

УДК 669.162.212

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ В ТЕЧЕНИЕ ПЯТИ ЛЕТ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© Семенов Юрий Станиславович^{1,2}, канд. техн. наук (yuriy.semenov@isi.gov.ua);

Шумельчик Евгений Игоревич^{1,2}, канд. техн. наук (ievgen.shumelchik@isi.gov.ua);

Горупаха Виктор Владимирович^{1,2} (victor.horupakha@isi.gov.ua);

Наследов Александр Витальевич¹ (oleksandr.nasliedov@isi.gov.ua);

Кузнецов Александр Михайлович³, канд. техн. наук, начальник доменного цеха (aleksandr.kuznetsov@metinvestholding.com);

Зубенко Александр Вячеславович³, начальник аглодоменного отдела, главный специалист по аглодоменному производству (aleksandr.zubenko@metinvestholding.com)

¹ Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ). Украина, г. Днепр

² ООО «Научно-техническое предприятие ДЧМ». Украина, г. Днепр

³ ЧАО «Енакиевский металлургический завод» (ЕМЗ). Украина, г. Енакиево

Статья поступила 23.01.2017 г.

Представлен анализ изменения температуры футеровки заплечиков, распара и шахты, их среднеквадратичных отклонений по окружности печи, а также суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения доменной печи № 3 ЧАО «ЕМЗ» за пять лет ее эксплуатации: с декабря 2011 г. по сентябрь 2016 г. Установлены предельные значения температуры, которые свидетельствуют о частичном или полном износе футеровки шахты. Выявлены особенности влияния технологических условий доменной плавки на изменение температуры футеровки доменной печи. Выполнена оценка состояния металлоприемника.

Ключевые слова: доменная печь; футеровка; термопары; БЗУ; качество кокса; содержание окатышей в шихте; тепловые нагрузки системы охлаждения; металлоприемник.

Эффективность работы современных доменных печей (ДП) в значительной степени определяется обоснованным использованием информации современных средств контроля процесса плавки. ДП-3 ЧАО «Енакиевский металлургический завод» по конструктивным решениям и уровню оснащения средствами автоматизации соответствует мировым стандартам, она была введена в эксплуатацию после реконструкции в октябре 2011 г. [1, 2], оборудована однотрактным бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) фирмы Paul Würth, а также оснащена комплексом современных средств контроля, в том числе термопарами футеровки шахты по высоте и окружности печи [3], установленными на глубину 100 мм при проектной толщине футеровки 300 мм. Термопары установлены на шести горизонтах шахты ДП-3, а также в распаре, заплечиках и в подфурменной зоне. По окружности печи термопары установлены следующим образом: на уровне заплечиков, распара и трех нижних горизонтах шахты – по восемь термопар, на следующих выше двух горизонтах – по шесть термопар и на верхнем горизонте – четыре термопары [3]. Футеровка по высоте шах-

ты печи выполнена из огнеупорных материалов двух типов:

– для зоны от уровня низа заплечиков до середины шахты – огнеупорный материал с содержанием карбида кремния (для обеспечения стойкости при контакте с чугуном и шлаком) его высокая теплопроводность позволяет снизить температуру горячей поверхности футеровки с последующим формированием защитного слоя гарнисажа. При этом огнеупор характеризуется высокой прочностью в рабочих условиях;

– в средней и верхней частях шахты использован огнеупорный материал с высоким содержанием глинозема на основе шамота. Применение этого материала позволяет достичь высокой стойкости к химическому воздействию и абразивному износу в восстановительной среде.

В течение анализируемого пятилетнего периода работы ДП-3 два раза был проведен ремонт с шоткретированием шахты: в июне 2014 г. и в сентябре 2016 г. Анализ динамики изменения температуры футеровки был выполнен для двух зон по высоте печи: нижней зоны – по средней температуре футеровки низа шахты, распара и заплечиков и верхней зоны – по средней температуре футе-

ровки середины и верха шахты (рис. 1). На рис. 1, а приведено изменение температуры в течение первой кампании шахты (до июня 2014 г.), на рис. 1, б – в течение второй кампании шахты (до сентября 2016 г.). Анализ динамики изменения среднемесячной температуры футеровки в течение двух кампаний эксплуатации печи (см. рис. 1) позволил установить предельные значения температур, которые свидетельствуют о частичном или полном износе футеровки шахты.

Температура футеровки середины и верха шахты ДП-3. С момента задувки ДП-3 в октябре 2011 г. средняя температура футеровки середины и верха шахты составляла 175–200 °С и сохранялась на этом уровне в течение восьми месяцев, вплоть до июня 2012 г. Затем началось постепенное повышение средней температуры на этих уровнях, что было связано с ухудшением качества шихтовых материалов из-за перехода на высокоосновный агломерат местного производства, характеризовавшийся низким качеством, отказ от кокса класса «Премиум», отсутствие в составе доменной шихты промывочных материалов, поиск решений по выбору режимов загрузки БЗУ, направленных на стабилизацию распределения газового потока в сложившихся условиях работы печи [4]. Повышение средней температуры футеровки середины и верха шахты с июня 2012 г. обусловлено работой ДП-3 в условиях сформированных чрезмерно развитым периферийным газовым потоком. Повышение температуры до уровня 400 °С происходило в течение семи последующих месяцев – до

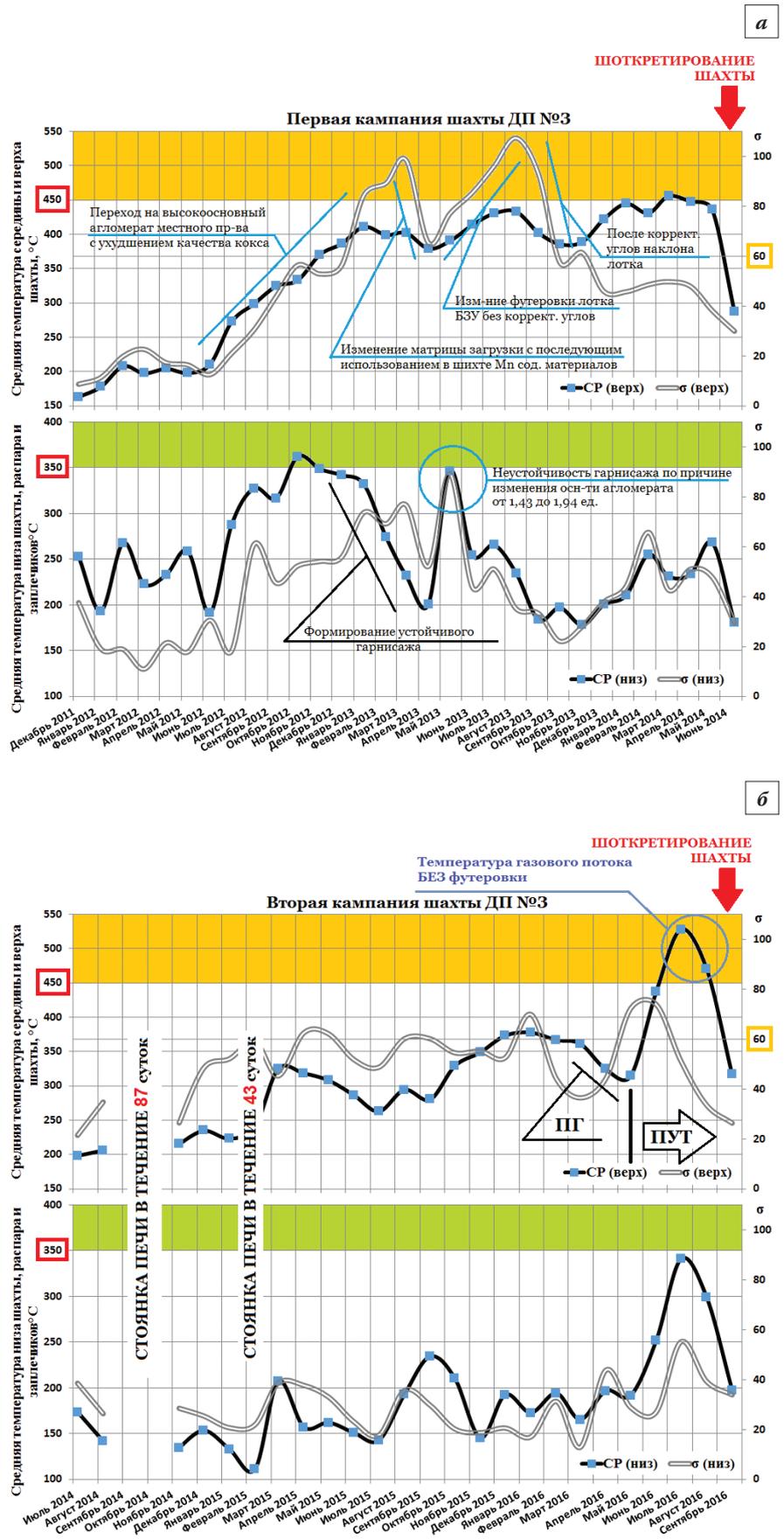


Рис. 1. Динамика изменения температуры футеровки ДП-3 в течение первой (а) и второй (б) кампаний шахты

февраля 2013 г. За этот период работы печи повышение температуры в два раза свидетельствовало о значительном уменьшении толщины футеровки на уровнях середины и верха шахты.

С февраля 2013 г. на ДП-3 был кардинально пересмотрен подход к выбору рациональных матриц загрузки БЗУ, была установлена новая матрица [5, 6], после чего в состав доменной шихты были введены марганецсодержащие материалы, обладающие промывочными свойствами. В комплексе это позволило обновить коксовую насадку и перераспределить газовый поток. Начиная с этого периода работы печи, средняя температура футеровки середины и верха шахты с незначительными отклонениями сохранялась на уровне 400 °С до января–февраля 2014 г., после чего увеличилась до 450 °С и продержалась на этом уровне вплоть до шоткретирования шахты в июне 2014 г. Визуальный осмотр шахты перед шоткретированием в этот период показал отсутствие футеровки, что позволило сделать вывод о том, что средняя температура середины и верха шахты на уровне 450 °С свидетельствует о полном износе футеровки.

Начало второй кампании шахты сопровождалось сложной экономической и политической ситуацией в регионе: дважды ДП-3 была остановлена на длительный период (87 и 43 сут) без выпуска козлового чугуна [7]. В течение девяти месяцев с момента задувки (с июля 2014 г. до марта 2015 г.) средняя температура футеровки середины и верха шахты составляла 200–250 °С. Величины 350 °С она достигла в декабре 2015 г., затем при работе на «безгазовой» шихте с увлажнением дутья температура на этом уровне продержалась до ввода в состав дутья природного газа, при котором температура футеровки вновь снизилась до 300 °С.

Начало освоения технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) привело к резкому повышению температуры футеровки середины и верха шахты. После превышения значения 450 °С в июле 2016 г. (являющегося признаком износа футеровки, как было установлено по результатам анализа первой кампании футеровки шахты) термомпары регистрировали уже температуру периферийного газо-

вого потока, которая перед очередным шоткретированием шахты достигла 550 °С.

Освоение технологии вдувания ПУТ на ДП-3 с выходом на расход более 120 кг/т чугуна (18–20 т/ч) совпало с окончанием двухлетней кампании футеровки шахты, что по состоянию на декабрь 2016 г. не позволяет сделать однозначного вывода для условий ДП-3 про влияние ПУТ на скорость износа огнеупорной футеровки. При этом, как уже отмечалось, наиболее теплонапряженной периферийной зоной по высоте ДП-3 при вдувании ПУТ явилась середина шахты. В первую очередь это связано с используемым в доменном цехе нетиповым «высовом» воздушных фурм, а также работой с высоким давлением под колошником. Такое решение полностью оправдано возможным интенсивным износом футеровки при вдувании больших расходов ПУТ, поскольку затраты на ремонт футеровки верхней части шахты значительно меньше, чем при замене футеровки заплечиков, распара и низа шахты.

Температура футеровки низа шахты, распара и заплечиков ДП-3, состоящей из карбидокремниевых материалов. В нижней зоне печи при рациональном ведении плавки формируется защитный гарнисаж, поэтому анализ динамики изменения температуры футеровки на этих горизонтах выполнен с учетом этих определяющих факторов.

С начала кампании ДП-3 температура футеровки нижней зоны печи изменялась в диапазоне 200–250 °С, с июня 2012 г., как и в случае с верхними горизонтами шахты, при ухудшении технологических условий плавки средняя температура футеровки низа шахты, распара и заплечиков начала возрастать и в октябре 2012 г. превысила 350 °С. Такая особенность была обусловлена резким увеличением содержания окатышей в железорудной части шихты (рис. 2) при отсутствии отработки

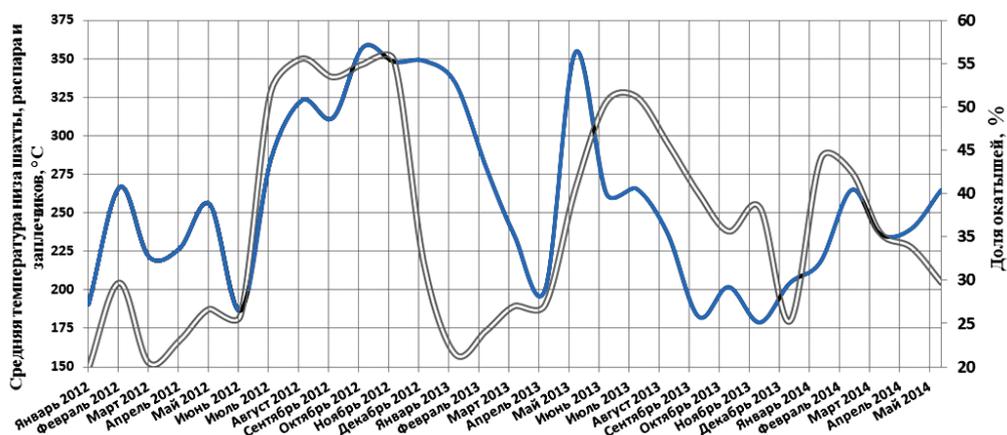


Рис. 2. Изменение средней температуры футеровки низа шахты, распара и заплечиков, а также содержания окатышей в смеси с агломератом в течение первой кампании футеровки ДП-3

режимов рационального соотношения агломерата и окатышей при загрузке с формированием необходимого их соотношения в периферийной зоне печи. Это привело к образованию в нижней зоне печи неустойчивого гарнисажа и, в конечном итоге, к его практически полному оползанию.

Затем, с декабря 2012 г. при уменьшении доли окатышей температура футеровки нижней зоны начала существенно снижаться и достигла 200 °С, как и в начале кампании печи. В мае 2013 г. с увеличением доли окатышей снова отмечено резкое повышение температуры до 350 °С, а затем с уменьшением количества окатышей в шихте средняя температура нижней зоны печи вновь снизилась до 175–200 °С и до шоткретирования шахты не превышала 275 °С. Это явилось следствием использования рациональных режимов формирования порций шихтовых материалов.

В течение второй кампании футеровки шахты ДП-3 средняя температура футеровки низа шахты, распара и заплечиков характеризовалась относительно стабильным изменением, температура футеровки нижней зоны печи не превышала 250 °С. Это обусловлено использованием на ДП-3 рациональных режимов формирования порций шихты, которые обеспечивают образование относительно стабильного гарнисажа при переменной доле окатышей в железорудной части шихты. Такая тенденция изменения температуры футеровки нижней зоны печи наблюдалась до конца июня – начала июля 2016 г., когда в доменной плавке начали использовать большие расходы ПУТ. В июле 2016 г. средняя температура футеровки низа шахты, распара и заплечиков составила 350 °С, а в августе уменьшилась до 300 °С. После чего была произведена выдувка ДП-3 на капитальный ремонт.

Таким образом, в результате анализа изменения температуры футеровки шахты, распара и заплечиков ДП-3 в течение пяти лет экс-

плуатации печи установлено, что среднемесячная температура футеровки середины и верха шахты 400 °С свидетельствует о ее значительном износе. Затем разрушение футеровки замедляется, и до достижения температуры 450 °С необходим постоянный контроль температуры футеровки. При превышении значения среднемесячной температуры 450 °С, как показали две кампании, футеровка середины и верха шахты полностью отсутствует. При среднемесячной температуре футеровки низа шахты, распара и заплечиков 300 °С в нижней зоне печи образуется неустойчивый гарнисаж, что требует корректировки состава и режима формирования порций шихты. Превышение температурой футеровки нижней зоны значения 350 °С свидетельствует о полном отсутствии защитного гарнисажа. Среднемесячная температура футеровки нижней зоны печи выше 350 °С в течение пяти лет эксплуатации печи практически не была отмечена, следовательно, превышение этого уровня температуры может свидетельствовать о разрушении футеровки.

Анализ динамики изменения суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения в течение пяти лет эксплуатации ДП-3 (рис. 3) показал, что при превышении 24 000 кВт футеровка шахты печи полностью отсутствует. В то же время от-

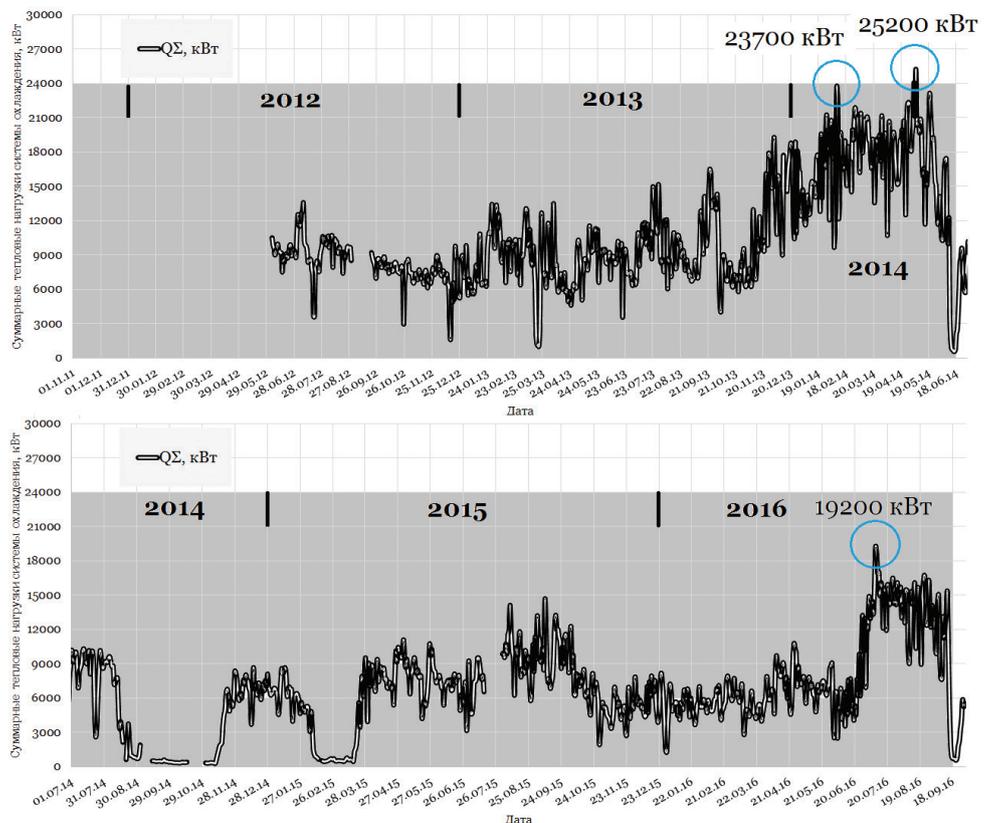


Рис. 3. Динамика изменения суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения ДП-3 в течение пяти лет эксплуатации печи

существовании футеровки шахты может наблюдаться и при более низких значениях суммарных тепловых нагрузок.

Так, в течение первой кампании шахты ДП-3 тенденция увеличения суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения с последующим превышением значения 24 000 кВт наблюдалась с начала 2014 г. В течение второй кампании шахты ДП-3 резкое увеличение показателя суммарных тепловых нагрузок (в 2,0–2,5 раза) совпало как со стабильным большим расходом ПУТ, так и с длительностью срока эксплуатации футеровки шахты печи. В конце второй кампании шахты ДП-3 увеличение суммарных тепловых нагрузок было незначительным – от 9000 до 19 000 кВт (в среднем). В конце первой кампании шахты печи этот показатель был значительно выше как по абсолютной величине (до 25 000 кВт), так и по длительности периода работы печи с высокими значениями показателя. Высокие значения суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения в первой кампании шахты ДП-3 обусловлены чрезмерным развитием периферийного газового потока (что приводило к увеличению расхода кокса, компенсирующего покрытие тепловых потерь), а также более высоким (по сравнению с

использованием ПУТ в конце второй кампании шахты) положением корня зоны вязкопластичного состояния материалов в столбе шихты в рабочем объеме печи.

В результате исследований по определению допустимого диапазона изменения температур шахты по высоте и окружности ДП-3 принято, что в качестве показателя стабильного хода печи могут быть использованы среднеквадратичные отклонения температур футеровки по окружности печи (σ). Установлено, что значения σ , превышающие 20% от средних температур футеровки шахты, свидетельствуют о нарушениях хода печи. Так, для уровней установки термпар в футеровке середины и верха шахты ДП величина σ не должна превышать 60 °С, а допустимый предел σ низа шахты, распара и заплечиков составляет 40 °С. На рис. 4 представлено изменение среднемесячных значений σ футеровки ДП-3 середины и верха шахты (а), низа шахты, распара и заплечиков (б) за пять лет работы печи.

Анализ изменения этого показателя в течение пяти лет эксплуатации печи показал, что при превышении установленных предельных значений σ имели место следующие технологические отклонения от нормального хода печи:

- освоение технологии плавки на высокоосновном агломерате местного производства с одновременным ухудшением качества кокса (со второй половины 2012 г. до октября 2013 г.). В этот период работа ДП сопровождалась частыми оползаниями сформировавшегося неустойчивого гарнисажа. Технологическими мероприятиями, направленными на стабилизацию хода печи, являлись: оптимизация качественного и количественного состава аглошихты [8], кардинальное изменение рабочей матрицы загрузки, опробование приемов формирования порций шихтовых материалов, способствующих образованию устойчивого гарнисажа, использование в составе доменной шихты марганецсодержащих материалов;

- незначительное превы-

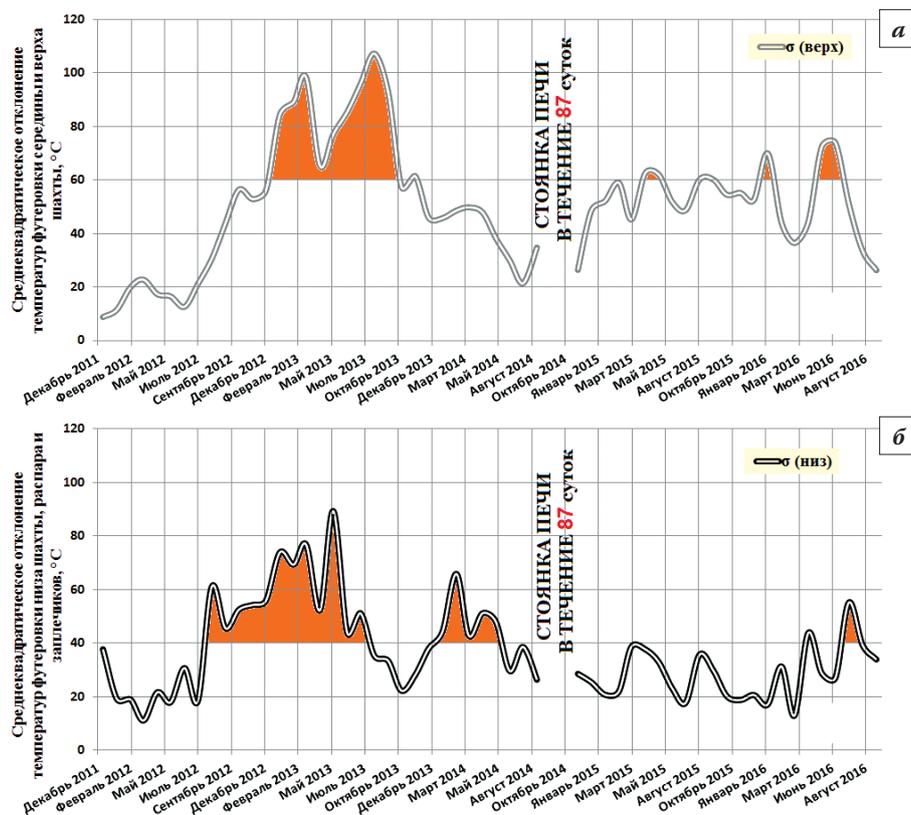


Рис. 4. Изменение среднемесячных значений σ футеровки ДП-3 середины и верха шахты (а), низа шахты, распара и заплечиков (б) за пять лет работы печи

шение (до 63 °С) среднеквадратичного отклонения допустимых значений температур футеровки середины и верха шахты (с конца марта по май 2015 г.) обусловлено второй в течение эксплуатации печи раздувкой после длительной (43 сут) остановки;

- работа ДП на «безгазовой» шихте с увлажнением дутья (в начале 2016 г.) явилась причиной повышения значения среднеквадратичного отклонения температур футеровки середины и верха шахты;

- увеличение с мая 2016 г. значения среднеквадратичного отклонения температур футеровки по всей высоте ДП обусловлено работой с высокими расходами ПУТ с одновременным износом футеровки шахты, кампания которой на тот момент достигла двух лет.

В перспективе контроль изменения величины σ футеровки ДП по окружности позволит судить о нарушениях хода печи и после поиска причин их возникновения принимать обоснованные управляющие воздействия путем реализации необходимых технологических мероприятий.

Состояние футеровки горна и лещади ДП-3. Футеровка металлоприемника ДП-3 выполнена из огнеупорных материалов фирм GrafTech International (США) и NDK (Япония). Рабочая поверхность металлоприемника защищена керамическим стаканом фирмы Saint-Gobain International (Франция).

Динамика изменения температуры футеровки в местах закладки термодар и тепловой нагрузки на систему охлаждения за всю кампанию печи показала достаточную стойкость керамического стакана и футеровки металлоприемника в целом. После пяти лет эксплуатации ДП-3 расчетный износ керамического стакана наблюдается лишь в зоне секторов чугунных леток, на уровне холодильников нижнего горна и верхней лещади. Максимальный износ керамического слоя составляет порядка 25% проектного (100 мм, при проектной величине 400 мм). На противоположной сектору чугунных леток стороне износ керамического стакана и футеровки отсутствует.

Заключение. Выполнен анализ динамики изменения температур футеровки заплечиков, распара и шахты, а также суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения ДП-3 за пять лет ее эксплуатации – с декабря 2011 г. по сентябрь 2016 г. В результате анализа изменения температур футеровки шахты, распара и заплечиков ДП-3 за этот период эксплуатации печи установлено,

что среднемесячная температура футеровки середины и верха шахты составляет 400 °С и является показателем значительного ее износа, затем разрушение футеровки замедляется и до достижения температуры 450 °С необходим постоянный контроль этого показателя. При превышении значения среднемесячной температуры 450 °С, как показали две кампании, футеровка середины и верха шахты полностью отсутствует.

При среднемесячной температуре футеровки низа шахты, распара и заплечиков 300 °С в нижней зоне печи образуется неустойчивый гарнисаж, что требует принятия решений по корректировке состава и режима формирования порций шихты. При температуре футеровки нижней зоны выше 350 °С полностью отсутствует защитный гарнисаж. Среднемесячные температуры футеровки нижней зоны печи более 350 °С в течение пяти лет эксплуатации печи практически не были отмечены, следовательно, превышение этого уровня температуры может свидетельствовать о разрушении футеровки.

Принято, что в качестве показателя стабильного хода печи могут быть использованы среднеквадратичные отклонения температур футеровки по окружности печи. Установлено, что величины среднеквадратичных отклонений температур, превышающие 20% от средних температур футеровки шахты, свидетельствуют о нарушениях хода печи. Так, для уровней установки термодар в футеровке середины и верха шахты ДП величина среднеквадратичного отклонения температур по окружности печи не должна превышать 60 °С, а допустимый предел среднеквадратичного отклонения температур футеровки низа шахты, распара и заплечиков – 40 °С.

Анализ состояния горна и лещади за пять лет эксплуатации ДП показал эффективность проектного решения по использованию керамического стакана, износ которого составил лишь 25% в зонах секторов чугунных леток.

Библиографический список

1. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Ivancha N.G. et al. Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of a Modern Blast Furnace // Metallurgical and Mining Industry. 2012. Vol. 4, No. 3. P. 158–165.
2. Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И. и др. Реализация энергосберегающей технологии загрузки современной доменной печи в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2014. № 6. С. 6–14.

3. Семенов Ю.С., Можаренко Н.М., Горупаха В.В. и др. Влияние топливно-сырьевых и технологических условий на характер изменения температуры футеровки доменной печи // Металлург. 2015. № 4. С. 21–28.

4. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Kuznetsov A.M. The Experience of the Implementation of Modern Blast Furnace Equipped with Bell-Less Top Charging Device under Conditions of Changing Quality of Charge Materials / Metallurgical and Mining Industry. 2013. No. 2. P. 56–64.

5. Семенов Ю.С. Выбор рациональных режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, для условий работы с малой массой подачи и с нестабильным качеством шихтовых материалов // Черная металлургия : Бюл. НТИЭИ. 2013. № 12. С. 14–19.

6. Семенов Ю.С. Новые подходы в управлении загрузкой доменной печи, оборудованной БЗУ, в современных условиях работы / Тр. II междунар. симп. «Познание процессов и развитие технологии доменной плавки» / под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. И.Г.Товаровского. Днепр : ЖУРФОНД, 2016. С. 272–285.

7. Кузнецов А.М., Коваленко А.Г., Зубенко А.В. Основные положения задувок доменных печей после остановок различной продолжительности // Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2015. Вып. 30. С. 90–109.

8. Большаков В.И., Нестеров А.С., Коваленко А.Г. Эффективная работа аглодоменного производства ПАО «ЕМЗ» при расширении использования в шихте вторичных ресурсов и окатышей // Сталь. 2014. № 11. С. 7–9.

MONITORING STATE OF BF LINING WITHIN FIVE YEARS OF ITS OPERATION

© Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I., Gorupakha V.V., Nasledov A.V., Kuznetsov A.M., Zubenko A.V.

The analysis of changes in the bosh lining temperatures, bosh and mines, their standard deviations on the circumference of the furnace is presented, as well as the total heat load of the cooling system of the blast furnace #3 "Yenakieve Iron & Steel Works" within 5 years of its operation (from December 2011 to September 2016). Temperature limits the at which the shaft lining partially or completely destroyed are established. The features of the influence of process conditions to change the blast furnace heat of blast furnace linings are defined. The evaluation of the state of the hearth is given.

Keywords: blast furnace; lining; thermocouple; BLT; coke quality; pellet content of charge; heat load of cooling system; hearth.

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

Проект ЧМК по производству фасонного проката на экспорт получил государственную поддержку

Экспертный совет Фонда развития промышленности Минпромторга РФ одобрил выделение займа Челябинскому металлургическому комбинату (ПАО «ЧМК», входит в Группу «Мечел») на реализацию проекта по производству рельсов и балки, ориентированных на экспорт.

Стоимость проекта – 1,52 млрд руб., из которых 300 млн руб. – заем ФРП. Проект предусматривает приобретение технологического оборудования для организации на базе рельсобалочного стана ЧМК производства рельсов, двутавровой балки и других видов фасонного проката, ориентированных на экспорт.

Часть экспортной продукции в рамках данного проекта будет выпущена уже в этом году. Полномасштабный запуск проекта намечен на II кв. 2019 г. ЧМК получил Сертификат на соответствие балки европейским стандартам качества, также комбинат имеет статус потенциального поставщика евро-рельсов для Deutsche Bahn – оператора железных дорог Германии.

«Благодаря привлеченному финансированию Фонда развития промышленности нам удастся реализовать экспортный потенциал универсального рельсобалочного стана. Проект по производству новых видов фасонного проката позволит значительно расширить сбыт продукции на международном уровне, увеличить загрузку стана и долю высокомаржинальной продукции в структуре сортамента ЧМК», – прокомментировал управляющий директор ПАО «ЧМК» Анатолий Щетинин.

Универсальный рельсобалочный стан ЧМК пущен в работу в 2013 г. Это одно из крупнейших отечественных производств высококачественного фасонного проката и рельсов длиной до 100 м. Рельсы производятся по уникальной для России технологии закалки рельсов в растворе полимера, благодаря чему приобретают высокие эксплуатационные показатели по износостойкости, прочности и пределу выносливости. На сегодня на стане освоено производство около сорока профилей фасонного проката и рельсов. Сегодня основные потребители продукции – ОАО «Российские железные дороги», заводы металлоконструкций, металлургические комбинаты, российские вагоностроительные предприятия.

Оксана Агапова,

руководитель PR-служб по Уральскому региону Группы «Мечел»

17 апреля 2017 г.