорошего и стабильного качества шихтовых материалов [1, 2, 6].

Системы охлаждения шахты и заплечиков доменных печей характеризуются большим разнообразием конструкций холодильников. Мировой опыт эксплуатации систем охлаждения доменных печей с вертикальными плитовыми холодильниками доказал их преимущества перед кронштейновыми и горизонтальными, которые расположены в шахматном порядке и создают значительную неравномерность теплового поля в кладке, что вызывает неравномерность поля термических напряжений и разрушение кладки [7]. Применение вертикальных плитовых холодильников позволило увеличить равномерность и эффективность охлаждения, а также устойчивость конструкции стенки печи.

По пути применения медных холодильников и технологии ПУТ шли Страны Западной Европы и США, а СССР – вертикальных чугунных, которые были дешевле и, как минимум, не уступали в обеспечении ресурса и межремонтного периода эксплуатации шахты печей при вдувании в горн природного газа [6, 7].

Недостаточность ресурса плитовых чугунных холодильников заплечиков при освоении технологии применения ПУТ подтвердилось результатами опыта на ДП № 1 ПАО «Алчевский металлургический комбинат», полезным объемом 3000 м³ [1, 2]. Опыт эксплуатации доменных печей Японии с ПУТ показал, что недостатки конструкции плитовых чугунных холодильников можно устранить за счет: применения качественно изготовленной цельной конструкции холодильника из чугуна с шаровидным графитом и огнеупора залитого в тело холодильника, увеличения количества и плотности расположения труб охлаждения водой внутри тела холодильника. Это позволит добиться продолжительности кампании печи до 15-25 лет [8].

Отечественный опыт массового производства высококачественных холодильников для крупнейших доменных печей в СССР и за рубежом (Бельгии, Франции, Италии, Мексики и др.) использовался и реализовывался на Днепропетровском заводе металлургического оборудования (ДЗМО) в 1959-1996 годах [9]. На сегодняшний день этот опыт целесообразно восстановить.

Целесообразность применения медных холодильников для продления кампании печи на отечественных предприятиях не однозначна, так как при этом увеличивается расход кокса на покрытие внешних тепловых потерь почти в 1,5 раза. Например, по данным исследований ИЧМ НАНУ на ДП «Россиянка» ОАО «НЛМК» объемом 4291 м³,

из-за применения медных холодильников от заплечиков до середины шахты и охлаждения чугунными холодильниками с середины шахты до колошника расход кокса на покрытие тепловых потерь в системе охлаждения этой печи больше на 5-10 кг/т чугуна, чем на ДП № 6 ОАО «НЛМК» объемом 3200 м³, охлаждаемой плитовыми чугунными холодильниками до середины шахты [4].

Основным недостатком медных холодильников по сравнению с чугунными холодильниками является их высокая стоимость, большие тепловые потери в системе охлаждения и расход кокса на их покрытие. Преимуществом является простота технологии изготовления. В то же время, большинство печей Европы, идущих на реконструкцию, оснащаются медными холодильниками.

Результаты выполненных исследований показали, что применение медных холодильников для продления кампании печи при технологии вдувания в горн ПУТ является вынужденной мерой, которая вызвана отсутствием на отечественном рынке конструкции качественных холодильников из чугуна или другого материала, обеспечивающих эффективное охлаждение и увеличение срока службы шахты и заплечиков [1-9].

На сегодняшний день Государственное Украинское конструкторское бюро «Южное» совместно со специалистами Института черной металлургии НАН Украины и с Укркипрометом ведут разработку высокоэффективной системы охлаждения доменных печей. По сравнению с системами испарительного охлаждения с естественной и искусственной циркуляцией данная система позволяет держать на холодильниках одинаковый, не зависящий от тепловой нагрузки температурный уровень, при этом параметры пара будут выше и стабильнее, чем на традиционных системах испарительного охлаждения. Высокая теплоотводящая способность холодильников нового типа обеспечивает условия для стабилизации рабочих температур на футеровке печи и для образования гарнисажа.

Предложение зарубежных проектных организаций, увеличить высоту охлаждаемой части шахты, как и предложения по применению медных холодильников по исследованиям ИЧМ НАНУ не является прогрессивными с точки зрения увеличения тепловых потерь в системе охлаждения и расхода кокса на их покрытие. При стабильно работающих печах и высокой технологической культуре производства нет необходимости увеличивать охлаждаемую высоту шахты, не определяющую межремонтный период работы. Тепловые нагрузки в верхней части шахты имеют минимальную величину, соответствующую температурному полю в печи. Охлаждение шахты до колошника с применением медных холодильников приводит к увеличению тепловых потерь (рис. 3). На ДП № 6 НЛМК по рекомендации ИЧМ НАНУ высота охлаждаемой зоны была уменьшена на один ряд холодильников [4].

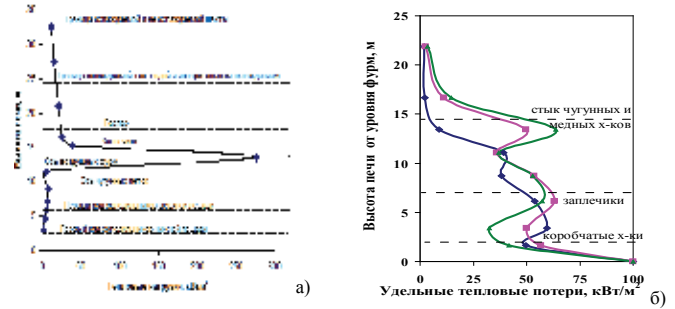


Рис. 3. Распределение удельных потерь теплоты по высоте доменных печей: а – ДП № 9 ПАО «АМКР»; б – ДП «Россианка» ОАО «НЛМК», охлаждаемая до колошника; в – ДП № 6 ОАО «НЛМК», охлаждаемая до середины шахты холодильниками из чугуна: 1 – распределение удельных потерь теплоты по высоте, 2 – уровень воздушных фурм

При неравномерном и интенсивном охлаждении шахты имеет место явление инверсии температурного поля (~ 50÷100 °С и выше), которое может приводить к образованию настыли, вследствие неустойчивых температурно-тепловых условий в этой зоне [3, 4] (рис. 4).

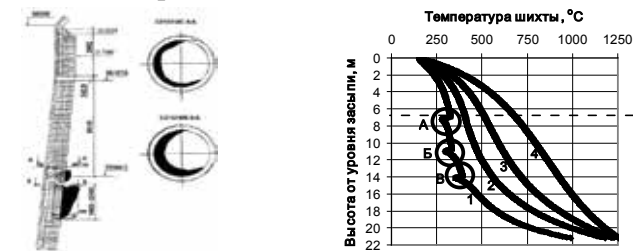


Рис. 4. Настыль на ДП № 6 ПАО «АМКР» и температура шихты на различных расстояниях от стенки, мм: 1 – 10; 2 – 50; 3 – 100; 4 – ось печи. А, Б и В – выступы холодильных плит (сапожки)

По экспериментальным данным стойкость даже высококачественных и дорогостоящих огнеупоров, защищающих плитовые холодильники, не превышает 12-24 месяцев. Свои взгляды на этот вопрос, японские исследователи выразили полезной фразой: «Газораспределение – лучший огнеупор, чем вода». Многолетние исследования этого вопроса, выполненные в ИЧМ на доменных печах Украины и ближнего зарубежья, согласуются с этим выводом [1-5].

Выполненные в мире исследования показали, что перспективным является использование в шахте и заплечиках карбидкремниевых и графитовых огнеупоров, а в горне технологии изготовления «керамического стакана» и водяное охлаждение лещади:

- карбидкремниевые огнеупоры на углеродистой связке (SiC + C) превосходят остальные огнеупоры по устойчивости к щелочам и тепловым ударам, по устойчивости к окислению в высокотемпературной зоне шахты;
- в горне технология «керамического стакана»

обладает большей стойкостью к воздействию чугуна, а так же малой теплопроводностью, что защищает холодильники от теплового удара, уменьшает тепловые потери и расход кокса на их покрытие;

- толщина материалов углеродистого и керамического слоев футеровки (технология «керамического стакана») в горне и их теплопроводности должны соответствовали требованию удержания температур 450÷1450 °С в керамическом слое.

Результаты расчета удельных тепловых нагрузок на систему охлаждения горна и лещади, при одинаковой толщине футеровки и при средней теплопроводности, без вдувания и с вдуванием ПУТ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Удельные тепловые нагрузки на систему охлаждения

Материал футеровки	Средняя теплопроводность, Вт/мК	Удельные тепловые нагрузки, Вт /м ²			
		Без вдувания ПУТ		С вдуванием ПУТ	
		Горн	Верхняя лещадь	Горн	Верхняя лещадь
Малопористый	9	5900	4300	8850	8600
Микропористый	13	7730	5500	11600	11100
Супермикропористый углерод	21	9870	7200	14800	14000

При вдувании ПУТ, как видно из табл. 1, еще при проектной толщине футеровки, выполненной из супермикропористого углеродистого огнеупора, холодильники горна и лещади начинают работать на предельных нагрузках, которые согласно нормам «Сантехпроекта» составляют соответственно для горна и верхней лещади 14000 Вт/м² и 15000 Вт /м². При проектировании новых печей целесообразно предусмотреть конструкцию холодильников горна и лещади стойкую к тепловым нагрузкам, возникающим при использовании огнеупоров с высокой теплопроводностью.

При износе футеровки на 1/3 ее первоначальной толщины холодильники горна и лещади начинают работать на предельных нагрузках уже и для микропористого углеродистого огнеупора (табл. 2). Большие тепловые нагрузки на систему охлаждения приводят к перемещению опасных для стойкости углерода изотерм 700÷1150 °С вглубь углеродистого блока.

Таблица 2. Удельные тепловые нагрузки на систему периферийного охлаждения при износе на 1/3 кладки

Материал футеровки	Средняя теплопроводность, Вт/мК	Удельные тепловые нагрузки, Вт /м ²			
		Без вдувания ПУТ		С вдуванием ПУТ	
		Горн	Верхняя лещадь	Горн	Верхняя лещадь
Малопористый	9	7270	5400	10090	10800
Микропористый	13	8750	6580	13120	13170
Супермикропористый углерод	21	11120	8060	22240	16100

При реконструкции и подготовке доменных печей к вдуванию ПУТ необходимо предусмотреть конструкцию огнеупорной футеровки имеющей, меньшую теплопроводность и большую стойкость к жидким продуктам плавки. Такими свойствами обладают керамические материалы. Керамическая кладка обладает малой теплопроводностью (1,8÷5,2 Вт/мК), высокой температурой начала размягчения под нагрузкой, и хорошей устойчивостью к воздействию жидких продуктов плавки.

На сегодняшний день керамическую кладку горна начали активно применять при реконструкции отечественных доменных печей, однако малый период ее эксплуатации порядка 5 лет, пока не позволяет полностью оценить ее преимущества перед старой конструкцией горна.

Выводы

При переходе от технологии работы доменных печей с природным газом к технологии доменной плавки с ПУТ усиливается нестабильность теплогазодинамической работы фурменной зоны и печи в целом, увеличиваются тепловые нагрузки на систему охлаждения печи.

Пульсационный режим подачи и сжигания ПУТ, увеличение на 10-25 % рудной нагрузки на кокс и уменьшение газопроницаемости столба шихты провоцируют переменные, увеличенные тепловые нагрузки на холодильники и резкие колебания температуры, особенно в области технические решения в конструкции фурм, системы охлаждения, холодильников, футеровки и профиля печи, загрузочного устройства, необходим автоматизированный контроль внешних тепловых потерь и состава колошниковога газа по радиусу печи.

Увеличение интенсивности охлаждения (увеличение поверхности охлаждения шахты до колошника и расхода воды в системе охлаждения, использование высокотеплопроводных материалов и меди в конструкции печи) приводит к увеличению расхода кокса и ухудшает технико-экономические показатели доменной плавки, может создавать предпосылки для инверсии температурного поля в шахте и искажения ее профиля.

Обеспечить продолжительный срок службы холодильников доменной печи, позволяет технология их качественного изготовления и рациональная увязка факторов: увеличения количества и плотности расположения труб охлаждения водой; определения рациональных геометрических размеров и формы рабочей ребристой поверхности холодильника для удержания футеровки; выбора материала для тела холодильников и огнеупора, улучшения качества их изготовления; организация работы системы охлаждения.

Охлаждение шахты доменной печи холодильниками до колошника не целесообразно. Эта зона не определяет межремонтный период работы печи.

Библиографический список

1. Освоение работы доменной печи, полезным объемом 3000 м³, с применением пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь и др. // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. – 2012. – № 4. – С. 36-40.

2. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий // *Металл и литейе Украины*. – 2013. – № 10. – С. 5-10.

3. Новые методы контроля технического состояния ограждения доменных печей без останова технологического процесса / В. И. Большаков, С. П. Суцев, А. Л. Чайка, А. А. Суслонов, А. Б. Юрьев, С. Ф. Бугаев, Г. В. Панчеха, А. В. Бородулин // *ОАО «Черметинформация» Бюллетень «Черная металлургия»*. – 2006. – № 6. – С. 27-38.

4. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, С. П. Суцев – Днепродзержинск: ДГДУ, 2006. – 542 с.

5. Патент 104228 Україна, МПК С 21 В 721. Спосіб контролю ходу доменної печі / В. І. Большаков, О. В. Бородулін, О. Л. Чайка, О. І. Швачка. – № а201209096; заяв. 24.07.2012; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 8. – 8 с.

6. Жеребин Б. Н., Пареньков А. Е. Неполладки аварии в работе доменных печей. – Новокузнецк, 2001. – 275 с.

7. Андоньев А. С. Охлаждение доменных печей / А. С. Андоньев, О. В. Филиппьев, Г. А. Кудинов – М.: Металлургия, 1972. – 362 с.

8. Tetsuzo Naga, Tajiro Matsui. Огнеупоры в доменной печи и технологические меры в шахте для продления кампании печи // *ОАО «Черметинформация»*. Новости черной металлургии за рубежом, 2011. – № 5. – С. 11-15.

9. Местецкий Р. А. Технологические основы изготовления высококачественных доменных холодильников / Днепропетровск: АО «Днепротяжмаш», 2000. – 283 с.

Поступила 21.03.2014

УДК 669.162.266.452

Чигарев В. В. /д. т. н./, Рассохин Д. А.

ГВУЗ Приазовский государственный технический университет

Наука

Особенности деформаций корпуса чаши шлаковоза

Данная работа посвящена аналитическому исследованию деформаций стенки чаши шлаковоза во время его эксплуатации. Установлена картина распределения деформаций в корпусе чаши в случае ее изготовления из стандартного материала (сталь 30) и с применением локального легирования в области опорного кольца. Ил. 3. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: шлаковоз, шлаковая чаша, конструкция, деформация, прочность, легирование, локальное легирование

This paper is devoted to an analytical study of deformations wall bowl slag during its operation. Set distribution pattern of deformations in the housing bowl in the case of the manufacture of the reference material (steel 30) and using the local doping in the support ring.

Keywords: slag, slag bowl, design, deformation, strength, doping, local doping

Чаша доменного шлаковоза в процессе эксплуатации наполняется расплавленным шлаком, температура которого может достигать 1600 °С. После наполнения шлаком происходит интенсивное распространение тепла по всему сечению чаши. Это объясняется значительной продолжительностью действия и мощностью источника тепла. Корпус чаши имеет на различных уровнях высоты не одинаковую толщину. Под влиянием неравномерного распространения тепла в корпусе возникают различные по величине и знаку напряжения. Известно, что неравномерность распространения тепла значительно усиливается в деталях, не симметричных по отношению к центру их массы, в массивных деталях, а также сложной конфигурации. Такой деталью является и чаша доменного шлаковоза. В случае достижения значений внутренних напряжений в материале выше предела текучести любая стальная деталь начинает пластиче-

ски деформироваться, что вызывает остаточные напряжения и деформации ее после остывания. Первоначальные размеры конструкции могут изменяться. В случае возникновения значительных температурных перепадов, вызывающих локальные тепловые напряжения, превышающие предел прочности материала, возможна угроза появления микротрещин. Это значительно уменьшает надежность отдельных узлов и конструкции в целом. При длительной эксплуатации могут возникать остаточные деформации в отдельных элементах шлаковой чаши, которые влияют на её несущую способность. Важнейшей задачей является не только уменьшение термических напряжений в конструкции на этапах технологического процесса изготовления, но и выравнивания его по объему в процессе эксплуатации. Решение этой проблемы возможно различными способами, например, за счет применения способа локального легирования.