

УДК 669.162.212:662.2/9

**А.Л.Чайка, В.В.Лебедь, А.А.Жеребецкий, К.С.Цюпа, С.В.Гоман¹⁾,
А.П. Фоменко¹⁾**

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО
ТОПЛИВА НА РАЗГАР ФУТЕРОВКИ И ТЕПЛОВУЮ РАБОТУ
ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЗОНЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 4
ОАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»**

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины
ОАО «Запорожсталь»¹⁾*

Целью работы является анализ динамики разрушения футеровки доменной печи во взаимосвязи с показателями тепловой работы и технологическим режимом доменной плавки. Установлено, что увеличение расхода вдуваемого пылеугольного топлива, содержания серы и золы в его составе оказывает негативное воздействие на разгар футеровки и образование гарнисажа в шахте доменной печи. Благоприятное влияние на образование гарнисажа внизу шахты и уменьшение тепловых потерь в системе охлаждения оказывает: перераспределение газового потока от периферии к оси печи; уменьшение основности агломерата и уменьшение содержания окатышей в шихте; применение ильменитовой руды; уменьшение содержания кремния в чугуне; увеличение расхода дутья.

Ключевые слова: доменная печь, пылеугольное топливо, разгар футеровки, гарнисаж, тепловые потери

Современное состояние вопроса. Современная технология доменной плавки представляет собой сложную систему, которая включает различные мероприятия и меры, направленные на увеличение экономичности, надежности и производительности доменных печей. Тепловые нагрузки, действующие на ограждение доменной печи, оказывают ключевое влияние на ресурс работы шахты, разрушение футеровки и холодильников, сход и образование гарнисажа [1-9].

В отечественном доменном производстве автоматизированный контроль тепловых потерь и температуры футеровки использовался, как правило, для контроля разгара футеровки металлоприемника. Исключение составляют работы П. Г. Васильева по автоматизированному контролю разгара футеровки шахты на комбинатах «Азовсталь» и «Запорожсталь» в 80-х и 90-х годах прошлого века.

За рубежом автоматизированному контролю тепловых нагрузок на систему охлаждения традиционно уделялось больше внимание [8]. Эти разработки активно начали внедрять зарубежные фирмы при реконструкции старых и строительстве новых печей на постсоветском пространстве, начиная с 2000-х годов в России на ОАО «Северсталь», ОАО «Новолипецкого металлургического комбината» («НЛМК»). Исключение составляет доменная печь №6 ОАО «НЛМК», на которой

специалистами комбината установлен и используется для выявления расстройств в тепловой работе печи автоматизированный контроль тепловых потерь в системе охлаждения шахты и заплечиков [9].

Особенно актуально вопрос о необходимости реализации на доменных печах Украины средств автоматизированного контроля тепловой работы периферийной зоны доменной печи стал при освоении технологии доменной плавки с ПУТ из-за неудовлетворительного ресурса работы заплечиков и нижних рядов холодильных плит шахты [4-5].

Целью работы является анализ динамики разрушения футеровки доменной печи во взаимосвязи с показателями тепловой работы и технологическим режимом доменной плавки.

Основные результаты исследования. В 2014 году на доменной печи № 4 ОАО «Запорожсталь» объемом 1513 м³ реализована система автоматизированного контроля тепловой работы и разгара футеровки шахты (САК «Шахта»), что перспективно отличает ДП №4 от других печей Украины, перешедших на технологию работы с ПУТ. САК «Шахта» входит в состав АСУ ТП ДП № 4 и в режиме реального времени с начала кампании печи (август 2014 г.) контролирует разгар футеровки, образование гарнисажа и тепловые нагрузки на холодильники шахты доменной печи. В работе принимали участие от ОАО «Запорожсталь»: С.Е.Сафонов, М.Б.Болотов, А.В.Пивень, В.Бублей От ИЧМ НАНУ: А.В.Бородулин, Е.Ю.Шумельчик, А.А.Сохацкий, Б.В.Корнилов, В.Ю.Шостак.

В ходе капитального ремонта были внесены изменения в конструкцию шахты (охлаждения шахты до колошника) и использование новых огнеупорных материалов. В частности низ шахты был футерован огнеупорным торкретбетоном фирмы «Beck u.Kaltheuner» при помощи ручных распылителей, и был разделен на две зоны с разной теплопроводностью огнеупорного материала (схема доменной печи представлена на рис.1):

- низ шахты, распар и заплечики (отметки высоты от +14,030 до +23,400 м) выполнены из бетона марки «Bekefix VH 9 Shot» с теплопроводностью от 3,29 Вт/мК при 1000 °С до 4,35 Вт/мК при 300 °С;
- верх шахты до отметки +27,400 из бетона марки «Bekefix 57 Shot» с теплопроводностью от 1,95 Вт/мК при 800 °С до 2,12 Вт/мК при 400 °С.

Толщина слоя торкретбетона по проекту увеличивается снизу вверх шахты в пределах от 356 мм до 535 мм. Верх шахты от отметки +27,400 футерован шамотным кирпичом толщиной кладки в 690 мм.

Для охлаждения печи используются чугунные вертикальные плитовые холодильники, работающие в системе испарительного охлаждения (СИО) внизу шахты, в распаре и заплечиках, и охлаждаемые технической водой сверху шахты выше отметки +27,400 м. Вверху шахты холодильники имеют опорные водоохлаждаемые зубья для удержания огнеупорной кладки.

Основные технологические показатели работы доменной печи № 4 текущей кампании приведены в таблице 1.

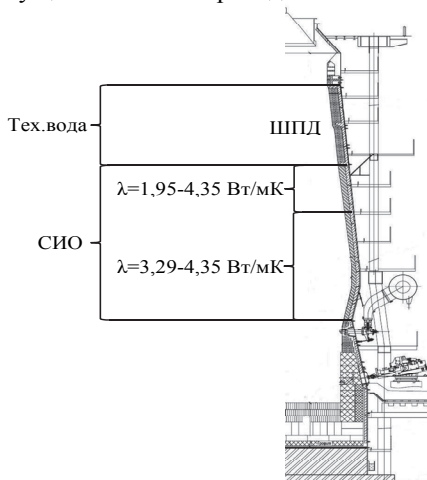


Рис.1. Схема системы охлаждения и футеровки ДП № 4 ОАО «Запорожсталь»

Таблица 1. Технологические показатели работы доменной печи № 4 ОАО «Запорожсталь» по данным за 2014-2015 гг.

Показатели	Значения показателя
Вид выплавляемого чугуна	передельный
Годовой объем производства, тыс. т	1120
Среднесуточная производительность, т/сутки	3000-3700
Вынос уловленной колошниковой пыли кг/т чугуна	15-20
Удельный расход кокса (сухой скиповый), кг/т	320-450
Рудная нагрузка, т/т кокса	4,5-5,0
Расход ПУТ, кг/т чугуна	170-200
Содержание в чугуне, % :	
Si	0,43-0,96
Mn	0,04-0,23
S	0,01-0,04
P	0,05-0,07
C	4,35-4,44
Fe	94,26-95,12
Содержание в шлаке, %	
SiO ₂	39,7-40,89
Al ₂ O ₃	7,14-8,15
CaO	45,56-48,33
MgO	3,17-6,09
MnO	0,1-0,16
FeO	0,21-0,28
S	0,59-0,72
Основность шлака, CaO/SiO ₂	1,14-1,19

Результаты работы САК «Шахта» на ДП №4 подтвердили, что технология доменной плавки с ПУТ оказывает наибольшее влияние на ресурс работы низа шахты [10]. Применение пылеугольного топлива обусловило износ футеровки низа шахты и распара. Вследствие этого произошел выход из строя точек контроля системы на указанных элементах печи (распар, отметка 18,685 м) через 4 месяца от начала эксплуатации и через 6 месяцев (низ шахты, отметка 21,500 м) 2015 г.

Динамика разгара футеровки и образования гарнисажа в шахте ДП №4 с начала компании печи показана на рис.2. Результаты расчета разгара футеровки от распара (16,855 м) до 9-го ряда холодильников шахты (27,400 м) показали, что за год эксплуатации, с августа 2014 г. до начала сентября 2015 г., объем футеровки уменьшился на ~72% – с 129 м³ до 36,4 м³.

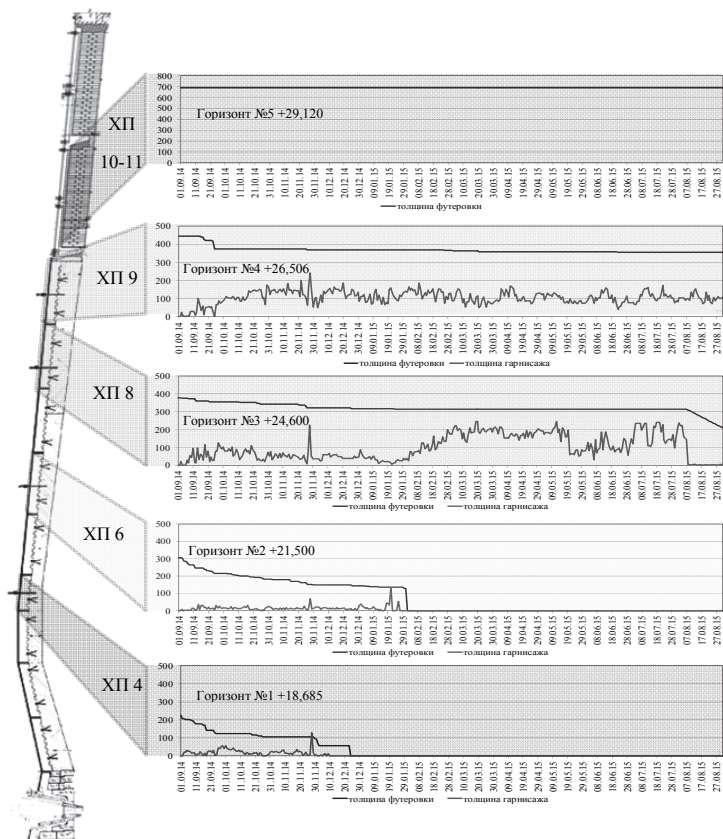


Рис.2. Динамика разгара футеровки и образования гарнисажа на ДП №4 ОАО «Запорожсталь»

Наиболее заметное влияние на разрушение футеровки на нижних горизонтах шахты в первые четыре месяца от задувки ДП № 4 после капремонта оказывала технология доменной плавки с применением ПУТ (рис.3). За первые 4 месяца эксплуатации на четвертом ряду холодильных плит (+18,685 м) футеровка практически полностью разрушилась. На 6-м ряду холодильных плит (+21,500 м) футеровка вышла из строя спустя 5 месяцев.

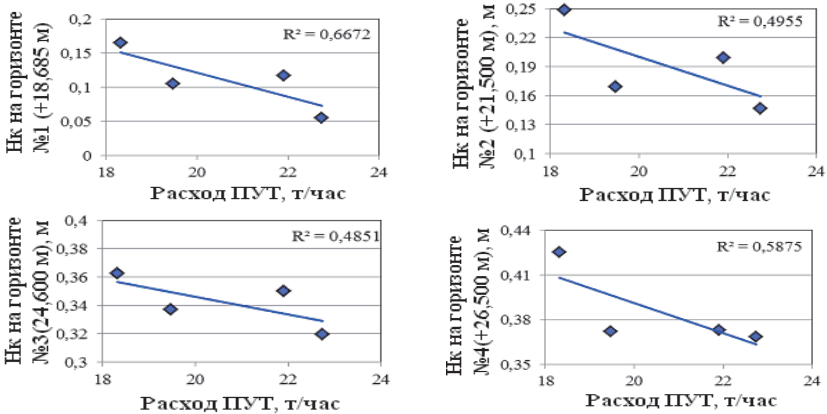


Рис.3. Влияние технологии доменной плавки с применением ПУТ на остаточную толщину футеровки (Нк) на различных горизонтах ДП № 4 в первые четыре месяца от задувки.

Влияние расхода ПУТ на разрушение футеровки усиливается с увеличением содержания серы и золы в ПУТ (рис.4). Это коррелируется с результатами исследований ИЧМ НАНУ, которые показали, что для улучшения технико-экономических показателей доменной плавки необходимо стремиться к увеличению содержания углерода и водорода в ПУТ [11].

Из графиков на рис. 4 видно, что степень влияния химического состава ПУТ на износ футеровки увеличивалась в направлении от нижних рядов холодильных плит шахты к фурменной зоне печи. Это может быть связано с формированием при сжигании ПУТ в фурменной зоне газового потока с включением серы и компонентов из золы кокса (SiO_2 и другие), которые препятствуют образованию гарнисажа и способствуют процессам термохимического разрушения футеровки.

Сохранению футеровки внизу шахты способствует работа с низкой теоретической температурой (рис.5). Теоретическая температура рассчитывалась по формуле ИЧМ НАНУ с учетом химического состава ПУТ [12].

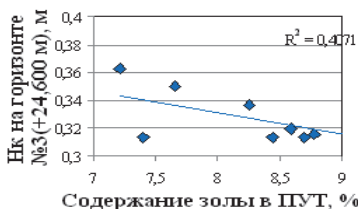
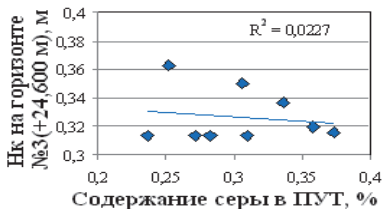
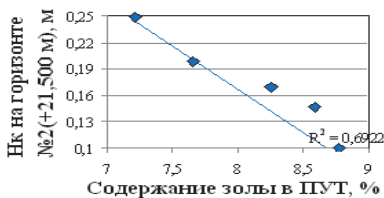
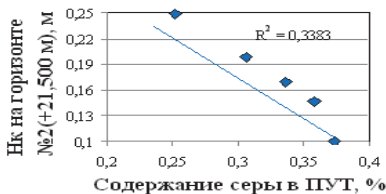
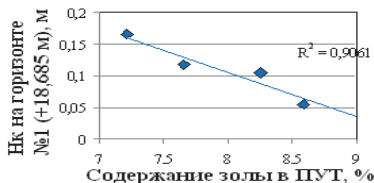
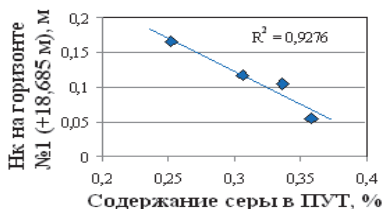


Рис.4. Взаимосвязь содержания серы и золы в ПУТ и остаточной толщины футеровки (Нк) на различных горизонтах по среднемесячным данным от начала кампании ДП №4 до полного или частичного ее разрушения

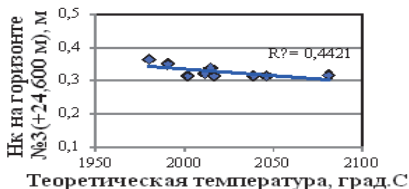
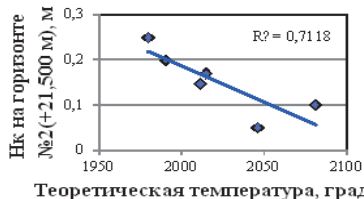
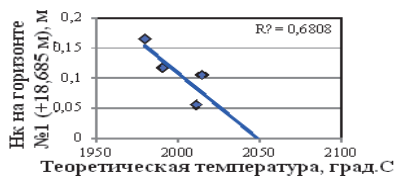


Рис.5. Взаимосвязь теоретической температуры горения с остаточной толщиной футеровки (Нк) на различных горизонтах по среднемесячным данным от начала кампании ДП № 4 до полного или частичного ее разрушения

В условиях работы ДП № 4 уменьшение теоретической температуры способствует не только сохранению футеровки, но и уменьшению расхода кокса (рис.6). Взаимосвязь между величиной теоретической температуры горения и производством чугуна не наблюдается.

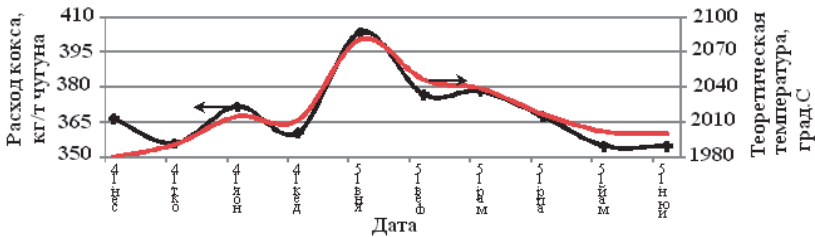


Рис.6. Динамика изменения теоретической температуры горения и расхода кокса по данным тех.отчета

По мере отдаления уровня футеровки от фурменных очагов вверх к колошнику, износ футеровки уменьшался вплоть до отсутствия ее износа в районе 10-11-х рядов холодильных плит (рис.2). Минимальный износ футеровки на 10-11 рядах холодильных плит может быть связан с конструктивными особенностями шахты (футеровка «зажата» между выступами – «зубьями» холодильных плит), а также ее удаленности от фурменных очагов и вязко-пластичной зоны.

Результаты исследований показали, что образованию гарнисажа на ДП №4 способствует применение агломерата с пониженной основностью и соответствующее уменьшение доли окатышей в шихте (рис.7).

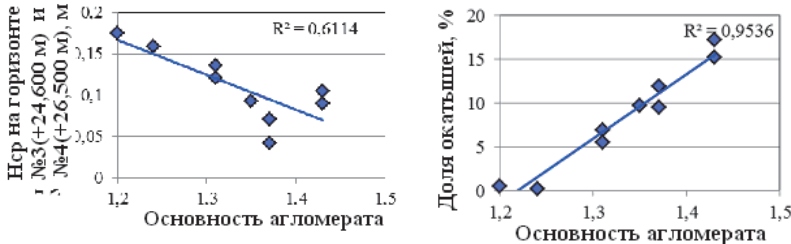


Рис.7. Взаимосвязь средней толщины гарнисажа (Hcp) на различных горизонтах и доли окатышей в шихте основностью агломерата

Также благоприятное влияние на образование гарнисажа внизу шахты ДП № 4 оказывает применение ильменитовой руды, уменьшение содержания кремния в чугуне и увеличение расхода дутья (рис.8).

Разгар футеровки оказал наиболее существенное влияние на величину тепловых потерь в испарительной системе охлаждения печи (рис.9) и на расход кокса на их покрытие (рис.10). С увеличением разгара футеровки увеличились тепловые потери в системе испарительного охлаждения печи с 1-2 до 8 МВт и расход кокса на их покрытие с 8 до 15 кг/т чугуна.

Общие тепловые потери печи увеличились с ноября 2014 года по начало сентября 2015 года с 15 до 18 МВт в период активного разгара

футеровки (август 2014 – февраль 2015). Расход кокса на их покрытие в тот же период увеличился с 17 до 22 кг/т чугуна (рис.11).

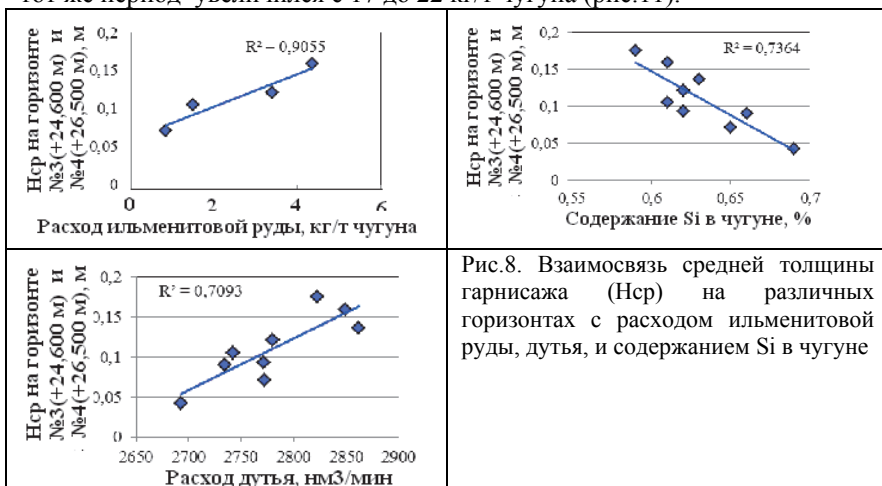


Рис.8. Взаимосвязь средней толщины гарнисажа (Hcp) на различных горизонтах с расходом ильменитовой руды, дутья, и содержанием Si в чугуне

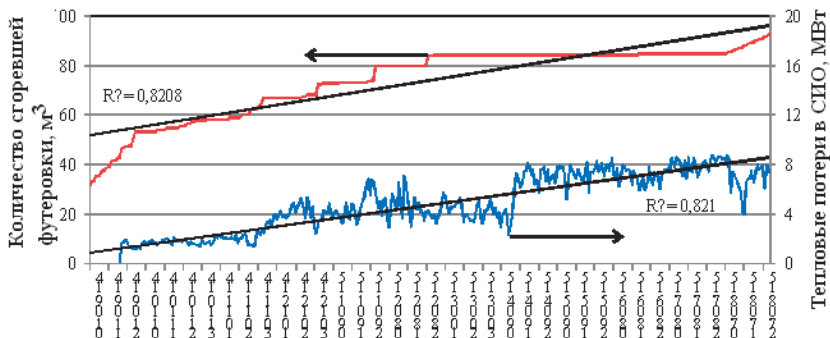


Рис.9. Динамика разгара футеровки шахты (с отметки +16,855 до отметки +27,400 м.) и тепловых потерь в системе испарительного охлаждения (СИО) ДП № 4 ОАО «Запорожсталь»

С января 2015 года, после разрушения значительной части футеровки на нижних горизонтах шахты, наблюдается тенденция к тесной взаимосвязи между распределением газового потока по радиусу ДП № 4, тепловыми потерями в системе охлаждения и расходом кокса на их покрытие. С увеличением отношения температуры периферии к температуре в газотовах (перераспределение газового потока к периферии) с 15 апреля 2015 года увеличились тепловые потери в системе охлаждения печи и расход кокса на их покрытие до 5 кг на тонну чугуна (рис.12).

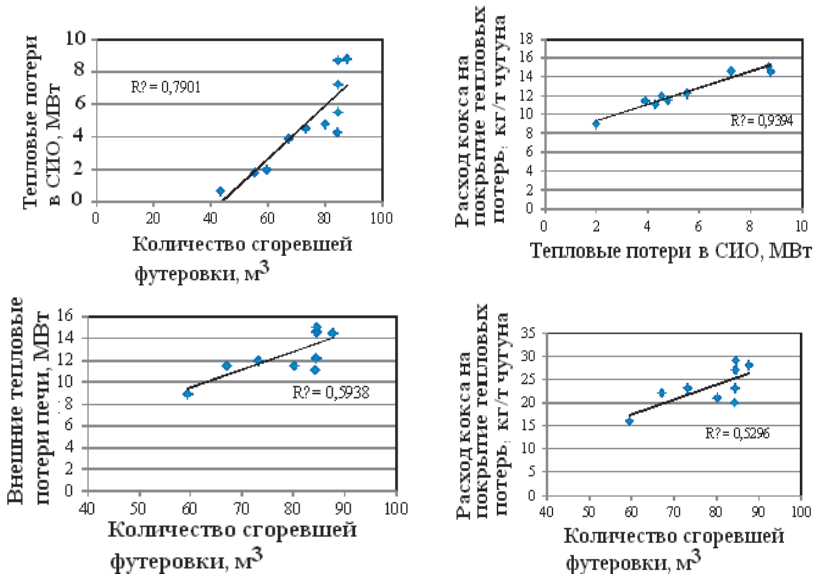


Рис.10. Влияние разгара футеровки ДП№4 ОАО «Запорожсталь» на тепловые потери в СИО, количество внешних тепловых потерь и расход кокса на их покрытие

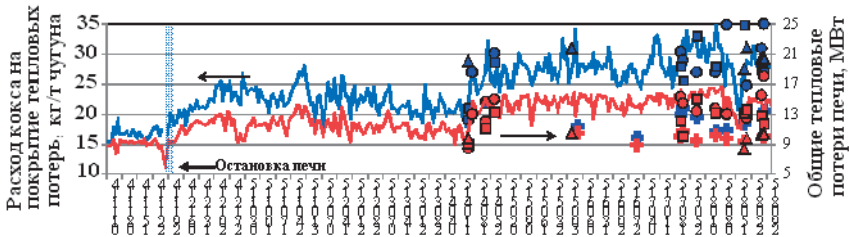


Рис.11. Динамика изменения тепловых потерь в системе охлаждения (—) и расхода кокса на их покрытие (—) на ДП №4 ОАО «Запорожсталь»

Результаты ручных замеров специалистами ИЧМ на доменных печах ОАО «Запорожсталь»: Тепловые потери (—ДП№2 ▲-ДП№3, ● - ДП№4, ■- ДП№5) Расход кокса на покрытие тепловых потерь (—ДП№2▲-ДП№3, ● - ДП№4, ■- ДП№5)

В августе 2015 года специалистами ИЧМ НАНУ были разработаны и опробованы рекомендации по изменению режима загрузки ДП №4, направленные на перераспределения газового потока от периферии к оси печи. На основе математического моделирования установлено, что наиболее «подгруженную» железорудными материалами периферию и «открытый» центр обеспечивает программа загрузки 4ААКК↓1КААК↓

при рабочем уровне засыпи 1,5 м. При повышении уровня засыпи гребень шихтовых материалов, формируемый на колошнике после их ссыпания с конуса, перемещается по направлению от стенки печи к оси (рис.13,а) и, как следствие, уменьшается величина рудной нагрузки на периферии (рис.13,б).

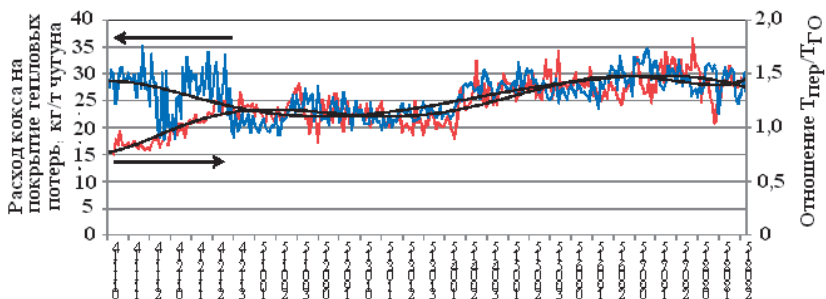


Рис.12. Динамика изменения отношения температуры периферии к температуре в газоотводах ($T_{\text{пер}}/T_{\text{ГО}}$) и расхода кокса на покрытие внешних тепловых потерь ДП № 4 ОАО «Запорожсталь»

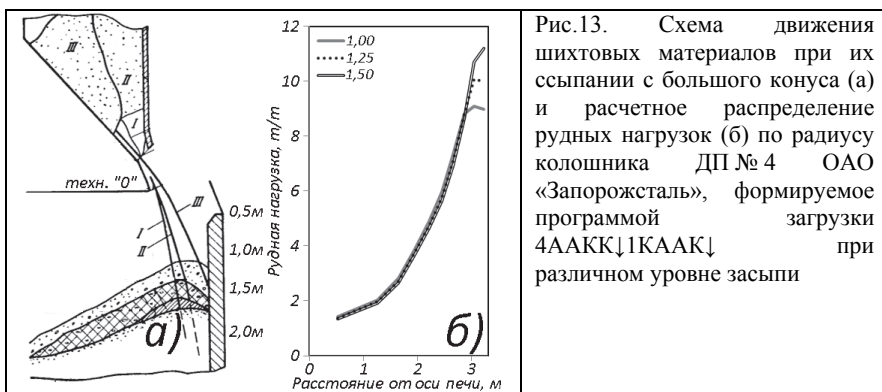


Рис.13. Схема движения шихтовых материалов при их ссыпании с большого конуса (а) и расчетное распределение рудных нагрузок (б) по радиусу колошника ДП № 4 ОАО «Запорожсталь», формируемое программой загрузки 4ААКК↓1КААК↓ при различном уровне засыпи

Опробование разработанных рекомендаций, несмотря на увеличение доли окатышей в шихте в этот период работы, позволили уменьшить тепловые потери в СИО на 4 МВт и расхода кокса на покрытие общих тепловых потерь печи до 10 кг/т чугуна (рис.14).

В настоящее время на комбинате ведется активная работа с привлечением специалистов ИЧМ НАНУ по продлению кампании печи на основе использования информации от САК «Шахта» для совершенствования конструкции и средств контроля тепловой работы шахты, выбора рационального режима доменной плавки.

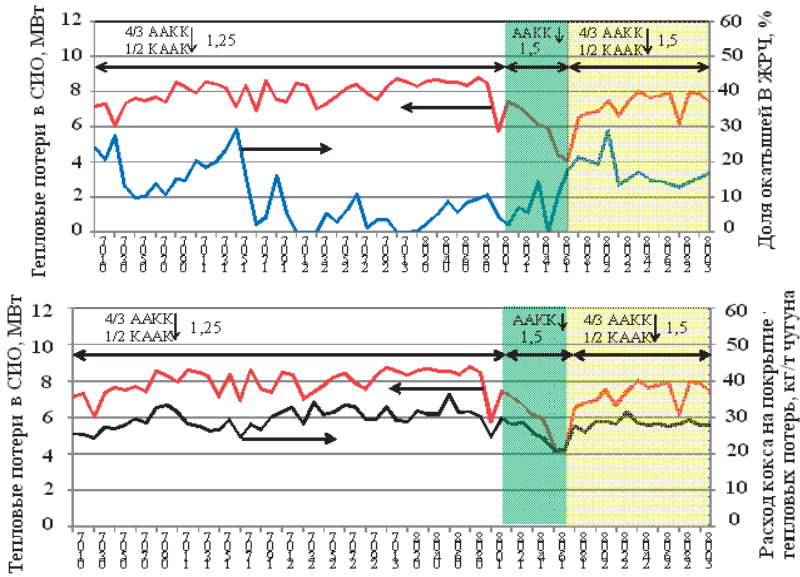


Рис.14. Влияние программы загрузки ДП №4 на тепловые потери в системе охлаждения шахты и расход кокса на их покрытие

Выводы:

1. Система автоматизированного контроля разгара шахты позволяет контролировать и оценивать влияние технологии доменной плавки и конструкции печи на ресурс ее работы, своевременно принимать меры по продлению кампании печи.

2. В течение 1 года эксплуатации доменной печи №4 ОАО «Запорожсталь», футеровка низа шахты была полностью изношена, что свидетельствует о необходимости в условиях освоения технологии доменной плавки с ПУТ оснащать доменные печи автоматизированными системами контроля тепловой работы периферийной зоны, которые позволят увеличить эффективность управления ее тепловым режимом работы, стабильность качества выплавляемого чугуна, ресурс работы футеровки и холодильников доменной печи за счет своевременного обнаружения и оценки причин отклонений в ее тепловом и газодинамическом режиме работы.

3. Установлено, что увеличение расхода дувяемого пылеугольного топлива и содержания серы и золы в его составе оказывает негативное воздействие на разгар футеровки и образование гарнисажа в шахте доменной печи.

4. Благоприятное влияние на образование гарнисажа внизу шахты и уменьшение тепловых потерь в системе охлаждения оказывает перераспределение газового потока от периферии к оси печи, уменьшение основности агломерата и уменьшения пропорционального содержания

окатышей в шихте, применение ильменитовой руды, уменьшение содержания кремния в чугуне и увеличение расхода дутья.

5. До полного разрушения в распаре и на нижних рядах холодильных плит футеровка ДП № 4 позволяла экономить минимум 3 кг/т чугуна кокса в год. Разгар футеровки привел к увеличению тепловых потерь в испарительной системе охлаждения печи с 1-2 до 8 МВт и расхода кокса на их покрытие с 8 до 15 кг/т чугуна, при этом общие тепловые потери печи увеличились с 15 до 18 МВт в период активного разгара футеровки, расход кокса на их покрытие в тот же период увеличился с 17 до 22 кг/т чугуна.

1. *Доменное производство «Криворожстали»* / В.И.Большаков, А.В.Бородулин, Н.А.Гладков и др. / Кривой Рог: Издательство СП «Мир» - 2004г. – 376 с..
2. *Домна в энергетическом измерении* / А.В.Бородулин, А.Д.Горбунов, В.И.Романенко, С.П.Сушев. – Днепродзержинск: «ДГТУ», 2006. – 541с.
3. *Контроль суммарной величины тепловых потерь с охлаждающей водой на печках доменного цеха и их практическое приложение* / В.И.Большаков, А.В.Бородулин, В.С.Листопадов и др. // Сб. научных трудов международной научно-практической конференции « «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло», посвященная 150-летию со дня рождения Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло» – Екатеринбург, 26-28 марта, 2014. – С.74-80.
4. *Исследования тепло-газодинамической работы в «сухой» зоне доменной печи и применение их результатов* / В.И.Большаков, А.А.Сохацкий, А.Л.Чайка, А.Г.Шевелев, А.И.Швачка // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 2. – С.15-19.
5. *Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печках Украины* / В.И.Большаков, А.Л.Чайка, В.В.Лебедь, А.А.Сохацкий // *Металл и литье Украины*. – 2013. – № 10. – С.5-10.
6. *Тепловая работа и перспективные конструкции шахты и металлоприемника доменной печи при применении пылеугольного топлива* / В.И.Большаков, А.В.Бородулин, А.Л.Чайка, В.В.Лебедь, А.А.Сохацкий, Г.В.Панчоха // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – № 3. – С.106-110.
7. *Кожух В.Я.* Контроль потерь тепла в доменной печи // *Сталь*. – 1965. – №4. – С.298-301.
8. *Савчук Н.А., Курунов И.Ф.* Доменное производство на рубеже XXI века // *Новости черной металлургии за рубежом*. Часть II. Приложение 5. 2000. – С.38.
9. *Диагностика распределения газового потока в нижней части доменной печи путем измерения тепловых потерь с охлаждающей водой в районе I-ой ступени теплообмена.* / В.Н.Титов, И.С.Яриков, С.С.Ляпин, В.Л.Емельянов, Д.Д.Иванов // *Материалы межзаводской школы по обмену опытом специалистов доменного пр-ва* ОАО «ММК», ОАО «НЛМК», ОАО «Северсталь» – Черметинформация, 2003 г. с. 19 – 21.
10. *Перспективы развития средств автоматизированного контроля для обеспечения надежности и экономичности доменной плавки на основании информации о тепловой работе шахты* / В.И.Большаков, А.Л.Чайка, А.А.Сохацкий, К.С.Цюпа др.// Сб. научных трудов IV межотраслевой научно-практической конференции молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго-и ресурсосбережения, защиты окружающей

природной среды «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды» – Харьков, 25-26 марта, 2015. – С.81 –85.

11. *Опыт* и перспективы применения пылеугольного топлива в доменном производстве Украины / В.И.Большаков, А.Л.Чайка, В.В.Лебедь, А.А.Сохацкий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 2. – С.6-11.
12. *Аналитические* исследования процессов в фурменной зоне и их приложения // А.Л.Чайка, А.Л.Ручаевский, А.В.Лычев, А.П.Васильев, А.Г.Байбуз // *Черные металлы. Материалы конференции к 100 летию А.Н. Рамма*. 2003. – №12. – С.8 – 13.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук И.Г.Товаровским*

***О.Л.Чайка, В.В.Лебедев, А.А.Жеребецкий, К.С.Цюпа, С.В.Гоман,
А.П.Фоменко***

Вплив технології з використанням пиловугільного палива на розпал футеровки та теплову роботу периферійної зони доменної печі № 4 «Запоріжсталь»

Метою роботи є аналіз динаміки руйнування футеровки доменної печі у взаємозв'язку з показниками теплової роботи і технологічним режимом доменної плавки. Встановлено, що збільшення витрат пиловугільного палива, вмісту сірки і золи в його складі робить негативний вплив на розпал футерування і утворення гарнісажу в шахті доменної печі. Сприятливий вплив на утворення гарнісажу внизу шахти і зменшення теплових втрат в системі охолодження надає: перерозподіл газового потоку від периферії до осі печі; зменшення основності агломерату та зменшення вмісту окатишів в шихті; застосування ільменітової руди; зменшення вмісту кремнію в чавуні; збільшення витрат дуття.

Ключові слова: доменна піч, пиловугільне паливо, футеровка, гарнісаж, теплові втрати

***A.L.Chaika, V.V.Lebedev, A.A.Zherebetsky, K.S.Tsiupa, S.V.Goman,
A.P.Fomenko***

The influence of technology of pulverized coal to the height of the lining and the thermal performance of the peripheral zone blast furnace number 4 «Zaporizhstal»

The aim is to analyze the dynamics of the destruction of the lining of the blast furnace in conjunction with the thermal performance characteristics and technological mode of blast furnace. An increase rate of the injected pulverized fuel ash and sulfur in its composition has a negative impact on the height of the lining and the formation of skull in the blast furnace shaft. The favorable effect on the formation of skull at the bottom of the mines and the reduction of heat losses in the cooling system has a redistribution of the gas flow from the periphery to the axis of the furnace; the reduction of the agglomerate and decrease in pellets in the charge; the use of ilmenite ore; reduction of silicon content in cast iron; increase in blast flow.

Keywords: blast furnace, pulverized coal, the height of the liner, skull, heat loss